

Volumen 57

Número 2 · 1982

Comunicaciones Eléctricas

Edición española de ELECTRICAL COMMUNICATION

Revista técnica publicada trimestralmente por International Telephone and Telegraph Corporation

Comunicaciones Eléctricas presenta las investigaciones, los desarrollos y las realizaciones conseguidas por ITT y sus compañías asociadas.

Publicada desde 1922 en su versión inglesa, aparece ahora editada en cuatro lenguas. Se distribuye en el mundo entero.

Se invita a los ingenieros de ITT a proponer proyectos de artículos, cuyos resúmenes deben enviarse al editor internacional para su consideración.

Director Ejecutivo

Lester A. Gimpelson, Bruselas

Editor, Comunicaciones Eléctricas

Antonio Soto, Madrid

Editor, Electrical Communication

Michael Deason, Harlow

Editor, Elektrisches Nachrichtenwesen

Otto Grewe, Stuttgart

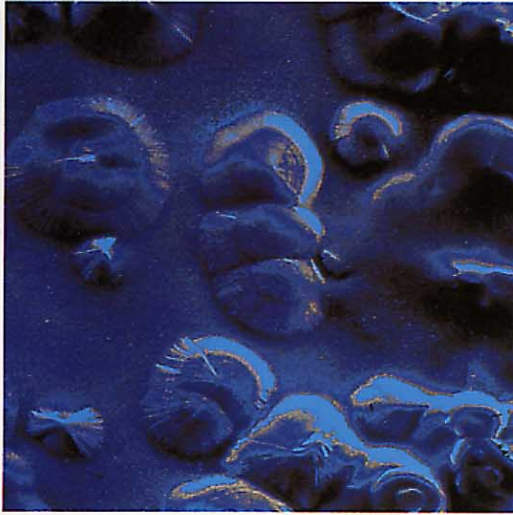
Editor en funciones, Revue des Télécommunications

Lester A. Gimpelson, Bruselas

© International Telephone and Telegraph Corporation, 1982.

Las direcciones de los editores se dan en la página 176

- Indice
- 82 **Presentación**
- 83 **Desarrollo de cables no propagadores de llama y de baja agresividad,**
J. R. Bury, B. A. Cranfield y W. E. Simpson
- 87 **Desarrollos en aislamientos de polietileno reticulado para cables de energía,**
L. A. Dissado, J. C. Fothergill y S. V. Wolfe
- 91 **Dieléctricos para cables submarinos,**
D. L. Walters
- 96 **Diseño de cables de fibras ópticas,**
M. M. Ramsay, J. N. Russell y J. G. Titchmarsh
- 102 **Sensores de fibra óptica,**
G. D. Pitt
- 107 **Dispositivos de efecto Hall para relés y otras aplicaciones,**
A. H. Marchant y G. D. Pitt
- 112 **Ensayos de relajación de tensiones en materiales utilizados para conductores y resortes,**
W. R. George
- 116 **Sistemas de proceso de imagen en la industria fabril,**
I. H. Smith
- 121 **Pantallas de cristal líquido,**
P. W. Ross
- 127 **Película gruesa: materiales y fiabilidad,**
P. W. Graves
- 132 **Conductores polímeros: materiales y aplicaciones del proceso,**
G. L. Ashcroft
- 137 **Tintas de metales no nobles para circuitos híbridos de película gruesa,**
M. Hinoul, W. Vermeirsch y R. Vlaeminck
- 142 **Sustratos de interconexión tipo chipstrato para sistemas electrónicos avanzados,**
M. El Refaie
- 148 **Soldadura a baja temperatura,**
S. Smernos y R. Strauss
- 152 **Componentes semiconductores con encapsulado plástico para sistemas de telecomunicación,**
D. Stroehle
- 157 **Extracción en seco de encapsulantes plásticos mediante quemado en plasma,**
M. E. Holycross y E. J. Saccocio
- 161 **Técnicas de aislamiento para integración a muy gran escala,**
D. Beernaert, G. Schols y P. Van Iseghem
- 167 **Examen con microscopio electrónico de las secciones transversales por fractura de circuitos LSI y VLSI,**
J. Knecht y M. Macari
- 171 **Cerámicas transparentes para aplicaciones electroópticas,**
A. Gutu-Nelle, H. Schichl y J. Springer
- 175 **En este número**



Esta imagen "coloreada", obtenida por un microscopio electrónico, revela las esferulitas de la estructura cristalina del polietileno reticulado. Para el progreso de una extensa gama de tecnologías es esencial estudiar en detalle el comportamiento de los materiales, además de mantener una afanosa búsqueda de nuevas sustancias y técnicas de proceso.

Presentación

El desarrollo y la producción de cualquier componente o sistema descansa sobre una acertada elección de los materiales.

Hace tiempo, ITT comprendió que el conocer los materiales hasta niveles atómicos o moleculares, ya sea en el estado mono o policristalino, semicristalino o amorfo, ayudaba a optimizar sus propiedades con vistas a satisfacer unos determinados requisitos de producto.

Los avances en muchos campos importantes, como la integración en muy gran escala (VLSI), y las fuentes, detectores, fibras y cables ópticos, exigen la formación de equipos multi-especializados, donde químicos, físicos, metalúrgicos y ceramistas aporten sus respectivos conocimientos. Gracias a unos programas de investigación de materiales bien concebidos pueden surgir productos nuevos o perfeccionados, así como reducirse los costes al mejorar los procesos y aparecer otros materiales distintos. La comprensión de los procesos físicos y químicos en cada material puede descubrir posibles causas de envejecimiento, facilitando además la evaluación y mejora de su fiabilidad. Todo ello es de capital importancia en productos tales como los sistemas de conmutación y de transmisión terrestre o submarina, cuya vida útil debe alcanzar los veinticinco años. Por último, el desarrollo de modernas técnicas de fabricación automatizada conduce a una mejor calidad y eleva la producción.

En consecuencia, ITT ha emprendido una extensa serie de programas de evaluación e investigación de materiales en sus laboratorios de Europa y los Estados Unidos, de cuyo trabajo básico se benefician todos los productos de las áreas de telecomunicación y electrónica, componentes y semiconductores, bienes industriales, automoción, consumo y recursos naturales. Varias casas fabricantes han creado, además, centros especializados de investigación y desarrollo en apoyo de sus respectivas líneas de producto.

Este número de Comunicaciones Eléctricas, con diecinueve artículos sobre tecnología de materiales, bosqueja algunas de las numerosas actividades de investigación que en este campo realizan Compañías ITT de todo el mundo, y es un claro exponente del compromiso asumido en el desarrollo y perfeccionamiento de productos, en virtud del cual ITT dedica a la investigación básica de materiales una parte significativa de sus considerables recursos.

Dr. J. Shields
Director
Standard Telecommunication Laboratories Ltd,
Harlow, Inglaterra

Desarrollo de cables no propagadores de llama y de baja agresividad

Una nueva generación de polímeros y de compuestos a base de polímeros para uso en cables eléctricos, ofrece mejores características de resistencia a la iniciación y propagación del fuego, y de reducción en el desprendimiento de humos y de gases tóxicos y corrosivos.

J. R. Bury

B. A. Cranfield

W. E. Simpson

Standard Telecommunication Laboratories Limited, Harlow, Inglaterra

Introducción

Durante los últimos años se ha puesto cada vez más de manifiesto la necesidad de disponer de mejores polímeros no propagadores de llama para hilos, cables y equipos eléctricos asociados. Los primeros trabajos en este campo se dirigieron ante todo a reducir la inflamabilidad y a aumentar la resistencia a la iniciación y propagación del fuego. Los polímeros halogenados y los aditivos halogenados que no propagan la llama demostraron una razonable eficacia. No obstante, va creciendo en los últimos tiempos la preocupación por los gases tóxicos y corrosivos, y muchas veces el denso humo, que desprenden los materiales halogenados al sobrecalentarse o sufrir un incendio. Esto ha conducido a la búsqueda de polímeros denominados "de baja agresividad" y de compuestos que, además de retardar suficientemente la llama, se caractericen por el escaso desprendimiento de humos y gases agresivos cuando se exponen al fuego.

Standard Telecommunication Laboratories (STL) ha tomado parte activa en el desarrollo y caracterización de materiales adecuados para aislamientos y cubiertas.

Materiales para aislamiento

La elección de materiales aislantes para un cable con escaso riesgo de incendios está influenciada por una serie de parámetros a veces contradictorios.

El material debe tener unas características dieléctricas adecuadas. No obstante, la calidad del aislamiento debe ajustarse a la aplicación: una especificación deficiente conduce a unas características no satisfactorias, mientras que una especificación

excesiva puede conducir a un producto innecesariamente caro. Las propiedades físicas y mecánicas son también importantes: los cables e hilos diseñados para uso en ambientes hostiles deben ser capaces de mantener sus características durante muchos años. Finalmente, el material no debe propagar la llama, su comportamiento ha de ser predecible, sin desprender gases agresivos y con mínima producción de humo. Por esta razón, no se consideraron los materiales que contuvieran halógenos en los estudios de STL.

La búsqueda de materiales que cumplieran estas condiciones ha conducido a varios compuestos y polímeros no propagadores de llama y desprovistos de halógenos. En la tabla 1 se resumen sus propiedades fundamentales.

El conjunto de dos parámetros, el índice de oxígeno y el índice de temperatura crítica, da una evaluación cuantitativa del comportamiento ante el fuego. El índice de oxígeno es la mínima concentración de oxígeno, expresada en porcentaje de volumen, en una mezcla circulante con nitrógeno que mantiene la combustión con llama de una muestra de prueba normalizada, en condiciones especificadas. Cuanto mayor sea este porcentaje, menos propagará la llama el material. El índice de temperatura crítica es la temperatura a la cual el índice de oxígeno se reduce a 21 (porcentaje de oxígeno en el aire a temperatura ambiente). La resistencia a la llama normalmente mejora al aumentar el índice de temperatura crítica.

Entre los nuevos materiales probados se encuentran:

- El FR (inhibidor de llama) Sioplas, que es uno de los compuestos basados en elastómeros monómeros de acetato de etileno-vinilo o de etileno-propileno-die-

Prueba en el laboratorio del humo desprendido por materiales.



Tabla 1 — Propiedades fundamentales de los materiales de aislamiento

Material	Suministrador	Peso específico	Índice de oxígeno (%)	Índice de temperatura crítica (°C)	Humo	Carga de rotura por tracción (N mm ⁻²)	Elongación a la rotura (%)	Permitividad relativa	Resistencia a fluir	Máxima temperatura de funcionamiento (°C)	Coste relativo
Polietileno	Diversos	0,92	17	—	Medio	—	—	2,3	Razonable	80	1
FR Sioplas	AEI	1,37	29	280	Poco	10	130	4,2	Buena	100	2
Noryl	GEP	1,06	32	320*	Mucho	45	160	2,6	Razonable	100	4
Arilef	Laporte	1,21	38	230*	Poco	95	140	2,7	Pobre	150	4
Ultem	GEP	1,27	47	330*	Muy poco	120	150	3,1	Buena	200	10
PEEK	ICI	1,30	38	280*	Muy poco	60	250	3,0	Excelente	200	35

* Medido sobre hilo de 0,5 mm de diámetro, aislado con polímero de 0,2 mm de grueso. El polietileno se incluye como punto de comparación.

no, rellenos de alúmina hidratada o un relleno inorgánico similar, que libera agua a temperaturas elevadas.

- El Noryl, basado en un óxido de polifenileno (PPO) modificado y con buenas propiedades eléctricas y mecánicas, pero que desprende humos. STL jugó un papel importante en el desarrollo de este material¹.
- El Arylef, poliéster aromático o poliariolato, adecuado para servicio permanente a temperaturas relativamente elevadas. Sin embargo, su uso está limitado a ambientes con escasa agresividad química.
- El Ultem, una polieterimida, que es un termoplástico amorfo, extruible y de elevado rendimiento, combina la elevada resistencia al calor con la nula propagación de la llama, el escaso desprendimiento de humos, excepcional resistencia a la tracción y módulo de elasticidad, buenas propiedades eléctricas, y resistencia a agentes químicos. El material parece ser especialmente adecuado para ambientes con severas condiciones de funcionamiento.
- El PEEK (polieteretercetona), que es un termoplástico de alto rendimiento, similar en muchos aspectos al Ultem pero muy caro.

Cintas

A menudo es necesario intercalar entre los conductores aislados y la cubierta del cable una cinta aplicada longitudinal o helicoidalmente. Se utilizan cintas a base de polímeros para mantener la geometría del núcleo y para identificación de unidades, y cintas metálicas para el armado protector, apantallamiento eléctrico y protección antihumedad. Los cables destinados a lugares con alto riesgo de incendio necesitan algunas veces una capa que actúe como barrera

antifuego debajo de la cubierta retardante de llama. Los materiales de que actualmente se dispone para formar esta capa no son extruibles, y por ello se aplican en forma de cinta.

Las cintas metálicas, por ejemplo de acero o de aluminio, tienen unas excelentes características como barreras antifuego, pero dan cierta rigidez al conjunto. Si se necesita una mayor flexibilidad, pueden considerarse dos clases de materiales como barrera antifuego:

- Materiales inorgánicos como el amianto o la fibra de vidrio, ambos disponibles en diversas formas, entre ellas la de fibra de vidrio impregnada en mica.
- Materiales orgánicos poliméricos (por ejemplo, poliimidaz y poliamidas), cuya resistencia a altas temperaturas proviene del efecto estabilizador sobre la estructura del polímero de su alto contenido de grupos aromáticos.

STL ha evaluado materiales utilizables para cintas y ha identificado productos aptos para el uso en una amplia gama de cables.

Cubiertas

La cubierta de cable, primera línea de defensa de los conductores aislados, debe ser lo suficientemente fuerte como para resistir los abusos mecánicos durante la instalación y una vez en servicio; en el caso de cables con escaso riesgo de incendio, deben también ser resistentes a la ignición, a la propagación de la llama, y a la generación de humos y de gases tóxicos o corrosivos.

Programa de desarrollo de STL

Dado que ninguno de los nuevos compuestos de polímeros satisfacía enteramente las exigencias de ITT sobre materiales para cubiertas, STL estableció su propio programa de desarrollo. Utilizando STL como materiales de base polímeros comercial-

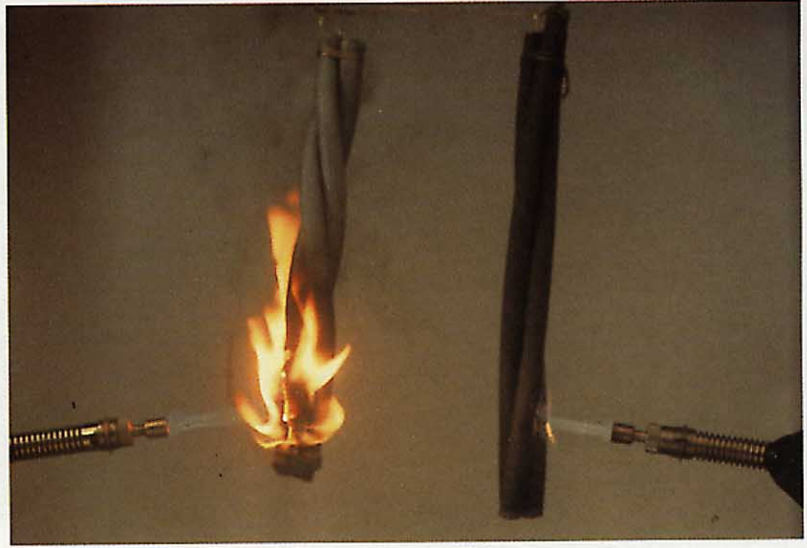
mente disponibles, el programa se dirigió a estudiar si era viable combinar la flexibilidad e integridad mecánica de polímeros baratos con la baja agresividad y no propagación de llama de un relleno adecuado. Se centró la atención en las combinaciones de polímeros elastoméricos y grandes cantidades de relleno. En la tabla 2 se muestran los valores fijados como objetivos para las propiedades fundamentales, con base en las exigencias de varios clientes de ITT.

La adición de un relleno a un polímero normalmente produce cambios en un gran número de propiedades. Especialmente importante en el presente contexto es la reducción de la flexibilidad y extensibilidad del polímero. Seleccionando polímeros capaces de aceptar grandes cantidades de relleno sin degradación drástica de sus propiedades, y utilizándolos solos o mezclados, se han encontrado varios materiales poliméricos de base satisfactorios para el relleno.

Numerosos materiales de relleno disponibles son capaces de transmitir un cierto grado de inhibición al fuego a estos polímeros, descomponiéndose en productos inofensivos cuando se calientan. El seleccionado por STL es alúmina trihidratada, que se utiliza mucho y se encuentra fácilmente, y que libera alrededor del 30% de su peso en forma de agua en el margen de temperaturas de 160 a 260°C. Esta descomposición es endotérmica; además el agua desprendida extingue la ignición e impide la extensión de la llama al absorber calor y desalojar oxígeno. Con el fin de aproximarse a los objetivos marcados para las propiedades fundamentales, se encontró que el porcentaje en peso del material de relleno había de ser al menos del 50%.

El efecto adverso del relleno sobre la extensibilidad del polímero se reduce sustancialmente añadiendo una pequeña concentración de un agente que une las partículas del relleno al polímero base, contribuyendo así a suprimir el desarrollo de fracturas que podrían conducir a fallos precoces durante la extensión. Los compuestos desarrollados por STL emplean un agente de este tipo.

El programa de desarrollo de STL ha producido compuestos para cubiertas de baja agresividad y no propagadores del fuego, cuyas propiedades son superiores a las de los compuestos disponibles comercialmente. La tabla 2 muestra algunas características esenciales de estos materiales, según las medidas realizadas por STL en condiciones idénticas (salvo indicación en contrario). Los materiales generaron al quemarse niveles bajos de humo y de productos agresivos (excepto, desde luego, el PVC inhibidor de fuego).



En la tabla 2 pueden apreciarse los elevados valores del índice de oxígeno en dos de los compuestos de STL. El compuesto F ofrece una gama de propiedades especialmente atractivas, y lo fabrica Standard Telephone and Cables en grandes cantidades para muy diversas aplicaciones de cables.

Un cable con cubierta de material normal (izquierda) se compara en cuanto a inflamabilidad y generación de humo con otro cable que utiliza en cubierta un material con bajo riesgo ante incendios (derecha).

Reticulación

Aunque la reticulación introduce otra etapa más de producción, la formación de enlaces permanentes entre moléculas adyacentes de polímeros tiene varias ventajas: el polímero es menos susceptible al goteo, y por lo tanto es más improbable que propague las llamas; su resistencia a la tracción es mayor, y se incrementa la temperatura de funcionamiento.

Tabla 2 — Propiedades esenciales de los materiales para cubiertas

Compuesto	Peso específico	Índice de oxígeno (%)	Índice de temperatura crítica (°C)	Carga de rotura por tracción (N mm ⁻²)	Elongación a la rotura (%)
Valores fijados como objetivos por STL	—	30	260	10	150
Valores típicos del PVC inhibidor de llama	1,40	32	Desconocido	15	250
Termoplástico A	1,35	28	210	11	150
B	1,40	26	Desconocido	13	500
C	1,50	36	Desconocido	8,5	50
D**	1,60	32	250	9	160
E**	1,59	46	280+	10	140
F**	1,50	40	280	8	250
Reticulado G*	1,40	25	Desconocido	14	190
H*	1,37	29	280	10	130
J**	1,50	40	280+	14	200

* Datos del fabricante. Las condiciones de prueba pueden no ser idénticas a las aplicadas en el resto de la tabla.

** Compuestos desarrollados por STL.

Las últimas tres líneas de la tabla 2 recogen las propiedades de algunos materiales para cubiertas de cables reticulados, de baja agresividad y no propagadores de llama. El compuesto G es la versión reticulada por irradiación del compuesto B. El H, que no se encuentra en forma de termoplástico, se reticula mediante agua caliente o vapor. El compuesto J es una versión peroxidada reticulada del compuesto F.

Aplicaciones en cables

Para el diseñador de cables, lo que más importa es ajustar las características del cable a las exigencias de funcionamiento. Debe elegir materiales cuyo conjunto de propiedades se adapte mejor a la aplicación concreta, evitando así un exceso de ingeniería que encarece el cable y le resta competitividad. Algunas propiedades exigidas al cable pueden imponer en gran medida los materiales a usar, y éstos pueden limitar insuficientemente la propagación de la llama. En este caso hay que obtener una protección adecuada incorporando otras características. No obstante, los cables diseñados para uso en zonas críticas donde se necesita también la integridad eléctrica, deben utilizar los mejores materiales y ser construidos conforme a las normas más estrictas, sin reparar en su coste.

Los materiales estudiados, evaluados y desarrollados por STL, son objeto de promoción en una amplia gama de aplicaciones de comunicación y control en las que importa mucho detener la propagación de la llama: por ejemplo, redes de telecomunicación, transportes masivos, plantas de energía eléctrica, edificios públicos, aplicaciones militares, de minas y marítimas. Cada uno de estos ambientes tiene sus propias exigencias operacionales. El estudio de STL ha determinado la combinación de materiales que da mejores resultados en cada situación.

Conclusiones

Para cumplir las exigencias de los clientes y compañías de ITT en cuanto a empleo de materiales poliméricos de baja agresividad, no propagadores de llama, en aislamientos, cintas y cubiertas de cables de bajo riesgo de incendio, STL ha realizado un amplio trabajo de investigación y desarrollo, incluyendo la evaluación de productos propios.

Se encuentran ya en el mercado los nuevos polímeros y compuestos desarrollados por STL y otras firmas, que suponen un gran avance hacia satisfacer la necesidad de materiales exentos de halógenos. Mientras tanto prosigue el trabajo de desarrollo para mantener la sólida posición de ITT en este terreno.

Referencias

- 1 H. de Munck; J. R. Bury, J. A. Devoldere y W. E. Simpson: A New Non-halogenated Flame Retardant Wire Insulation Based on Polyphenylene Oxide: *Proceedings of the 29th International Wire and Cable Symposium*, Cherry Hill, 18-20 noviembre 1980, págs. 268-278.

J. R. Bury ingresó en STL en 1967 y actualmente trabaja en el desarrollo de nuevos materiales y técnicas para aplicaciones de hilos y cables. Es miembro de la Royal Society of Chemistry, y del Plastic and Rubber Institute.

Brian Cranfield se graduó en 1965 en tecnología química, especialidad de tecnología de polímeros, por el Polytechnic de South Bank. Ingresó en el laboratorio de polímeros de STL al año siguiente, y desde entonces se ha dedicado a la caracterización de las propiedades y estructuras de polímeros, y al desarrollo de nuevos materiales y procesos para aplicaciones de hilos y cables. El Sr. Cranfield es miembro de la Royal Society of Chemistry y del Plastics and Rubber Institute.

Eric Simpson se graduó BSc por la Universidad de Londres en 1940. Tras trabajar en el desarrollo de materiales plásticos, primero con Fairey Aviation Company y más tarde con Micanite and Insulators, ingresó en STL en 1949. Actualmente es el jefe del laboratorio de polímeros, principalmente dedicado a nuevos desarrollos en la aplicación de los polímeros a los cables eléctricos y a los componentes. El Sr. Simpson es miembro de la Royal Society of Chemistry y Fellow del Plastics and Rubber Institute.

Desarrollos en aislamientos de polietileno reticulado para cables de energía

Las investigaciones sobre los mecanismos de degradación que actúan en el polietileno reticulado utilizado como aislante en cables de energía, han adelantado mucho la resolución del problema de la formación de arborescencias debidas al agua.

L. A. Dissado
J. C. Fothergill
S. V. Wolfe

Standard Telecommunication Laboratories
Limited, Harlow, Inglaterra

Introducción

El polietileno, especialmente en su forma reticulada conocida como XLPE, ha demostrado ser por sí mismo un material aislante de alta calidad para cables de energía. No obstante, han aparecido dos tipos de degradación. La primera, por formación de arborescencias debidas a descargas eléctricas, ha sido en gran parte resuelta; la segunda, por formación de arborescencias creadas por el agua (Fig. 1), que afecta a todos los tipos de aislamiento, se investiga actualmente en STL (Standard Telecommunication Laboratories). Se están empleando nuevas técnicas de investigación que implican modificación de la estructura cristalina básica (morfología) del polietileno. Los últimos resultados indican que será posible producir una forma de XLPE resistente a este fenómeno.

El polietileno tiene una elevada rigidez dieléctrica intrínseca (aproximadamente

$8,5 \times 10^8 \text{ V m}^{-1}$, a temperatura ambiente), que resulta muy admisible frente al máximo valor de unos $0,4 \times 10^8 \text{ V m}^{-1}$ de algunos halogenuros alcalinos y al valor récord de $15 \times 10^8 \text{ V m}^{-1}$ del alcohol polivinílico a 77 K. Este factor, unido a su elevada resistividad ($10^{16} \Omega \times \text{cm}$ a 20°C), y bajas pérdidas dieléctricas (típicamente $\text{tg } \delta = 90 \times 10^{-6}$, a 10 MHz y presión atmosférica¹), le hacen probablemente el único material práctico y extruible de aislamiento para modernos cables submarinos de telecomunicación y cables de energía de alta tensión.

Aislamientos de polietileno reticulado

Se produce este material aislante sometiendo el polietileno termoplástico a reticulación, proceso químico similar a la vulcanización del caucho que se produce al tratar los peróxidos con altas temperaturas, uniéndose las cadenas poliméricas adyacentes para formar una red reticulada. No obstante, debido al relativamente pequeño nivel de reticulación utilizado en los cables de energía, la estructura cristalina (morfología), que dicta las propiedades fundamentales del material, permanece prácticamente inalterada.

Las propiedades eléctricas del XLPE son similares o mejores que las ya mencionadas; además, tiene una baja absorción de agua y una buena resistencia a los productos químicos en concentraciones razonables. La reticulación altera las propiedades térmicas del polietileno: como el XLPE no es termoplástico, es considerablemente más resistente a la deformación a altas temperaturas que el polietileno termoplástico natural. En la tabla 1 se dan los valores de algunas de las características del XLPE, comparándolas con las del polietileno natural, cloruro de polivinilo y papel impregnado en aceite.

Figura 1
Arborescencia teñida,
en aislamientos de
alta tensión, produ-
cida por el agua y cam-
pos eléctricos de CA.

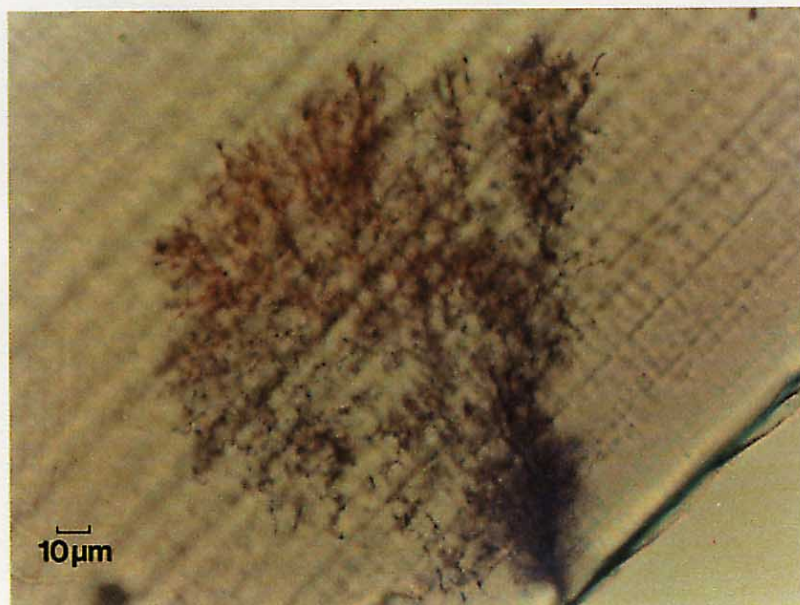
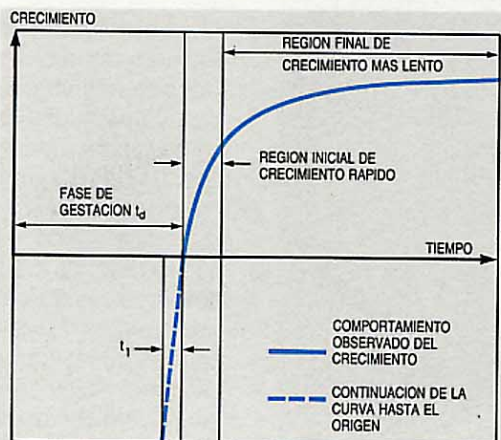


Tabla 1 — Propiedades de diversos tipos de aislamientos de cables

Parámetro	XLPE	Polietileno	Cloruro de polivinilo	Papel impregnado (tipo sólido)
Densidad (kg m ⁻³)	920	920	1300	—
Carga mínima de rotura a la tracción (N mm ⁻²)	12,5	10,0	15,0	—
Alargamiento mínimo en la rotura (%)	200	350	150	—
Constante dieléctrica a 20°C	2,3	2,3	5 a 6	3,6
Factor de potencia a 20°C (%)	0,04	0,02	10	0,3 a 0,5
Resistividad (Ω × cm)	10 ¹⁶	10 ¹⁶	10 ¹⁴	—
Termorresistividad (m°C W ⁻¹)	3,5	3,5	6	6
Máxima temperatura del conductor (°C) permanente en cortocircuito	90 250	65 125	65 125	65 250

El XLPE tiene muchas ventajas sobre el aislamiento tradicional de papel impregnado en aceite. Por ejemplo, los cables están secos y por consiguiente son más fáciles de manejar que los cables con aislamiento de papel durante la terminación, los empalmes y las reparaciones. Además, los cables de XLPE son ligeros, flexibles, capaces de transportar altas corrientes, y pueden ser sometidos a una carga de emergencia durante un periodo de tiempo relativamente largo. Por ser sólido el aislamiento, los cables resisten bien las vibraciones. El polietileno es también ideal para un proceso de producción continuo en el que puede extruirse directamente sobre el conductor en movimiento, en contraste con el papel impregnado en aceite, convencional, que no puede utilizarse con métodos de producción continuos. (No obstante, debe indicarse que los cables con papel impregnado en aceite tienen un excelente historial, habiendo muchos permanecido en servicio durante más de 50 años).

Figura 2 Fases del crecimiento de la arborescencia por agua: a) fase de gestación, b) fase de crecimiento rápido, y c) fase de crecimiento más lento con bifurcación.



Degradación arborescente por descargas eléctricas

Las burbujas e impurezas existentes en el aislamiento provocan descargas al aplicarse un fuerte campo eléctrico. Estas descargas parciales producen un calentamiento y una rápida degradación localizados que conducen a una descarga disruptiva, durante la cual aparecen canales o surcos en una formación de tipo arborescente. La mayoría de los problemas causados por estas arborescencias han sido resueltos utilizando refinadas técnicas de extrusión que eliminan las burbujas y las impurezas. Dichas técnicas mantienen elevadas presiones sobre el aislamiento durante los procesos de alta temperatura, en los que podrían crear burbujas los productos volátiles de la reacción de reticulación. Además, para eliminar burbujas e imperfecciones en las uniones aislamiento/conductor que ocasionarían altos campos localizados, se extruyen sobre el aislamiento, mediante una cabeza de extrusión triple, "blindajes" poliméricos con propiedades conductoras.

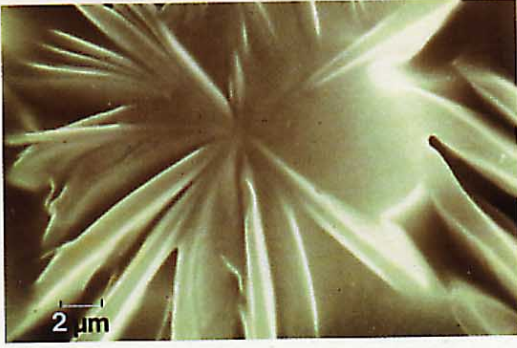
Además de estas mejoras en el proceso de fabricación del cable, se ha encontrado que la incorporación de materiales orgánicos (por ejemplo, acetofenona) inhibe la formación de arborescencias debidas a descargas eléctricas al terminar las reacciones de ionización necesarias para su crecimiento.

Degradación arborescente por agua

Otra forma de degradación, conocida como arborescencia por agua, es común a todos los aislamientos de cables de energía. Aunque este fenómeno fuese conocido desde hace muchos años, se pensó que el aislamiento de XLPE no sería especialmente susceptible dada su baja permeabilidad al agua; no obstante, se vio que esto no era cierto. Sin embargo, las investigaciones recientes indican que el XLPE puede modificarse de forma que se reduzcan al mínimo los efectos de arborescencias originadas por agua.

Estas arborescencias son formaciones difusas con aspecto de árbol (Fig. 1) que crecen dentro del aislamiento de los cables de alta tensión en presencia de agua y de los campos eléctricos alternos de la operación normal. La aparición de arborescencias evidencia visualmente la degradación física en los aislamientos de XLPE que antecede a la descarga disruptiva, muy común al cabo de unos 12 años de servicio.

La producción de arborescencias por agua es la primera etapa de degradación del aislamiento cuando penetra agua o electrolito.



to en el interior del XLPE. Este deterioro de bajo nivel conduce finalmente a la aparición de arborescencias por descarga eléctrica, en las que la ruptura de los enlaces químicos provoca la formación de canales permanentes. La fase final es la perforación total del dieléctrico, disminuyendo la rigidez dieléctrica a medida que crece la longitud de la arborescencia por agua².

Las investigaciones habían identificado anteriormente muchas de las características básicas de las arborescencias por agua, pero sin revelar el mecanismo físico de formación de las mismas³. Desde entonces se han desarrollado técnicas para teñir tales arborescencias con un colorante orgánico y atacar químicamente las regiones amorfas del XLPE a fin de descubrir la estructura cristalina⁴.

En su aspecto, las arborescencias por agua son normalmente muy pobladas, partiendo a menudo de un corto tronco central y después dividiéndose en apéndices separados, sin ramificaciones. Esta tosca estructura de árbol puede asociarse a tres fases diferentes de formación de la arborescencia (Fig. 2)². Una fase de gestación, caracterizada por el tiempo de iniciación o retardo (t_d) durante el cual el crecimiento está restringido al corto tronco (o microarborescencia). A esta fase le sigue otra de crecimiento rápido⁵, cuya progresión inicial está caracterizada por el parámetro t_i . Finalmente se produce una fase de crecimiento más lento, en la que se bifurcan las arborescencias^{2,5}.

Recientemente se ha sugerido que la morfología del polímero juega un papel importante en el crecimiento de las arborescencias por agua. La morfología normal del polietileno consiste en esferulitas que comprenden conjuntos de cristales en forma de cinta dispuestos radialmente (Fig. 3). Las arborescencias por agua generalmente se inician en la superficie del XLPE, donde la morfología esferulítica normal da lugar a cristallitos alargados, en cuyas zonas de unión dentro del aislamiento se crean caminos en forma de agujas (Fig. 4) como resultado de la gran densidad de puntos de nucleación en esta región. La

penetración en la superficie transporta el electrolito a lo largo de las regiones con mayor campo eléctrico, necesario para el crecimiento de la arborescencia, y probablemente determina el mecanismo de gestación, puesto que no se observa retardo cuando los puntos de nucleación se crean artificialmente.

El crecimiento de la arborescencia por agua, tanto en la rápida fase inicial como en la fase siguiente más lenta (Fig. 5), parece progresar, en contraste con las arborescencias por descarga eléctrica, en las regiones entre esferulitas, donde existen concentraciones de esfuerzos locales y microburbujas que contribuyen al mecanismo físico de extensión de la arborescencia. El camino de la arborescencia por agua está marcado por pequeños hoyos con una densidad mucho mayor que el polímero de los alrededores (Fig. 6). Por consiguiente, debe poderse

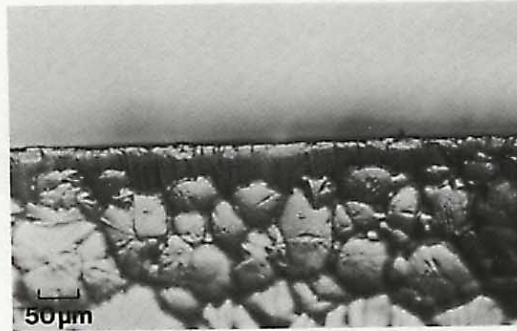


Figura 4
Caminos en forma de agujas en el aislamiento producidos por cristallitos alargados.

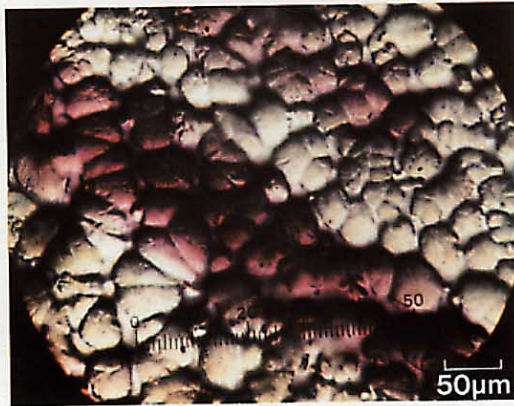


Figura 5
Ramificación de una arborescencia por agua, que progresa a través de las regiones entre esferulitas durante la fase inicial de crecimiento rápido y la subsiguiente de crecimiento más lento.

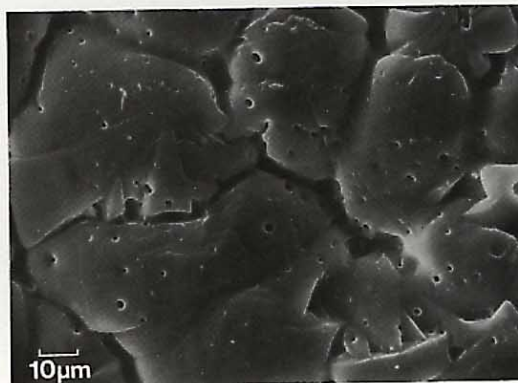


Figura 6
Superficies de esferulitas con hoyos, dentro de una arborescencia por agua.

retardar la formación de arborescencias eliminando las microburbujas entre esferulitas.

La fase final de crecimiento ha sido atribuida a fluctuaciones estructurales^{2,6}, que producen regiones con altos campos locales en diversos puntos de la superficie de la arborescencia por agua. Tales fluctuaciones pueden ser debidas a variaciones en la estructura esferulítica en la región de bifurcación.

Ciertas modificaciones del aislamiento de polietileno han mejorado ya considerablemente las características. No obstante, observando la formación de las arborescencias por agua, se aprecia que nuevos cambios en la estructura pueden mejorar sustancialmente los cables actuales. Una estructura ideal podría presentar una región de transición menos brusca entre cristalitas, que diera paso gradualmente a una estructura esferulítica uniforme global, en la cual las burbujas ya no se interconectarán. Tal estructura uniforme reduciría también la amplitud de las fluctuaciones estructurales locales, origen de zonas de campos intensos.

Todas estas modificaciones estructurales deben, no obstante, mantener la resistencia del XLPE a daños materiales, que por sí mismos puedan formar puntos de iniciación de arborescencias.

Conclusiones

La evaluación y modificación de la morfología del XLPE es un nuevo campo de investigación, especialmente apropiado para resolver el problema de la degradación del aislamiento de cables de energía por formación de arborescencias debidas al agua. Este enfoque proporciona una mejor idea de los mecanismos físicos de la formación y prevención de arborescencias por agua que la conseguida en el pasado con otras técnicas.

El trabajo experimental básico llevado a cabo por STL producirá mejores aislamientos poliméricos, lo cual en definitiva prolongará el tiempo de servicio de los cables.

Referencias

- 1 D. L. Walters: Dieléctricos para cables submarinos: *Comunicaciones Eléctricas*, 1982, volumen 57, n° 2, págs. 91–95 (en este número).
- 2 L. A. Dissado, J. C. Fothergill y S. V. Wolfe: A Preliminary Investigation into Treeing, Morphology and the Electrical Properties of Polymers, *1981 Annual Report of the Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Whitehaven, 26–28 octubre 1981, págs. 264–277.
- 3 S. L. Nunes y M. T. Shaw: Water Treeing in Polyethylene — A Review of Mechanisms: *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Electrical Insulation*, diciembre 1980, volumen EI-15, n° 6, págs. 437–450.
- 4 S. R. Barnes: Morphology of Crosslinked Polyethylene: *Polymer*, julio 1980, volumen 21, n° 7, págs. 723–725.
- 5 L. A. Dissado: Characterisation of the Growth of Water Trees: A publicar en *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Electrical Insulation*, octubre 1982.
- 6 R. M. Hill, L. A. Dissado y R. Jackson: The Examination of Correlated Noise: *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 30 septiembre 1981, volumen 14, n° 27, págs. 3915–3926.

L. A. Dissado nació en St. Helens, Inglaterra. Estudió química en el University College, Londres, donde obtuvo en 1963 un grado BSc y más tarde un PhD en química teórica. Ha trabajado en la Australian National University como Research Fellow (becario de investigación) y en el UK Atomic Research Establishment, Harwell. En 1977 se incorporó al grupo de dieléctricos del Chelsea College, Londres. El Dr. Dissado fue nombrado consultor de STL en 1981 para trabajar en problemas de degradación de aislamientos.

J. C. Fothergill nació en Malta. Recibió en 1975 un grado de especialización en ingeniería eléctrica por la Universidad de Gales, en 1976 un MSc en materiales y dispositivos electrónicos, y en 1980 un PhD en propiedades electrónicas de los polímeros. El Dr. Fothergill es un ingeniero senior de investigación en el grupo de polímeros de STL, donde trabaja sobre aislamientos de cables de energía de alta tensión.

S. V. Wolfe nació en Londres. Ingresó en STC en 1970 para trabajar en desarrollos generales de cables. En 1976 recibió un grado de especialización en ciencias de materiales por el Thames Polytechnic. Trabajó en STL durante un corto periodo de tiempo adicional y después estuvo 3 años en el Queen Mary College, Universidad de Londres, dedicada a investigar sobre cristalización de polímeros, para obtener su PhD. Regresó a STL en 1980 como ingeniero senior de investigación, en el grupo de polímeros.

Dieléctricos para cables submarinos

La exigencia de una fiabilidad y una estabilidad precisas es primordial en los materiales dieléctricos para sistemas de cables submarinos. Por tanto es vital la realización de amplias pruebas que proporcionen un conocimiento detallado de sus propiedades eléctricas, en especial de la permitividad y del ángulo de pérdidas.

D. L. Walters

Standard Telecommunication Laboratories Limited, Harlow, Inglaterra

Introducción

Los actuales sistemas telefónicos por cable submarino funcionan a frecuencias que llegan a 45 MHz, utilizando transmisión analógica a través de cables coaxiales con repetidores¹, y proporcionan hasta 5520 canales telefónicos ajustados a las recomendaciones del CCITT.

Como la reparación es costosa, tanto por el esfuerzo como por los ingresos perdidos, los sistemas se diseñan para un periodo de vida superior a 20 años. Esto implica que las normas de fiabilidad, estabilidad y calidad han de ser más rigurosas que en casi todos los demás sistemas de comunicaciones. En consecuencia, a los dieléctricos utilizados en estos cables se les aplican severas exigencias. Por ello, se han realizado en STL amplias investigaciones de las propiedades eléctricas de tales materiales para determinar los más adecuados a esta aplicación concreta. Estos materiales son fabricados por industrias petroquímicas pero ITT, como usuario, tiene que decidir cuál de los materiales disponibles es el más apropiado para una aplicación específica.

Hasta la fecha las medidas se han orientado sobre todo a dieléctricos para cables coaxiales convencionales, pero el rápido desarrollo de cables submarinos de fibra óptica² ha iniciado los trabajos sobre aislamientos de tales tipos de cables. En esta aplicación las exigencias son radicalmente diferentes, pero de la misma precisión.

Exigencias del dieléctrico

Características de transmisión

La atenuación α por unidad de longitud de cable coaxial viene dada por

$$\alpha = A \epsilon^{1/2} (B f^{1/2} + 2 \pi f \delta), \quad (1)$$

donde A es una constante, B es un término que tiene en cuenta las dimensiones y las conductividades de los conductores, y f es

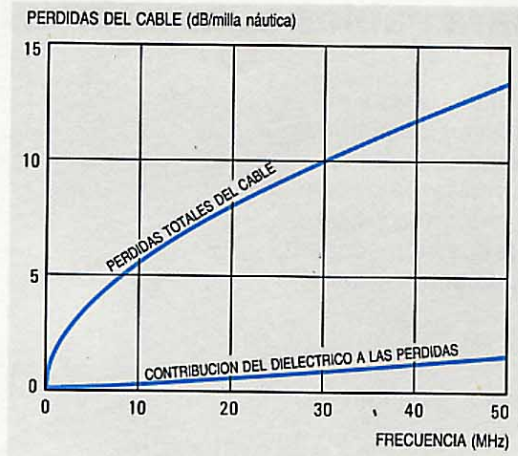
la frecuencia. Los otros términos son propiedades del dieléctrico: ϵ es la permitividad relativa, y δ es el ángulo de pérdidas o factor de potencia (realmente es $\sin \delta$, pero como δ es muy pequeño, $\sin \delta \approx \delta \approx \tan \delta$.)

El diámetro exterior del cable se elige tras considerar los costes del material y las necesidades de manejo mecánico. Para un diámetro exterior dado, es deseable que la atenuación del cable sea lo más baja posible. Igualmente importante es que la atenuación del cable sea estable a lo largo de toda la vida del mismo, puesto que cualquier cambio que sobrepase las estrechas tolerancias creará severos problemas al sistema.

La ecuación (1) muestra que la atenuación es proporcional a $\epsilon^{1/2}$, y por consiguiente debe utilizarse un material de baja permitividad. En cuanto a la estabilidad, un cambio de 20 dB en la atenuación a 45 MHz en un sistema de 3000 millas náuticas de longitud, cuya atenuación total es de unos 4×10^4 dB, presentaría serios problemas de compensación, y podría producirse por un cambio en la permitividad de sólo un 0,1%. Por consiguiente, es esencial un material que sea altamente estable en el medio ambiente de trabajo.

No obstante, en la práctica, la contribución del ángulo de pérdidas δ a la atenuación del cable produce los problemas mayores. Aunque a frecuencias de 45 MHz e inferiores, y para los valores prácticos de δ , el dieléctrico origina sólo un pequeño porcentaje de las pérdidas totales del cable, la figura 1 muestra que su efecto es significativo y se hace mayor a medida que crece la frecuencia. Ello se debe a que la contribución del ángulo de pérdidas es proporcional a la frecuencia y a que el propio ángulo en cuestión aumenta con la frecuencia. La importancia de las pérdidas del dieléctrico se aprecia si consideramos un cable de 3500 millas náuticas, cuyas pérdidas en el dieléctrico podrían ser típicamente de 40 dB a 45 MHz (equivalente a un repetidor)

Figura 1
Características de pérdidas de un cable submarino de 37,3 mm (1,47 pulgadas).



por cada μrad del ángulo de pérdidas. De esta forma se pueden conseguir importantes ahorros en el coste de los repetidores de sistemas largos, reduciendo las pérdidas del dieléctrico. Además, la estabilidad del ángulo de pérdidas es importante porque una variación de $1 \mu\text{rad}$ (que sólo se puede resolver en el laboratorio) altera en 40 dB las pérdidas totales de un sistema transoceánico.

Características del aislamiento

La alimentación en CC de los repetidores se realiza por el conductor central del cable, produciéndose el retorno a través de la tierra submarina. En sistemas con un gran número de repetidores, la tensión continua en el conductor central en las proximidades de los extremos terrestres puede llegar a 12 kV, con tensiones aún mayores en el caso de ciertas averías. Estas tensiones producen campos que alcanzan $1,9 \text{ kV mm}^{-1}$ en el cable submarino de 37,3 mm (1,47 pulgadas); en los cables terminales de pequeño diámetro que atraviesan la caja de alta presión en cada repetidor, los campos pueden alcanzar valores de unos $8,5 \text{ kV mm}^{-1}$.

Mientras que la mayoría de los materiales dieléctricos pueden soportar estos campos indefinidamente sin ruptura (la rigidez dieléctrica intrínseca del polietileno suele alcanzar 500 kV mm^{-1}), dos fenómenos en alta tensión pueden crear problemas en los sistemas submarinos: la interacción a largo plazo del agua con el dieléctrico sometido a carga eléctrica, y las descargas parciales.

En la práctica, la descarga disruptiva como resultado de la entrada de agua ha ocurrido sólo en muy raras ocasiones, e incluso en este caso tras daños mecánicos. Las simulaciones en el laboratorio del fallo del cable han mostrado que la ruptura total puede suceder bastante tiempo después de producido el daño.

Cuando se aplica un campo eléctrico a un aislante, en el material se originan pequeñas

descargas con campos muy inferiores a los necesarios para producir una ruptura dieléctrica total. Este fenómeno es importante en cables coaxiales que llevan también alimentación en continua, puesto que las descargas pueden degradar la transmisión al introducir impulsos en la vía de tráfico. Una descarga de sólo unos 40 pC en las proximidades de las entradas de los amplificadores produciría impulsos fuera de los márgenes autorizados por el CCITT.

Propiedades de los dieléctricos en altas frecuencias

Todos los modernos dieléctricos sólidos para cables son del tipo de plásticos extruidos. Las exigencias de los cables submarinos, en especial la necesidad de una baja permitividad, implican que sólo pueda pensarse en las poliolefinas para esta aplicación. Las dos poliolefinas más comunes son el polietileno y el polipropileno. El coste y la facilidad de manejo dan lugar a que, en la práctica, el dieléctrico de un cable submarino sea siempre uno de estos dos materiales o una mezcla de ambos. Estos dos nombres cubren, sin embargo, una amplia gama de materiales que varían con respecto al grado de polimerización, grado de insaturación o número de radicales libres, y aditivos tales como antioxidantes, todo lo cual afecta a la densidad y al grado de polarización del material y por consiguiente a su permitividad relativa. La permitividad de estos materiales varía entre 2,2 y 2,4 y es estable durante largos periodos de tiempo, incluso aunque el grado de cristalinidad de los materiales cambie ligeramente.

Debido a la complejidad de las interacciones entre las moléculas de los diversos compuestos de un polímero, hasta el momento no se ha podido predecir teóricamente las propiedades del dieléctrico. En consecuencia, hay que medir con precisión las propiedades dieléctricas de los aislantes de cables a las frecuencias de transmisión. También deben simularse y medirse los efectos de los medios ambientes de fabricación y de operación. La experiencia ha mostrado que el ángulo de pérdidas puede variar considerablemente, y se han desarrollado técnicas para medir con exactitud este parámetro en radiofrecuencias.

Medidas en radiofrecuencias

La permitividad se determina midiendo la capacidad de una muestra de material de geometría conocida. A veces se necesita una resolución de cinco cifras significativas; ello requiere un método de sustitución en el que se registra el cambio en la frecuencia de resonancia de un circuito L-C-R cuando el dieléctrico del condensador se sustituye total o parcialmente por el material en prueba.

Las pérdidas de los dieléctricos de cables sólo pueden medirse a frecuencias concretas utilizando una técnica de sustitución de resonancia^{3,4}. En este método se mide el cambio en la amplitud de resonancia, o factor Q del circuito, cuando un condensador, situado en el circuito L-C-R que contiene la muestra, se sustituye por un condensador con dieléctrico aire (pérdidas nulas) de la misma capacidad. STL ha estado utilizando esta técnica durante algunos años, obteniendo resultados con precisión absoluta superior a 1 μ rad (Figs. 2a y 2b).

La figura 2a muestra las curvas pérdidas/frecuencia para dos polietilenos utilizados como dieléctricos de cables. El polietileno con menores pérdidas es el más caro y el más difícil de fabricar, pero su utilización puede resultar conveniente en sistemas de alta frecuencia con elevados costes de repetidores. La figura 2b muestra el cambio en las pérdidas del polietileno tras de exponer este material de bajas pérdidas al agua del mar durante periodos de tiempo diferentes, y subraya la necesidad de mantener seco el dieléctrico del cable.

Por desgracia este equipo sólo puede medir placas de un diámetro y grosor fijos (2 mm). Sería interesante el medir las propiedades dieléctricas (especialmente pérdidas) de un trozo corto del cable real, lo que permitiría determinar los efectos de la fabricación y de las condiciones de servicio sin necesidad de remoldeo que pueda cambiar o destruir estos efectos. Se ha construido y se utiliza ya en STL un instrumento adecuado para este fin: permite medir las pérdidas dieléctricas de muestras de cable de 0,5 m de longitud con una precisión comparable a la del equipo anterior. Para ello utiliza un conmutador operado en vacío, de contactos de oro y escasas pérdidas, que conecta una bobina de alto Q en serie, bien con la muestra o con un condensador de dieléctrico de aire. Los parámetros críticos del circuito se miden automáticamente para estas dos configuraciones, deduciendo el valor del ángulo de pérdidas de estas mediciones como se describe a continuación. La figura 3 esquematiza este equipo.

A frecuencias altas, la longitud de la muestra de cable es una fracción significativa (y medible) de la longitud de onda de la señal; los parámetros del circuito no están, pues, concentrados sino distribuidos de un modo conocido. En consecuencia, la medida del *ángulo efectivo de pérdidas* por dos métodos distintos — $\Delta(1/Q)$ y diferencia de amplitud de resonancia — da unos resultados en los que los dos parámetros desconocidos (ángulo de pérdidas dieléctricas y resistencia de contacto) contribuyen de

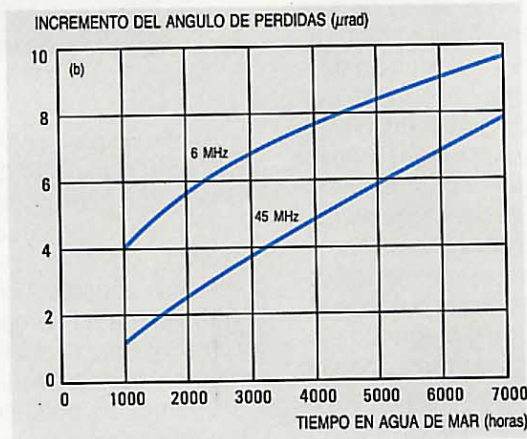
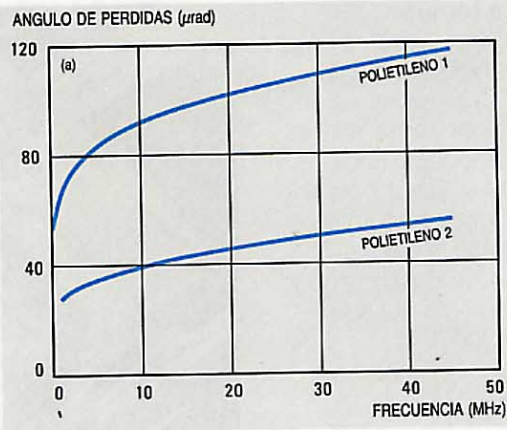


Figura 2
Ángulo de pérdidas de polietilenos para cables submarinos: a) en función de la frecuencia, b) incremento tras la exposición al agua del mar.

forma diferente⁵. A bajas frecuencias (1 a 5 MHz), en las que el circuito es concentrado más bien que distribuido, la resistencia de contacto es pequeña comparada con la reactancia del cable aunque, si es necesario, puede aún ser extrapolada a partir de los valores a altas frecuencias. Se puede obtener, por consiguiente, una buena resolución para todo el margen de frecuencias de interés (1 a 45 MHz).

Además de medir muestras completas de cable, el equipo puede medir las pérdidas de cualquier estructura coaxial con una capacidad del orden de 50 pF, permitiendo determinar la distribución radial de las pérdidas en un cable fabricado.

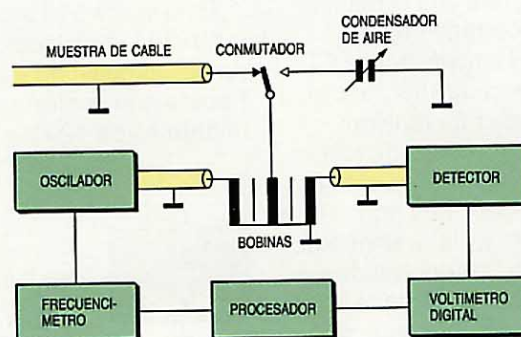


Figura 3
Principio del equipo de STL utilizado para medir los parámetros dieléctricos de un corto trozo de cable real.

Descarga parcial en alta tensión

Se ha realizado un intenso estudio de las descargas parciales en CC en regiones de alta tensión a fin de identificar zonas en las que pudieran producirse impulsos de ionización con la magnitud suficiente para degradar la transmisión digital, y de investigar cualquier relación posible entre las características de las descargas parciales y el comportamiento a largo plazo del aislamiento.

Mecanismo de la descarga

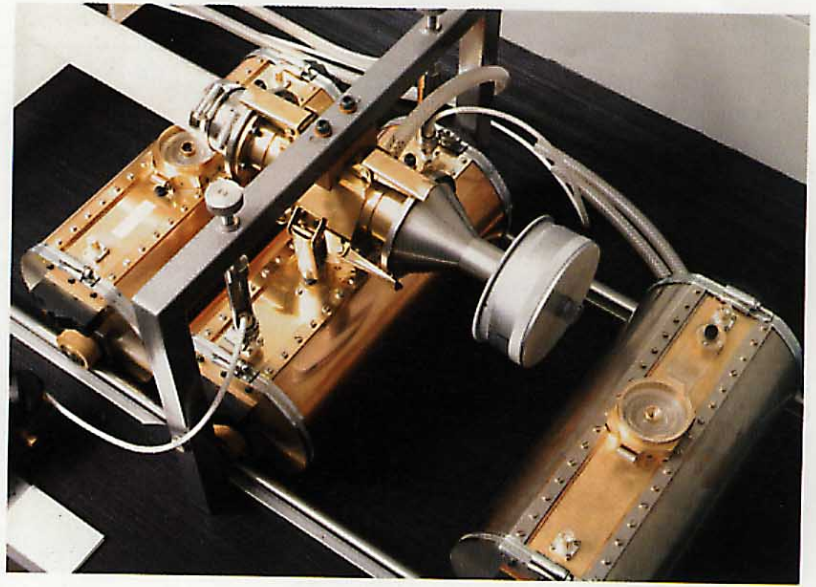
Un modelo de posible mecanismo de la descarga parcial en CC es el oscilador de relajación, el cual postula que el dieléctrico contiene una o más burbujas llenas de aire. Cuando se aplica una tensión continua a través del material, se crea una tensión en la burbuja con una "constante" de tiempo que depende de la resistencia global del dieléctrico y de la capacidad de la burbuja. Cuando esta tensión alcanza un valor crítico, el aire de la burbuja produce una descarga disruptiva (el campo necesario para ello es de unos 3 kV mm^{-1}) y el proceso comienza de nuevo. No obstante, este modelo predice descargas regulares de igual magnitud que no se observan en la práctica, quizás debido a que la resistencia global de las poliolefinas depende ella misma del tiempo.

Otro modelo teórico de la descarga nace de considerarla como un realineamiento coordinado de dipolos. Se necesita una gran coordinación para producir una descarga significativa: las descargas observadas se encuentran entre 0,5 y 100 pC (1 pC son 6,25 millones de electrones). Sin embargo, este modelo es preferido por algunos teóricos.

Al igual que con las propiedades a altas frecuencias, muy poco puede deducirse o predecirse teóricamente sobre las descargas parciales u otras propiedades a altas tensiones. Es esencial, pues, la calificación del fenómeno mediante experimentos.

Medidas de descargas parciales

La figura 4 muestra el equipo utilizado para las medidas de descargas parciales en CC. Las descargas producen señales extremadamente pequeñas, de forma que el equipo completo ha de estar encerrado en una habitación apantallada. El amplificador FET sensible a la carga, con entrada integradora, produce a la salida impulsos de tensión proporcionales a la magnitud de la descarga. A continuación, cada impulso es clasificado de acuerdo con su magnitud por medio del analizador multicanal, y asignado a uno de los 256 canales. Los contenidos de estos canales se almacenan en cinta por el ordenador a intervalos de una hora, lo



cual ofrece para cada muestra un registro de la frecuencia de descarga en cada uno de los 256 diferentes niveles.

Los resultados han mostrado que, como podía suponerse, las descargas parciales son más acusadas con campos elevados. También se ha comprobado que, para un *campo global* dado, las descargas se incrementan si el electrodo exterior está unido al dieléctrico de polietileno mediante moldeo por inyección. La retirada del electrodo metálico o del moldeo por inyección reduce considerablemente la descarga, lo cual demuestra que fundamentalmente es un fenómeno interfacial. Esto implica que la descarga parcial es más probable en el casquillo de estanquidad de la tapa del repetidor, por donde el cable atraviesa la caja de alta presión; ello se ha confirmado mediante medidas.

La mayoría de los experimentos de descargas parciales se han realizado sobre modelos de estos casquillos de estanquidad de alta presión. Los resultados indican que ocurre una cantidad relativamente grande de descargas durante un corto periodo de tiempo (alrededor de una hora) tras la aplicación de la tensión continua, pero que luego se establece una frecuencia de descarga residual, generalmente no variable en el tiempo.

En la figura 5 se muestra cómo varían con la tensión las descargas parciales en un típico casquillo de estanquidad de la tapa. Puesto que la máxima tensión de funcionamiento es de 12 kV y la mínima descarga

Equipo desarrollado por STL para la medida de propiedades dieléctricas en muestras de cables. Pueden verse la muestra de cable, el condensador de aire (ajustable por micrómetro) y dos bobinas. El conmutador operado en vacío se encuentra entre el cable y el condensador situado encima de la bobina.

Figura 4
Equipo utilizado para las medidas de descargas parciales en CC.



significativa, de 40 pC, este diseño de casquillo da un considerable margen de seguridad para el ruido impulsivo.

Dieléctricos en sistemas futuros

Desde la introducción de los cables telefónicos submarinos con repetidores en los años 50 se ha utilizado transmisión analógica, incrementándose el número de canales al elevarse la frecuencia máxima de transmisión hasta el valor actual de 45 MHz. Se espera que el número de canales siga aumentando en el futuro, y hasta mediados de los 70 se aceptó que ello se verificaría mediante la utilización de frecuencias más elevadas, e imponiéndose condiciones aún más exigentes a las características funcionales de los dieléctricos a frecuencias altas. Para ello se han considerado ya algunos nuevos materiales a base de poliolefinas⁶.

La aparición de las comunicaciones por fibras ópticas ha transformado radicalmente la situación. Los comportamientos en altas frecuencias y ante descargas parciales ya no son por sí mismos exigencias importantes, y en cambio se necesitan buenas características de aislamiento al mínimo coste, resistencia a la degradación por agua de mar en un campo de CC, y una buena resistencia a la abrasión.

Se prepara actualmente en STL un programa que determine el material óptimo para el aislamiento de cables ópticos. Los conocimientos y experiencia obtenidos del trabajo sobre dieléctricos en cables coaxiales y cables de energía deben hacer que este programa progrese rápidamente, ayudando así a mantener el liderazgo mundial de Standard Telephones and Cables en comunicaciones submarinas.

Referencias

- 1 A. J. Bennett y T. Oswald: Sistema de cable submarino NG-1: Diseño y planificación: *Comunicaciones Eléctricas*, 1978, volumen 53, nº 2, págs. 122–126.
- 2 P. Worthington: Application of Optical Fibre System in Underwater Service: *Proceedings of the International Conference on Submarine Telecommunication Systems*, Londres, 26–29 febrero 1980, Institution of

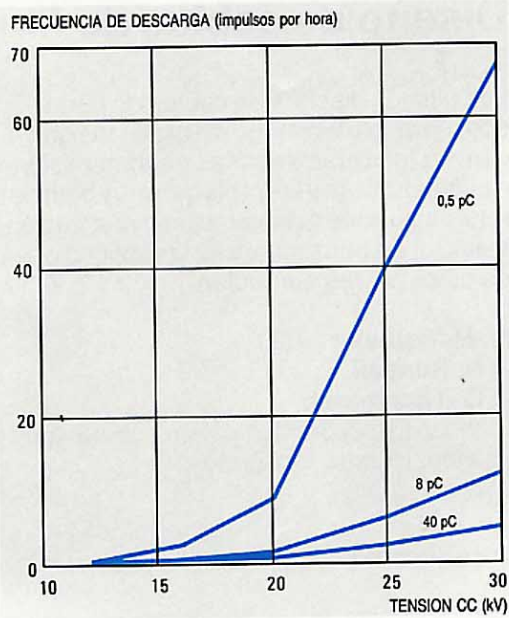


Figura 5
Variación de las descargas con la tensión en un casquillo de estanquidad de un repetidor.

Electrical Engineers Conference Publication nº 183, 1980, págs. 156–160.

- 3 L. Hartshorn y W. H. Ward: The Measurement of the Permittivity and Power Factor of Dielectrics at Frequencies from 10^4 to 10^9 Cycles Per Second: *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, noviembre 1936, volumen 79, nº 479, págs. 597–609.
- 4 W. Reddish, A. Bishop, K. A. Buckingham y P. J. Hyde: Precise Measurement of Dielectric Properties at Radio Frequencies: *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, enero 1971, volumen 118, nº 1, págs. 255–265.
- 5 D. L. Walters: A Technique for the Measurement of Dielectric Loss of Polyethylene Insulated Coaxial Cable: *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Amherst, 17–19 octubre 1982.
- 6 K. A. Buckingham: Dielectrics For Use Above 100 MHz in Submarine Telephone Cables: *Proceedings of the International Conference, Plastics in Telecommunication II*, Londres, 18–20 diciembre 1978, págs. 17/1–17/17.

David L. Walters nació en Merthyr Tydfil, Gales del Sur. Se graduó en físicas en 1971 por la Universidad de Cambridge, y a continuación ingresó en la división de sistemas submarinos de STC. Tras haber trabajado en diferentes aspectos de sistemas de transmisión por cable en STC y en Philips, ingresó en el laboratorio de materiales de STL, donde ahora trabaja como ingeniero senior de investigación en la división de ingeniería y desarrollo de cables.

Diseño de cables de fibras ópticas

Los últimos diseños de cables de fibras ópticas sólo afectan en un grado insignificante a las características de transmisión de dichas fibras y las protegen muy bien de roturas durante la instalación y una vez en servicio. En consecuencia, las aplicaciones de estos cables aumentan.

M. M. Ramsay

J. N. Russell

J. G. Titchmarsh

Standard Telecommunication Laboratories Limited, Harlow, Inglaterra

Introducción

Las fibras ópticas son frágiles en sí, y es necesario cablearlas para que resistan la instalación y los ambientes, a menudo hostiles, en los que deben trabajar de modo fiable. Los ambientes de trabajo varían desde los 4°C prácticamente constantes de los fondos submarinos, hasta los -55 a +155°C que se encuentran en algunas aplicaciones aéreas. Un cable puede contener desde una sola fibra óptica ("cableado" de bastidores) hasta las 4.000 propuestas para la red de distribución local Bigfon del Deutsche Bundespost.

Aunque para atender exigencias tan distintas haya que recurrir a cables de diversos diseños, todos los cables de fibras ópticas deben responder a dos criterios básicos. Primero, no deben degradar de modo apreciable las propiedades de transmisión de la fibra. Segundo, deben proteger la fibra de roturas durante la fabricación, la instalación y el servicio. Estas dos exigencias se discuten en este artículo en relación

con un cable diseñado en STL (Standard Telecommunication Laboratories) y desarrollado en cooperación con Standard Telephones and Cables, para tendido por canalizaciones enterradas (Fig. 1).

Incrementos de la atenuación

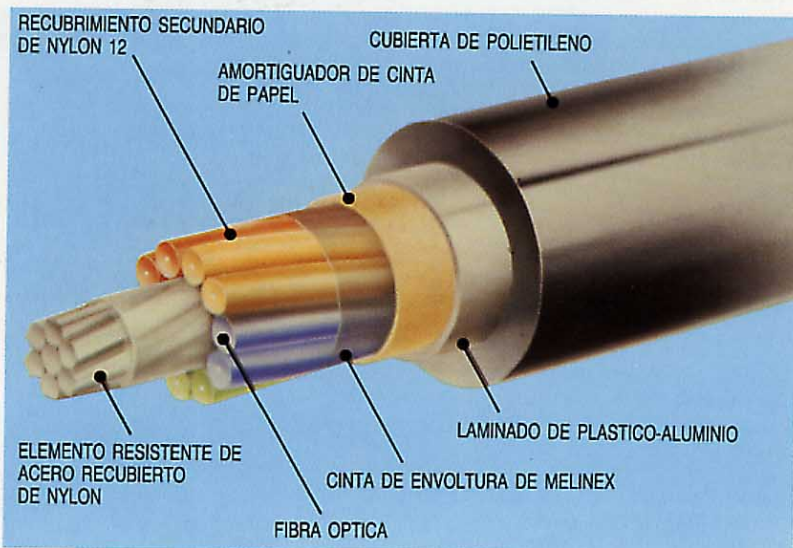
Aunque ya a principios de este siglo¹ se estudiara el guiado de luz o de radiaciones electromagnéticas de mayores longitudes de onda a través de guíaondas dieléctricos, no pudo llevarse a la práctica tal guiado hasta la invención² del guíaonda con envoltura en 1954. Una envoltura suficientemente gruesa y que tenga un índice de refracción ligeramente inferior al del núcleo asegura que cualquier campo "evanescente" procedente de la energía guiada se amortigua hasta valores despreciables en la superficie de la guía compuesta, de forma que la guía pueda estar justificada sin incurrir en pérdidas prohibitivas.

Sin embargo, a pesar del enorme avance que representó este invento, el problema de incluir en cable tales guíaondas o fibras ópticas sin incrementar su atenuación, no fue en absoluto resuelto. Todos los guíaondas dieléctricos radian, a menos que su eje esté en línea recta. La radiación depende críticamente del radio de curvatura y crece con rapidez desde valores totalmente despreciables hasta valores prohibitivos. Por ello debe dedicarse una especial atención, tanto a los radios de curvatura previstos en el cable terminado como a cualquier *microcurva* que pueda producirse al presionar la fibra con cualquier superficie rugosa dentro de la estructura del cable.

Radiación en las curvas

Puede obtenerse una imagen cualitativa de la radiación en las curvas al considerar la distribución de campos asociada con la guía por un guíaonda de fibra curvada (Fig. 2). En

Figura 1
Cable de fibra óptica para canalizaciones enterradas diseñado por STL.



una primera aproximación, la distribución de campos sigue una curva similar a la del perfil del índice de refracción dentro del núcleo y tiene una caída exponencial dentro de la envoltura. Puesto que el frente de onda asociado permanece perpendicular al eje de la fibra, debe existir algún radio ($R + X_R$ en la figura 2) en el que la velocidad de fase de la radiación guiada alcance la velocidad de la luz en ese medio. Más allá de este punto no puede haber guiado, y por consiguiente se radiará una energía que se pierde, representada por el campo a distancias mayores del centro de curvatura.

Una mayor proporción de energía perdida está asociada con modos de orden superior, en los que se llega a alcanzar el punto en que justamente un modo no se elimina y se convierte, de hecho, en una onda plana que se propaga por la envoltura. En el caso de un guiaonda curvado, se radia más energía por estos modos que por los de orden inferior, guiados más estrictamente. La estrecha relación entre frecuencia de corte y radiación se ha demostrado utilizando una fibra de salto de índice de pequeño núcleo, con un radio de curvatura cuidadosamente controlado³. Un examen de longitudes de onda del espectro de potencia radiada por esta fibra mostró picos claramente señalados, que podían asignarse sin ambigüedad a las esperadas longitudes de onda de corte de los modos individuales.

Acoplamiento de modos

Si toda la energía perdida procediera de la que radian los modos cerca del corte, ello no tendría gran importancia. Sin embargo, pequeñas perturbaciones de la geometría de la guía o de su eje pueden producir el acoplamiento de energía entre modos adyacentes. Estas perturbaciones son normalmente aleatorias pero pueden considerarse como una perturbación mecánica compleja compuesta de muchas frecuencias, cada una representada por un desplazamiento sinusoidal. El análisis de esta situación ha mostrado que el acoplamiento es máximo cuando la longitud de onda perturbadora coincide con la correspondiente al batido entre modos adyacentes⁴. Para una fibra ideal, con un perfil parabólico del índice de refracción, la longitud de onda de batido Γ viene dada por

$$\pi d n_1 (n_1^2 - n_2^2)^{-1/2}$$

donde d es el diámetro del núcleo, y n_1 y n_2 son los índices de refracción del núcleo y de la envoltura, respectivamente. Un valor típico de Γ es el de 0,8 mm, que corresponde a condiciones probables creadas por las microcurvas. Para fibras de salto de índice, la energía acoplada aumenta al crecer el orden del modo. Aunque las microcurvas

puedan producir acoplamiento a modos de orden inferior, no radiantes, es normal que exista cierta radiación de energía. No obstante, si se utiliza un perfil de índice gradual para conducir todos los modos a la misma velocidad de grupo, la energía acoplada también tenderá a un valor único. Puesto que el análisis⁴ fue basado en una teoría de la perturbación que implica acoplamiento de energía estadísticamente aleatorio y

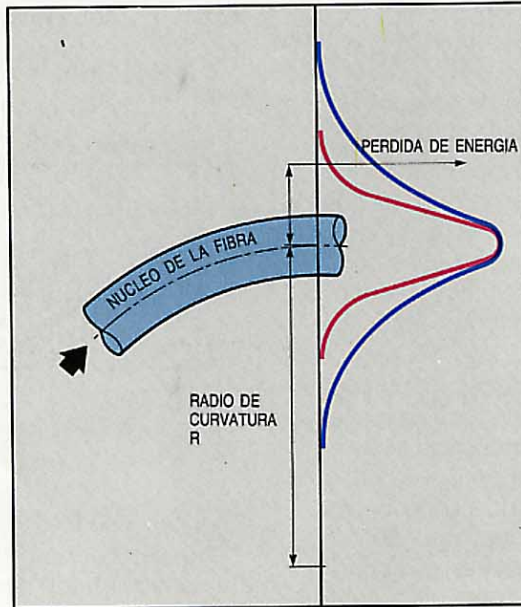


Figura 2
Distribuciones de campo en un guiaonda de fibra óptica curvado, para un modo guiado (curva en rojo) y un modo cercano al corte (curva en azul).

cambio despreciable de las constantes de propagación, en el caso ideal de que éstas fueran idénticas habría una discontinuidad, mas la tendencia es bien patente.

Recubrimiento de las fibras

El diseñador de cables se enfrenta al problema de incorporar los guiaondas de fibra a un cable con mínima perturbación del eje de la fibra. Quizás la técnica más obvia es introducir la fibra con holgura en un tubo, confiando en que la capa de aire concéntrica aisle a la fibra de las fuerzas exteriores. Esta solución funciona bien en un margen limitado de condiciones, pero por desgracia la superficie interior del tubo nunca está del todo lisa. Como resultado, frente a tensiones, vibraciones o variaciones de temperatura en el cable, pueden formarse microcurvas en la fibra al presionar contra dicha superficie. Algunos de estos problemas se han resuelto introduciendo un gel o fluido de alta viscosidad entre el tubo y la fibra. Esto es similar a otra solución propuesta en la que se aplican dos recubrimientos a la fibra (primario y secundario), de módulo de elasticidad alto y bajo, respectivamente, para actuar como amortiguador mecánico. El análisis de los recubrimientos de varias

capas así aplicadas ha mostrado los considerables beneficios que pueden obtenerse⁵. Si el diseño es correcto, se consigue un eficaz aislamiento mecánico con pérdida adicional despreciable.

Aunque el análisis de las microcurvas antes mencionado⁵ proporcione una descripción completa de sus efectos, ésta es algo compleja; frecuentemente basta con utilizar una relación más simple, para un solo desplazamiento provocado por presión⁶, viniendo la pérdida adicional y dada por

$$\gamma = K d^4 D^{-6} (2 n_1^2 / (n_1^2 - n_2^2))^3 \text{ dB km}^{-1}$$

en la que K es una constante de normalización y D es el diámetro de la fibra.

La comparación de los incrementos de atenuación observados en la práctica con los cálculos de γ muestra una relación bastante lineal, excepto para cables con incrementos de atenuación muy pequeños, en los que K se reduce de modo espectacular.

De este análisis se deduce que cualquier tensión uniaxial no uniforme aplicada a las fibras recubiertas producirá, pese a tales recubrimientos, un incremento en la atenuación. Deben, pues, controlarse cuidadosamente en todas las operaciones de cableado las tensiones debidas a la cinta y otras que contribuyan a la presión circunferencial (ejercida por componentes circunferenciales como cubiertas y cintas). La figura 3 muestra que esto puede lograrse: el incremento de atenuación debido al cableado es insignificante entre 1,2 y 1,6 μm , pero se hace pronunciado en torno al corte del modo de segundo orden y a longitudes de onda superiores. La tabla 1 muestra pequeños incrementos similares para una versión multimodo de este cable.

Además de diseñar el cable para que su fabricación introduzca sólo pequeñas pérdidas, hay que mantener la pérdida total dentro de valores aceptables para un margen de temperaturas especificado. El diseño de una estructura en la que los materiales tengan coeficientes de dilatación muy diferentes, presenta un problema que puede comprenderse considerando la estructura simple de una fibra con un recubrimiento secundario. En este caso, los coeficientes de dilatación son 5×10^{-7} y $1,5 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ para la sílice y el nylon, respectivamente. Cuando la temperatura desciende, el recubrimiento de nylon ejerce sobre la fibra una fuerza de compresión longitudinal, hasta que se alcanza un punto en el que la fibra no puede ya soportar dicha compresión y se pandea dentro de la capa amortiguadora. La mínima deformación crítica que produce pandeo viene dada por⁷:

$$\sigma_{\text{min}} = (E_{pc} / \pi E_f)^{1/2}$$

en la que E_{pc} es el módulo de Young de la capa amortiguadora y E_f es el módulo de Young de la fibra.

Debe hacerse notar que este valor se basa en una homogeneidad total de la fibra y de los recubrimientos; cualquier falta de homogeneidad puede producir pandeo con deformaciones de compresión mucho menores. Debe establecerse un compromiso con las exigencias, ya discutidas, de amortiguamiento de la fibra, según las cuales E_{pc} debe mantenerse bajo.

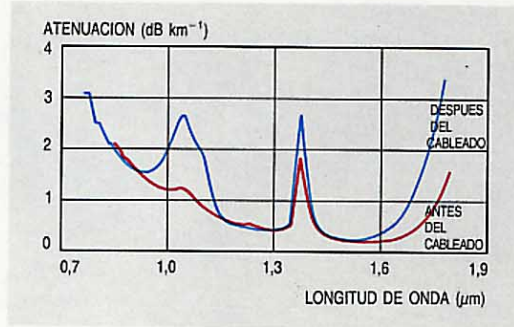


Figura 3 Atenuación de una fibra monomodo de doble ventana, sola y en cable; la pérdida por inclusión en cable puede ser insignificante a las longitudes de onda operacionales con un cuidadoso diseño y control de los parámetros de fabricación.

Una vez que se produce el pandeo, la atenuación puede aumentar mucho. La temperatura por debajo de la cual puede haber pandeo depende del coeficiente de dilatación de la estructura combinada del cable, que puede subir hasta $10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ cuando los plásticos sean componente importante. En el cable de STL utilizado como ejemplo, el coeficiente de dilatación está dominado por el del elemento central de acero, que es $12 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; por ello el cable tiene un buen comportamiento a bajas temperaturas.

Tabla 1 — Atenuación de la fibra antes y después del cableado

Fibra nº	Apertura numérica	Atenuación (dB km ⁻¹)		
		Fibra	Núcleo cableado	Cable
1	0,22	2,6	2,8	2,7
2	0,23	3,0	3,2	3,0
3	0,22	3,0	3,2	3,1
4	0,22	3,0	—	2,9
5	0,23	3,1	3,1	3,0
6	0,23	2,7	2,8	2,7
7	0,22	2,8	2,9	2,8
8	0,20	2,7	2,9	2,7
9	0,23	3,0	3,1	3,1
10	0,22	3,0	2,9	2,8
media		2,89	2,99	2,88

Los resultados corresponden a una longitud de cable de 1230 m.

Resistencia de la fibra

Aunque al analizar las propiedades mecánicas de las fibras suele emplearse el término "resistencia de la fibra", en la práctica, desde luego, la fibra contribuye muy poco a la resistencia del cable. El cable mostrado en la figura 1 contiene en su parte central un elemento resistente de acero de varios cabos, que soporta cualquier carga aplicada. La carga y el módulo de Young del elemento resistente determinan la deformación o alargamiento del cable, y por tanto de la fibra. Lo que realmente importa es saber la máxima elongación que tolera la fibra. Esta sencilla pregunta tiene una respuesta complicada.

Naturaleza estadística de la resistencia de la fibra

La fibra de vidrio, a diferencia de los hilos de acero o de los monofilamentos plásticos, no tiene una deformación de rotura muy definida ni controlable, pues la rotura se inicia en las fisuras, normalmente superficiales, que intensifican localmente las tensiones aplicadas. Puede definirse⁸ un factor de intensificación de tensión K_f , cuyo valor crítico K_{fC} es tal que cuando se produce una fractura

$$\sigma = K_{fC} Y^{-1} a^{-1/2} \quad (1)$$

siendo σ la tensión aplicada, a la profundidad de la fisura, e Y un factor geométrico.

Estas fisuras son sumamente pequeñas; se estima que una fisura de profundidad $1 \mu\text{m}$ producirá rotura cuando la deformación sea del 1%. Durante la fabricación múltiples causas pueden provocar fisuras. Las pruebas sobre una serie de fibras darán unas deformaciones de rotura función de la mayor fisura presente en cada fibra probada. Por esta razón, los resultados deben tratarse de modo estadístico, y suelen presentarse en forma de un diagrama ordenado que muestra la probabilidad acumulada de rotura en función de la tensión o del alargamiento, como en el ejemplo siguiente.

Los cables para canalizaciones enterradas se someten durante la instalación a tensiones (alargamientos) máximos. El cable de la figura 1 está diseñado para una tensión de instalación máxima de 1200 N ($\approx 120 \text{ kg}$), que implica un alargamiento del 0,25%. La comparación con los alargamientos de la figura 4 sugiere que hay un margen de seguridad excesivo, sin embargo erosionado por una serie de factores.

Variación de la resistencia con la longitud

La figura 4 es aplicable a fibras de 10 m de longitud. Si se hubiesen utilizado muestras de longitudes mayores, las resistencias hubieran sido menores por la mayor probabilidad

de encontrar fisuras grandes. Esto puede comprobarse observando que si todas las muestras ensayadas hubieran sido de 1470 m la rotura se habría producido para un alargamiento del 2%, en vez del 5,5% promedio obtenido para longitudes de 10 m. No obstante, incluso una longitud de 1470 m es inferior en varios órdenes de magnitud a la longitud total de fibra a instalar en cualquier sistema de tamaño práctico, y puede no contener ejemplos de grandes fisuras, que aunque ocurran con poca frecuencia pueden ser importantes para sistemas con centenares de kilómetros de fibras.

Prueba a plena carga

Una forma de evitar las inconveniencias y el coste de la rotura de fibras durante la instalación es someter todas las fibras a una carga crítica antes de su inclusión en el cable, y utilizar solamente las que sobrevivan a esta prueba de carga. Esto elimina las fisuras importantes, y en principio debería garantizar la resistencia de la fibra, pero en la práctica surge otra complicación más.

Fatiga estática

Una fisura en la fibra producirá una rotura inmediata para una deformación igual o superior al valor crítico. Por debajo de este valor la fractura no será inmediata, pero el defecto puede crecer y alcanzar un tamaño tal que ocasione la rotura. De este modo, incluso tensiones inferiores al nivel de la prueba a plena carga pueden llegar a quebrar la fibra. Este fenómeno se ha estudiado tanto en teoría como en la práctica. Se ha propuesto⁹ una ley de crecimiento de la forma

$$V = AK_f^n \quad (2)$$

en la que V es la velocidad de crecimiento de la fisura, y A y n son constantes. Esta expresión puede combinarse con ecuaciones de la forma de (1), y una vez que se integra y opera da

$$t = BS_f^{n-2} \sigma^{-n} \quad (3)$$

donde t es el tiempo hasta la quiebra por fisura, S_f su resistencia inerte (el valor que tendría en ausencia de fatiga estática, o la tensión necesaria para producir una rotura instantánea), B una constante relacionada con A , y σ la tensión aplicada.

El tiempo hasta la rotura es así inversamente proporcional a la potencia enésima de la tensión aplicada o del alargamiento. El valor de n se encuentra generalmente entre 14 y 25, correspondiendo los valores más altos a tasas de fatiga bajas. El tiempo hasta la rotura es, pues, extremadamente sensible a los cambios tanto de σ como de n . Por tanto, es importante obtener valores exac-

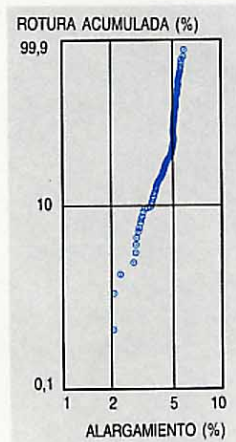
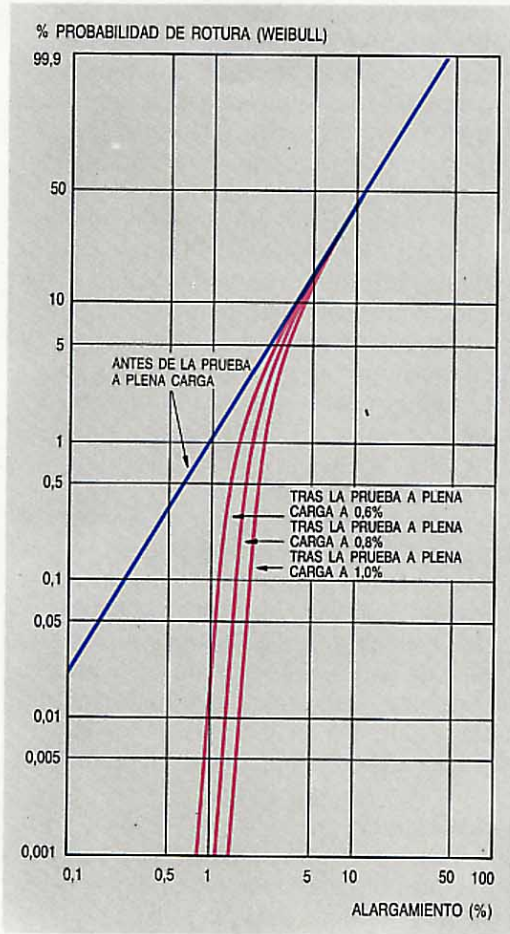


Figura 4 Diagrama Weibull del alargamiento en la rotura para 147 muestras de fibras de 10 m de longitud.

Figura 5
Resistencia inerte de la fibra antes y después de la prueba a plena carga.



tos de n y demostrar la validez de esta ley potencial de crecimiento de fisuras para tiempos hasta de 20 años en servicio. Ambas cosas son difíciles y existe alguna evidencia¹⁰ de cambios más complejos con el paso del tiempo.

A causa de estas incertidumbres, los cálculos de los mecanismos de rotura deben utilizarse con mucho cuidado, pero pueden ilustrar cualitativamente los efectos de la fatiga estática. Por ejemplo, el análisis puede aplicarse al propio proceso de prueba a plena carga, para detallar cómo se modifica la resistencia inerte. En la figura 5 se muestran los resultados de este análisis

sobre una distribución idealizada de resistencia. Dicha distribución tiene como límite inferior el propio nivel de la prueba a plena carga de 0,6%; cualquier fisura que alcance este nivel provocará inmediatamente una rotura; así se consigue garantizar la resistencia de la fibra.

No obstante, la resistencia es mucho mayor, aun con escasa probabilidad de fallo (alargamiento del 1,4% para probabilidad de rotura de 0,1%). Así, si la probabilidad de supervivencia se establece en el 99,9% en lugar de buscar una garantía del 100%, las tensiones permitidas pueden aumentarse sustancialmente. Como ejemplo, la propia tensión de prueba a plena carga puede volver a aplicarse a la fibra durante un corto tiempo. Los trabajos realizados en STL han demostrado que el someter 15 km de fibra dos veces a la tensión de plena carga de 0,6% durante 0,6 s no implica una mayor probabilidad de rotura. La primera prueba a plena carga produjo 8 roturas, y la segunda ninguna.

Relación entre resistencia de la fibra y resistencia del cable

Aunque todavía se descubran nuevas complejidades en la fatiga estática, se conjugan la teoría, la experiencia y unos márgenes de seguridad que compensen los riesgos, para fabricar e instalar cables de resistencia hasta ahora satisfactoria.

La instalación de cables en canalizaciones dura más tiempo que los 0,6 s de la segunda prueba al 0,6% mencionada anteriormente, por lo que debe especificarse un menor alargamiento del cable. Este puede calcularse utilizando la ecuación (3). Si t_1, σ_1 , y t_2, σ_2 son dos conjuntos de tiempos y tensiones que conducen a la rotura, entonces

$$\frac{t_1}{t_2} = \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)^n$$

donde el subíndice 1 se refiere a las condiciones de la prueba a plena carga, y el subíndice 2 a la instalación. Esto puede expresar-

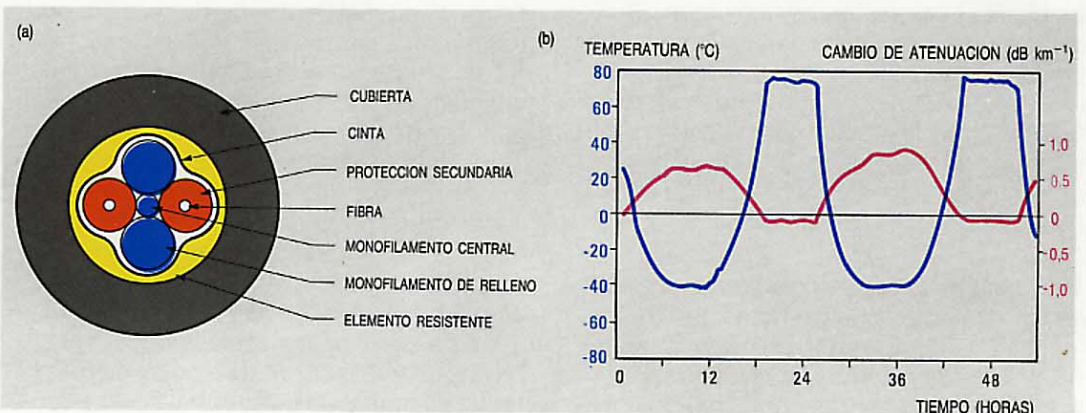


Figura 6
Cable de fibra óptica Ptarmigan: a) sección transversal, y b) resultados para ciclos de variación de la temperatura.

se en función del porcentaje de alargamiento $\epsilon (= 100 \sigma/E)$, donde E es el módulo de Young: para una prueba a plena carga al 0,6% da

$$\epsilon_2 = 0,6 (0,6/t_2)^{1/n}$$

La carga pico de instalación no es normal que dure más de 1 hora, y tomando $n = 14$, el mínimo valor encontrado, como caso peor (que implica la mayor tasa de fatiga estática), se obtiene $\epsilon_2 = 0,32\%$. Como ya se mencionó, este cable tiene un alargamiento de sólo el 0,25% a la máxima tensión de instalación de 1200 N, y por consiguiente satisface la exigencia calculada con un margen razonable, muy lejos de requerir un amortiguador de tensión durante la instalación.

Conclusiones

El diseño de cables de fibras ópticas se ha descrito con referencia a un cable diseñado por STL para canalizaciones enterradas. Existen otros diseños para aplicaciones diferentes. Como ejemplo, el cable mostrado en la figura 6 se destina a casos que exijan un cable totalmente dieléctrico que opere en un ambiente adverso, a temperaturas elevadas.

Otros diseños se denominan "holgados", y en ellos las fibras van suspendidas en la estructura con el fin de minimizar los efectos causados por las microcurvas y la tensión axial del cable sobre las fibras. El diseño mostrado en la figura 1 también incorpora un amortiguador contra las cargas de tracción que produce la tensión axial de compresión causada por el recubrimiento secundario de nylon. En todos estos diseños, no obstante, deben abordarse los fundamentales problemas de los incrementos de atenuación y de la resistencia de la fibra.

Referencias

- 1 D. Hondros y P. Debye: Electromagnetic Waves along Long Cylinders of Dielectric: *Annalen der Physik*, junio 1910, volumen 32, n°3, págs. 465–476.
- 2 A. C. S. van Heel: A New Method of Transporting Optical Images without Aberrations: *Nature*, 2 enero 1954, volumen 173, pág. 39.

- 3 J. E. Midwinter y M. H. Reeve: A Technique for the Study of Mode Cut-Offs in Multimode Optical Fibres: *Opto-electronics*, septiembre 1974, volumen 6, n°5, págs. 411–416.
- 4 D. Gloge: Impulse Response of Clad Optical Multimode Fibers: *Bell System Technical Journal*, julio–agosto 1973, volumen 52, n°6, págs. 801–816.
- 5 D. Gloge: Optical-Fiber Packaging and its Influence on Fiber Straightness and Loss: *Bell System Technical Journal*, febrero 1975, volumen 54, n°2, págs. 245–262.
- 6 R. Olshansky: Distortion Losses in Cabled Optical Fibers: *Applied Optics*, enero 1975, volumen 14, n°1, págs. 20–21.
- 7 G. R. Irwin: Fracture: en S. Flügge (editor): *Encyclopedia of Physics*, Berlín, Springer-Verlag, 1958, volumen 6, págs. 551–590.
- 8 A. G. Evans: Slow Crack Growth in Brittle Materials under Dynamic Loading Conditions: *International Journal of Fracture*, junio 1974, volumen 10, n°2, págs. 251–259.
- 9 J. D. Helfinstine y F. Quan: Optical Fibre Strength/Fatigue Experiments: *Optics and Laser Technology*, junio 1982, volumen 14, n°3, págs. 133–136.
- 10 Y. Katsuyama, Y. Mitsunaga, Y. Ishida, y K. Ishihara: Transmission Loss of a Coated Singlemode Fiber at Low Temperatures: *Applied Optics*, 15 diciembre 1980, volumen 19, n°24, págs. 4200–4205.

M. Murray Ramsay nació en Africa del Sur en 1928. Tras el servicio militar obtuvo en 1952 un BSc por el University College de Londres. Es miembro del Institute of Physics. Ingresó en STL en 1952, y formó parte del grupo creado en 1958 para estudiar los sistemas de comunicaciones ópticas bajo liderazgo del difunto A. H. Reeves. El Sr. Ramsay actuó como asesor de EOPD, Roanoke, cuando comenzaron en 1973 los trabajos sobre sistemas de comunicación por fibra óptica. Más tarde regresó a STL en calidad de ingeniero principal senior de investigación para proyectos de comunicaciones ópticas, siendo ahora ingeniero jefe de investigación para cables de fibras ópticas.

John N. Russell nació en 1954 en Birmingham. Se graduó en 1975 en física aplicada por el University College de Londres. Desde entonces ha trabajado en STC en el desarrollo de cables de fibra óptica para líneas terrestres, como miembro del departamento de desarrollo de cables ópticos en Harlow. Recientemente ha pasado a la división de sistemas submarinos en Southampton, y actualmente trabaja en el diseño y desarrollo de cables submarinos con fibras ópticas.

Jim Titchmarsh nació en Colchester, Essex, en 1942. Obtuvo en 1964 un BSc en física por la Universidad de Bristol, y en 1966 un MSc en electrónica de estado sólido por la Universidad de Manchester. Ingresó a continuación en STL para trabajar en técnicas de deposición de película delgada. Tras un periodo dedicado a pantallas de paneles de plasma, comenzó a trabajar en fibras ópticas, y es ahora jefe del departamento de tecnología de cables ópticos.

Sensores de fibra óptica

La presión, la temperatura, la distancia, la rotación, el campo magnético y el flujo son sólo algunas de las magnitudes que se pueden medir con precisión empleando sensores de fibra óptica. Las principales ventajas sobre los sensores convencionales son su pequeño tamaño, su inmunidad a las interferencias, su seguridad en ambientes peligrosos y la posibilidad de integrar procesos ópticos.

G. D. Pitt

Standard Telecommunication Laboratories Limited, Harlow, Inglaterra

Introducción

Aparte de la transmisión, las fibras ópticas se pueden emplear en una variedad de aplicaciones sorprendentemente amplia¹. Como ejemplo, ITT está desarrollando sensores de fibra óptica para medir magnitudes como la presión, la temperatura y el campo magnético. Aunque estos sensores han obtenido considerable publicidad por sus aplicaciones industriales y militares, sin embargo, todavía pocos han logrado una aceptación generalizada. La mayoría de los sensores de fibra óptica se han utilizado donde eran importantes sus ventajas de seguridad en ambientes peligrosos e inmunidad a las interferencias electromagnéticas, y el coste no era un factor primordial. Ahora, sin embargo, hay una tendencia palpable a desplazarse hacia las áreas de automoción y aparatos de la línea blanca, donde es importante la compatibilidad con la totalidad del sistema.

Clasificación de los sensores de fibra óptica

Aunque haya varias clasificaciones posibles, en este artículo se consideran cuatro tipos de sensores de fibra óptica:

- Tipo A (básico), sensores que emplean la fibra óptica para transmitir la luz hacia y desde un sensor ya adaptado (p. ej., un punto blanco móvil en una palanca mecánica).
- Tipo B (Oilcon), en los que la fibra óptica transmite la luz hacia y desde un sensor óptico (p. ej., un difusor de luz).
- Tipo C (amplitud), que utilizan la fibra óptica como sensor, aprovechando la pérdida de luz a través de la envoltura (por la curvatura, la flexión o los efectos superficiales).
- Tipo D (fase), que explotan la diferencia de fase que provoca la deformación sobre una fibra óptica (p. ej., un hidrófono).

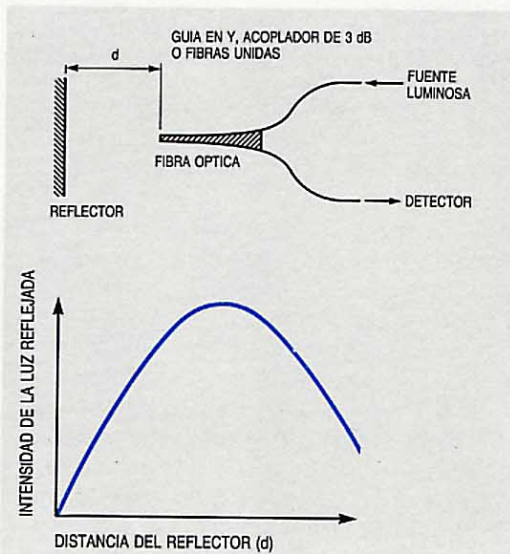


Figura 1
Diagrama de un sensor de fibra óptica universal basado en la medida de la luz reflejada. Escogiendo un reflector adecuado, este sensor puede medir presión, temperatura, niveles de fluido, campos magnéticos, rotación y flujo.

Sensores del tipo A

En general se incluyen aquí los dispositivos en los que una superficie móvil reflectora devuelve o no un haz luminoso por la misma fibra que lo transmite. Hay así lugar, en aplicaciones industriales, a sensores de configuración geométrica universal, con las mismas salidas ópticas para temperatura, presión, deformación, que los sensores eléctricos en los márgenes de 0 a 20 mA ó 4 a 20 mA. Estos sensores pueden consistir en una guía óptica en Y, que transmita luz hacia una superficie o diafragma reflector, móvil por flexión o giro (Fig. 1). Este dispositivo podría adoptar geometrías reflectoras diferentes para medir un amplio margen de parámetros.

La vigilancia del estado de las puertas y válvulas en lugares peligrosos es una aplicación importante. Se han probado en condiciones prácticas interruptores ópticos a prueba de fallos y detectores de posición diseñados por STL (Standard Telecommunication Laboratories). Un desarrollo más avanzado es el de un dial-codificador de fibra óptica que emplea un disco codificado reflectante. Otros tipos de codificadores trabajan por transmisión, con la fuente y los detectores situados en lados opuestos del disco. Sin embargo, el sistema de reflexión permite que la señal de luz codificada retorne por las mismas fibras, minimizando, por lo tanto, el número de fibras ópticas entre el codificador y el equipo supervisor distante, y reduciendo el tamaño del dispositivo.

Sensores del tipo B

En la clasificación anterior, a los sensores tipo B se les denominaba "Oilcon" debido al feliz desarrollo en STL de un sistema para medir los niveles de polución de petróleo al descargar las aguas del pantoque en los buques y de los depósitos de lastre de los superpetroleros^{2,3}. El sensor Oilcon emplea fibra óptica sin envoltura para transmitir la luz que sale de un láser de estado sólido ($0,83 \mu\text{m}$) a la célula de dispersión, donde la luz dispersada por las gotitas proporciona una medida de la concentración del petróleo en la corriente de agua. Debido a que la cabeza detectora se coloca en el cuarto de bombas de un buque cisterna, donde, por razones de seguridad, no se permite ningún sistema eléctrico, la solución con fibra óptica es la ideal.

Se han realizado pruebas en planta para medir concentraciones extremadamente pequeñas de partículas en agua. Se puede lograr la estabilidad básica necesaria para alcanzar, en medidas tomadas en servicio, una precisión superior a 0,1 partes por millón de sólidos. Esto abre la posibilidad de medir continuamente la pureza de líquidos en hospitales, de procesar semiconductores, y otras aplicaciones de control de condensación y polución. Los equipos se han empleado en plantas operativas durante los últimos cuatro años y han sido eficaces en la localización de puntos de fuga de aceite en sistemas de calderas de alta presión, y en comprobar que han sido subsanados. Ahora se está ampliando el estudio para determinar si es posible la discriminación de partículas; los resultados hasta la fecha son altamente prometedores. La figura 2 muestra un desarrollo en que la fuente luminosa de estado sólido o las fibras ópticas se disponen en una célula

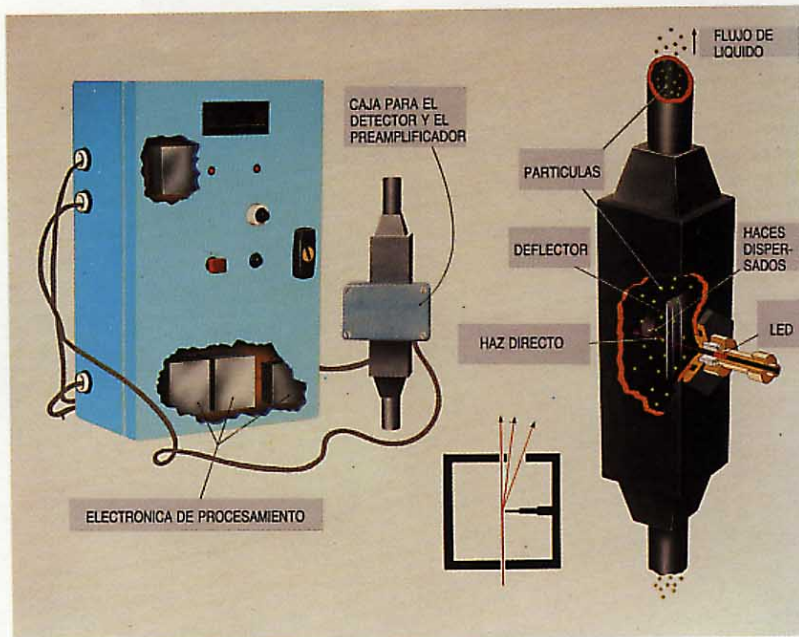


Figura 2
Monitor de alta calidad para líquidos, capaz de medir concentraciones extremadamente pequeñas de partículas en un líquido (menos de 0,1 partes por millón). LED - diodo fotoemisor.

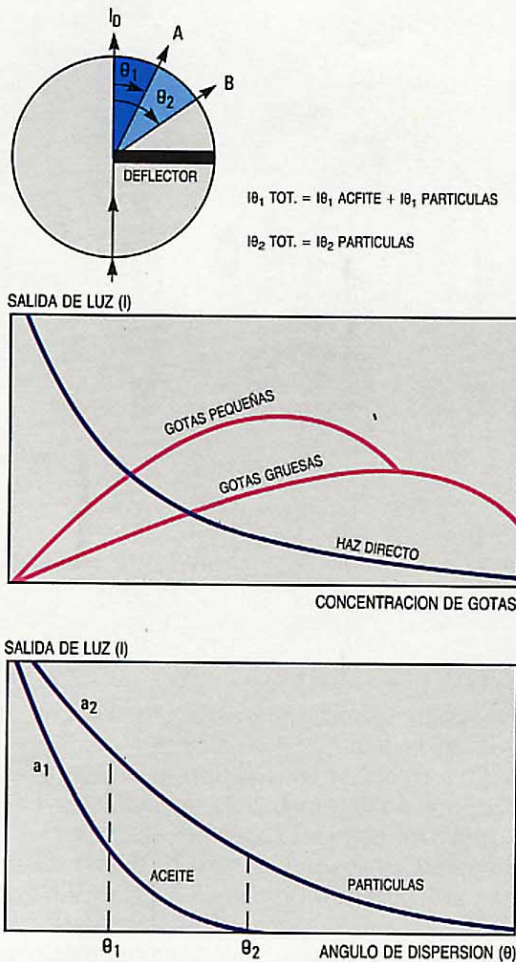
cuadrada, y un conjunto lineal de diodos detecta la dispersión angular.

Se ha realizado un trabajo básico sobre la distribución del tamaño de las partículas. La figura 3 muestra las características de dispersión y absorción para una distribución de partículas determinada. La detección de las partículas más pequeñas da una respuesta angular más plana que para partículas mayores, que concentran la dispersión en ángulos frontales menores. A elevadas concentraciones, las curvas de dispersión pasan por un máximo, causando cierta ambigüedad en la lectura. A bajas concentraciones, sin embargo, esto no es preocupante y se puede emplear la parte lineal de la característica.

La detección de la turbulencia normalmente emplea la relación entre el haz directo y la parte dispersada a 90° . Esta técnica no ha cambiado en unos 20 años. Parece probable, por lo tanto, que con el actual desarrollo de fuentes ópticas de estado sólido y de técnicas de detección síncrona de alta estabilidad, unido a la nueva electrónica inteligente, se puedan lograr mayores avances. El diseño original de la célula de dispersión Oilcon se ha modificado para acoplar varios sensores a diferentes ángulos, y se han calculado algoritmos sobre la intensidad de la dispersión para discriminar, al menos parcialmente, entre tipos de partículas. Tras de probar con éxito esta técnica, se están desarrollando prototipos avanzados.

La clave de un diseño acertado de instrumentación óptica en servicio permanente consiste en mantener el punto de medida lo más sencillo posible, mientras se maximiza la información obtenida mediante técnicas avanzadas de procesamiento de la señal, ya

Figura 3
Características de absorción y dispersión a diferentes ángulos y para diversos tamaños de partículas. Se indica un método para distinguir el aceite de las partículas de herrumbre, suponiendo conocida la distribución del tamaño de las partículas.
a - tamaño partic.
($a_1 > a_2$).



circuitos integrados digitales especiales para estos procesos, su aplicación no es universal. Empleando estas técnicas, el coste del análisis de correlación se ha reducido drásticamente en los últimos dos o tres años, en algunos casos en un factor de cincuenta.

Unas refinadas técnicas ópticas combinadas con electrónica inteligente hacen posible toda una gama de nuevas aplicaciones, sin implicar necesariamente importantes logros tecnológicos. El procedimiento Oilcon ha mostrado también que los láseres y los componentes ópticos pueden funcionar en las más adversas condiciones. Por ejemplo, las ventanas de la célula Oilcon se mantienen limpias mediante un chorro de agua clara aplicado a presión en forma semicontinua; se calibra la absorción de la ventana antes de cada operación de descarga mediante ciclos de limpieza automática y de ajuste de ganancia. Sin embargo, las variaciones de amplitud absoluta no deben causar problema cuando se utilizan datos de frecuencia, y la experiencia con los sistemas actuales ha demostrado que se puede tolerar hasta un 80% de pérdida de luz debido a la suciedad de la ventana.

Sensores del tipo C

Una fibra óptica consta de un núcleo interno de sílice y de una envoltura cuyo índice de refracción es ligeramente diferente. La luz guiada por la fibra óptica puede perderse si la fibra se curva más allá del radio crítico. De esta forma, una fibra óptica puede actuar como sensor de tensión o presión si se fija a un elemento flexible. Se pueden seleccionar con cuidado los índices de refracción del núcleo y de la envoltura para que las fibras sean muy sensibles a la temperatura, ya que los índices de refracción varían distintamente con la temperatura. La medida de las variaciones de amplitud puede, pues, proporcionar una gama de sensores diferentes.

Una de las soluciones propuestas para medir el contenido de aceite en el agua consiste en sumergir una fibra óptica sin envoltura en la corriente de agua. En los puntos en los que las gotas de aceite se adhieran a la fibra, se perderá luz debido a la diferencia del índice de refracción. Midiendo la pérdida en el extremo de la fibra, se pueden detectar menos de 5 partes por millón de aceite en agua. El problema en esta técnica era que el aceite sólo podía eliminarse en el tiempo permitido (20 segundos) empleando chorros de aire purgante y detergente para fregar la fibra. Esto reducía la sencillez del sistema, y por lo tanto se ha abandonado esta técnica a

asequibles. Se han desarrollado nuevas técnicas digitales que permiten combinar la información de frecuencia y de amplitud. Así, las células de dispersión Oilcon se pueden emplear para medir simultáneamente:

- caudal, empleando el análisis por la transformada rápida de Fourier del espectro de potencia, o el análisis de correlación
- dimensionado de partículas, empleando el análisis de ángulos múltiples y los algoritmos apropiados
- concentración, mediante la amplitud de la intensidad de la luz dispersada.

El ancho de banda en frecuencia de la información obtenida por estos sensores puede ser mayor que el de cualquier otro tipo de sonda. En análisis de correlación, por ejemplo, el ancho de banda de la información llega a 60 kHz, comparado con los 1 a 6 kHz típicos de los sensores acústicos. Esto significa que el análisis de la función de correlación de la probabilidad en un proceso de supervisión continua requiere menor número de promedios (o sea, menor tiempo), o que puede proporcionar una correlación más exacta. Aunque se disponga ya de

pesar de las ventajas de su alta sensibilidad, y de que ni la herrumbre ni la tierra atacaban por sí mismas a la fibra (discriminando así algunos tipos de partícula).

Otro desarrollo de STL y de ITT Components Group es el dispositivo sensor de nivel mostrado en la figura 4. Se pierde luz por el vértice de un acodamiento de la fibra (cuya forma es tal que toda luz incidente sufre reflexión) cuando el líquido alcanza dicho vértice. Este método para la detección todo-nada de niveles no es nuevo, pues ya se han utilizado otros diseños que emplean prismas reflectores. Sin embargo, el uso de pequeños vértices reflectores de zafiro ha mejorado radicalmente los niveles de luz reflejada, admitiendo varios centenares de metros de fibra multimodo de bajas pérdidas entre el sensor y el punto de control. El principal problema en este tipo de aplicaciones es el mismo que surge al emplear sensores por pérdidas en fibra como el Oilcon (es decir, la suciedad en la superficie sensible). Se han probado diseños especiales en los que se conforma el vértice adecuadamente para minimizar la adhesión de gotitas; en una prueba continua con petróleo crudo del tipo ligero del Irán, se mantuvo la operación durante seis meses sin limpieza.

Sensores del tipo D

Se han realizado amplias investigaciones por los United States Naval Research Laboratories sobre los efectos de la presión y las fuerzas acústicas en fibras ópticas monomodo y multimodo. La tensión provoca un cambio de fase al actuar sobre la longitud, diámetro e índice de refracción. El parámetro dominante es el cambio de longitud, y los experimentos realizados con sensores devanados sobre mandriles o dispuestos en otras configuraciones geométricas, alcanzan sensibilidades en hidrófonos comparables a las de los dispositivos piezoeléctricos corrientemente empleados. En fibras monomodo es relativamente fácil medir el cambio de fase, pero en fibras multimodo puede haber dificultades para medir dicho cambio en la configuración a vetas producida por una fuente coherente.

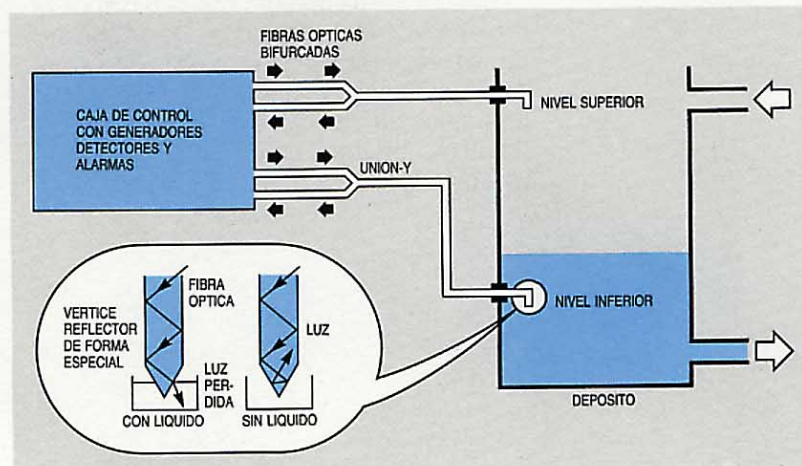
El mayor problema de estas técnicas sensoras es la intersensibilidad con otros parámetros; por ejemplo, es difícil separar los efectos acústicos de los de temperatura. Para superar esto se pueden aplicar revestimientos especiales a la fibra que refuercen la sensibilidad a un parámetro determinado y anulen los efectos contrarios. Como alternativa se pueden emplear las polarizaciones ortogonales de radiación coherente de una fibra monomodo. Devanando tensa-

mente la fibra sobre un cilindro se puede provocar una fuerte birrefringencia. La deformación adicional causada por la presión o por variaciones acústicas puede luego detectarse por el giro resultante de la polarización, que causa una variación de amplitud medible a la salida. Una ventaja más es el emplear una sola fibra, en vez de dos como en las técnicas interferométricas normales. Por ello se han desarrollado fibras ópticas antipolarizantes con núcleo y envoltura elípticos.

Se ha construido un interferómetro Mach-Zehnder en STL para la medida de pequeños campos magnéticos, basado en depositar un material altamente magnetotróctivo en la superficie de la fibra óptica. Se han efectuado medidas en continua de campos magnéticos pequeños, empleando estas técnicas. En anteriores intentos se muestreaba por corriente alterna el campo magnético, extrayendo la señal del ruido mediante proceso electrónico. El diseño de STL se ha utilizado para determinar las ventajas y desventajas de estos tipos de sensores.

La figura 5 es el esquema de un interferómetro óptico. La fibra óptica de muestreo ha sido metalizada por radio frecuencia en una longitud de 20 mm con una aleación amorfa de $Fe_{80}B_{20}$. Este material proporciona una mayor sensibilidad de deformación a la saturación que el níquel (p. ej., una deformación de 3×10^{-6} se satura a 10 kGauss para el níquel y a 10 Gauss para el metal amorfo). Un campo magnético provoca que el recubrimiento tense la fibra longitudinalmente, haciendo variar la fase. En este montaje, la luz de frecuencia única del láser se divide en un separador de haces optimizado con recubrimiento dieléctrico y se acopla a dos fibras, una de las cuales se ha descubierto y vuelto a recubrir con un espesor aproximado de $5 \mu m$ de $Fe_{80}B_{20}$ amorfo. La fibra así revestida se coloca en una bobina excitadora, y se une a la fibra de

Figura 4
Dispositivo sensor de nivel con fibra óptica desarrollado en STL.



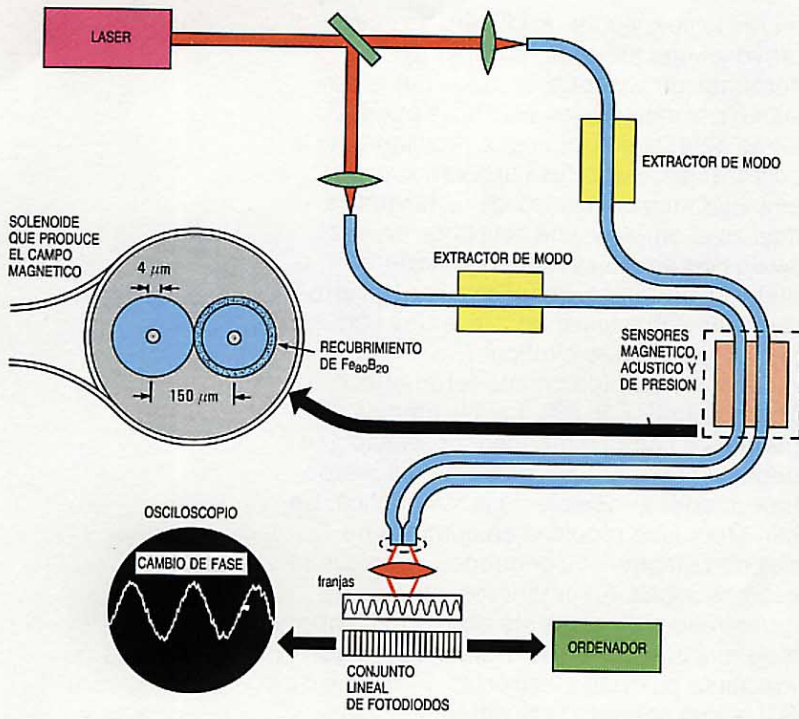


Figura 5
Interferómetro Mach-Zehnder para la medida de campos magnéticos pequeños.

referencia en una abrazadera para asegurar su paralelismo y contacto. La luz de las fibras se interfiere y produce franjas. El diagrama de franjas se almacena luego en el ordenador mediante un conjunto de diodos detectores, y se hace una comparación entre la señal con y sin campo. La amplitud de la señal diferencia de los diagramas de franjas es proporcional al desplazamiento de fase.

Los resultados muestran una señal de ruido de 2×10^{-2} radianes, lo que indica que sus causas son principalmente térmicas o mecánicas. Pueden muy bien proceder de microfónia en el divisor de haz, por ejemplo, demostrando la importancia de los demás componentes ópticos en este tipo de sistemas. Recientes descubrimientos indican que los problemas del acoplador de 3 dB o del divisor de potencia se pueden resolver ahora empleando las técnicas de fusión de fibras.

Los sensores de fibra óptica basados en la medida de fase o de polarización son muy sensibles, y los cálculos indican que se pueden detectar campos magnéticos tan pequeños como 10^{-10} Gauss utilizando fibras recubiertas o fibras ópticas pegadas a una cinta de vidrio metálico. Se pueden,

pues, emplear como sensores magnéticos sin necesitar la refrigeración que otros sensores cuánticos del campo magnético. Las aplicaciones van desde la detección de la temperatura y la presión hasta detección de antenas y magnetismo, con la ventaja de ser factibles configuraciones geométricas diferentes. Una variante podría ser la reflectometría en el dominio del tiempo, indicando los impulsos reflejados en una discontinuidad de la fibra la posición de cualquier perturbación.

El desarrollo de estos sensores se halla aún en las primeras fases, ya que los requisitos tecnológicos son altos. Debe emplearse un láser de estado sólido de bajo ruido que proporcione una señal monomodo en todas las condiciones. Los acoplos deben ser rígidos y conservar la polarización.

Es interesante también considerar que partes del sistema se pueden integrar para permitir la realización óptica de parte del procesamiento final de la señal. Ya se han construido interferómetros Mach-Zehnder en una forma ópticamente integrada, y es previsible que se puedan construir bloques de circuitos ópticos que incorporen el sensor. Sin embargo, están todavía por demostrar sus ventajas reales sobre los sensores convencionales.

Referencias

- 1 P. Sothcott: Tecnología de la fibra óptica: Aplicaciones especiales: *Comunicaciones Eléctricas*, 1981, volumen 56, nº 4, págs. 417-424.
- 2 G. D. Pitt, M. M. Ramsay y D. Gray: Fibre Optics in the Marine Environment: *Transactions of the Institute of Marine Engineers*, septiembre 1980, volumen 92, nº 9, págs. 66-73.
- 3 G. D. Pitt: Oil Content Monitoring and Pollution Control: *Proceedings of Interflow '81, The Fluid Handling Conference*. Harrogate, 1 diciembre 1981, págs. B2-1-B2-16.

G. D. Pitt nació en Louth, Lincolnshire. Después de cursar BSc en filosofía natural en la Universidad de Glasgow (1963) y PhD (1966) en geofísica del estado sólido en la Universidad de Newcastle, entró en STL en 1966. Ha estudiado durante ocho años la alta presión en semiconductores en el High Pressure Laboratory de STL. Actualmente es jefe de un grupo en STL que se dedica a "Sensores y Sistemas", especialmente a semiconductores y sistemas de control óptico. En 1979 se hizo cargo de un consultorio sobre control de polución en China para las Naciones Unidas. Ha sido galardonado con el grado de DSc por la Universidad de Glasgow en 1982. El autor es profesor invitado en la Universidad de Surrey y miembro del Instituto de Física.

Dispositivos de efecto Hall para relés y otras aplicaciones

Los dispositivos de efecto Hall basados en tecnología bipolar de silicio se han desarrollado para reemplazar los relés convencionales. En las centrales telefónicas electrónicas se emplea con éxito una versión con encapsulado hermético ultra-fino.

A. H. Marchant

ITT Components Group Europe,
Harlow, Inglaterra

G. D. Pitt

Standard Telecommunication Laboratories
Limited, Harlow, Inglaterra

Introducción

Las centrales de British Telecom han empleado, durante muchos años, el relé electromecánico tipo 3000. A pesar de la clara tendencia hacia centrales puramente electrónicas, ha sido difícil diseñar circuitos de protección contra descargas de rayos y procedimientos de cortocircuitar la alimentación para detectar la corriente. A pesar de su tamaño y de la necesidad de un servicio regular, los relés electromecánicos tienen considerables ventajas, como el poder diseñar los devanados para satisfacer requisitos particulares y tener un buen aislamiento. Se han hecho varios intentos para conseguir un sustitutivo destinado a las centrales telefónicas electrónicas, habiéndose ensayado opto-acopladores, dispositivos de emisión termoiónica y dispositivos de efecto Hall¹. La última solución ha sido un gran acierto, ya que proporciona un buen aislamiento y la inductancia presentada a la línea puede hacerse comparable a la del relé que reemplaza. Además, los dispositivos de efecto Hall son flexibles en diseño y aplicaciones, y su pequeño tamaño y adecuación para el montaje en placas de circuito impreso permiten reducir el tamaño de los cuadros.

Una vez revisadas todas las soluciones posibles para aplicaciones de relés sin contacto, se ha encontrado que los dispositivos de efecto Hall ofrecen las mayores oportunidades de éxito. Después de varias correcciones de diseño para diferentes materiales, dimensiones, encapsulados y circuitos magnéticos, British Telecom ha ensayado un dispositivo de efecto Hall basado en la tecnología bipolar de silicio.

El diseño del circuito magnético realizado en STL (Standard Telecommunication Laboratories) incorpora varias características nuevas para maximizar la densidad de

flujo, conservando una alta fiabilidad y un encapsulado de bajo perfil. El trabajo ha incluido el diseño de circuitos de película gruesa y de circuitos integrados para la amplificación y el circuito de disparo. Se han desarrollado además aparatos para medición en CC de corrientes elevadas, habiéndose instalado los mismos en gran cantidad para medidas de corriente en baños electrolíticos.

El efecto Hall

A finales del siglo pasado, Hall descubrió que se producía una tensión transversal cuando se aplicaba una corriente a una lámina de oro. La tensión era muy pequeña; sin embargo este valor es mucho mayor en los modernos semiconductores. En particular, los compuestos III-V como InSb e InAs proporcionan grandes tensiones de efecto Hall, y se han empleado en dispositivos prácticos para detectar campos magnéticos.

No obstante, la reproducibilidad de estos dispositivos era pobre y la tensión de salida dependía de la temperatura, precisándose circuitos compensadores especiales. Recientes mejoras en los procesos de crecimiento de materiales semiconductores sobre silicio que proporcionan un material homogéneo, junto con técnicas avanzadas en el proceso de obleas, han hecho que estos dispositivos sean viables para aplicaciones en gran escala. Además, los nuevos circuitos digitales son compatibles con la salida que dan los dispositivos de efecto Hall.

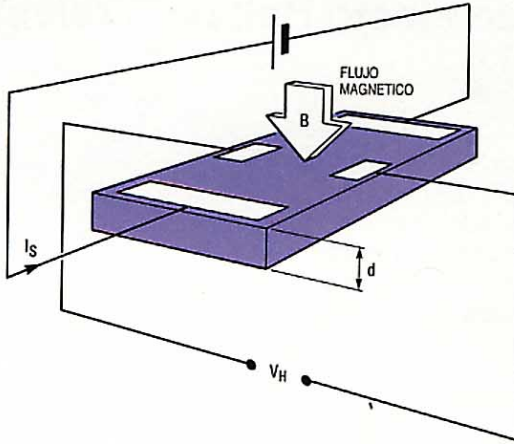
La figura 1 muestra la relación entre la densidad de flujo magnético aplicado B , la corriente laminar estacionaria I_s , y la tensión Hall de salida V_H . El campo magnético se puede generar por medio de una corriente I_c que circula por la bobina de un circuito

Figura 1
Relación entre el flujo magnético, corriente de línea, y parámetros eléctricos de la película Hall.

$$V_H = \frac{BI_s}{ne\mu}$$

siendo

- n - concentración de portadores (cm^{-3})
- e - carga del electrón
- μ - movilidad ($\text{cm}^2\text{v}^{-1}\text{s}^{-1}$).



magnético. Eligiendo el número de espiras de la bobina, la inductancia puede hacerse igual a la presentada a la línea en varias aplicaciones del relé tipo 3000.

Las ecuaciones Hall simplificadas dadas en la figura 1 muestran que la tensión de salida se puede incrementar si se reduce el espesor del dispositivo d o se aumenta el flujo magnético y la corriente laminar. Estos requisitos pueden causar problemas de fabricación. Por ejemplo, una reducción en el espesor puede conducir a un error de reproducibilidad desproporcionadamente alto, ya que el porcentaje de error al controlar el espesor de la capa semiconductor es grande para espesores muy pequeños. El flujo se puede incrementar, para una corriente de la bobina dada, reduciendo el entrehierro donde se coloca el dispositivo; este último debe ser lo más delgado posible y el encapsulado debe reforzar el flujo que lo atraviese. La corriente laminar puede aumentarse, pero esto eleva el consumo de potencia y el autocalentamiento de la pastilla. En estas circunstancias los cambios espaciales en las líneas de igual corriente pueden provocar variaciones imprevisibles de la tensión de salida en los contactos Hall con campo nulo (decalaje de tensión).

Además, reduciendo el espesor del dispositivo se aumenta su resistencia. Si se mantiene constante la tensión que produce la corriente estacionaria I_s a través de la lámina, un incremento en la resistencia reducirá dicha corriente, con lo que poco se gana. La resistencia también aumenta con la temperatura, y ello debe compensarse con el circuito de excitación. A nivel electrónico, el dispositivo está gobernado por la

concentración de portadores n y el grado de homogeneidad a través de la lámina, ya que éste puede alterarse con la temperatura y provocar cambios en el decalaje de tensión y un error adicional en la tensión de salida. Por ello, se hace mucho hincapié en la homogeneidad del material y en la reproducibilidad de la oblea.

Hay numerosos compromisos en el diseño y selección de materiales para un dispositivo de efecto Hall óptimo. La tabla 1 resume los criterios principales para dicha selección. Hoy en día, la elección técnica recae obviamente en el GaAs, aunque los desarrollos primitivos emplearan materiales semiconductores corrientes con resultados reproducibles mediante una tecnología de proceso reconocida, y por ello se eligieran los dispositivos de silicio, con técnicas de proceso bipolar, a pesar de su relativamente baja salida. En vista de los últimos desarrollos en el crecimiento de GaAs y las posibilidades de proceso, es probable que ahora se logren grandes mejoras empleando este material.

Dispositivos Hall y encapsulado

Los contactos óhmicos de la pastilla de silicio, compuesta de una capa epitaxial tipo n sobre un sustrato de alta resistividad tipo p , se formaron mediante una difusión inicial n^+ de fósforo seguida de una metalización de aluminio y pasivado. Todo ello cae en el ámbito normal de la tecnología bipolar con crecimiento epitaxial, y el proceso fue también el normal. La única diferencia con los procedimientos probados consistió en emplear sustrato tipo p , ya que se trataba de confinar el dispositivo de efecto Hall en la fina capa epitaxial. La capa tipo p hacía de sustrato aislante; los temores de que pudieran presentarse problemas en la unión $n-p$ (p. ej., efectos de interdifusión que desfigurarán el espesor eficaz del dispositivo y su reproducibilidad) se disiparon al seguir tres líneas de producción separadas. Para reducir el espesor total de la pastilla se empleó la técnica normal de fresar el sustra-

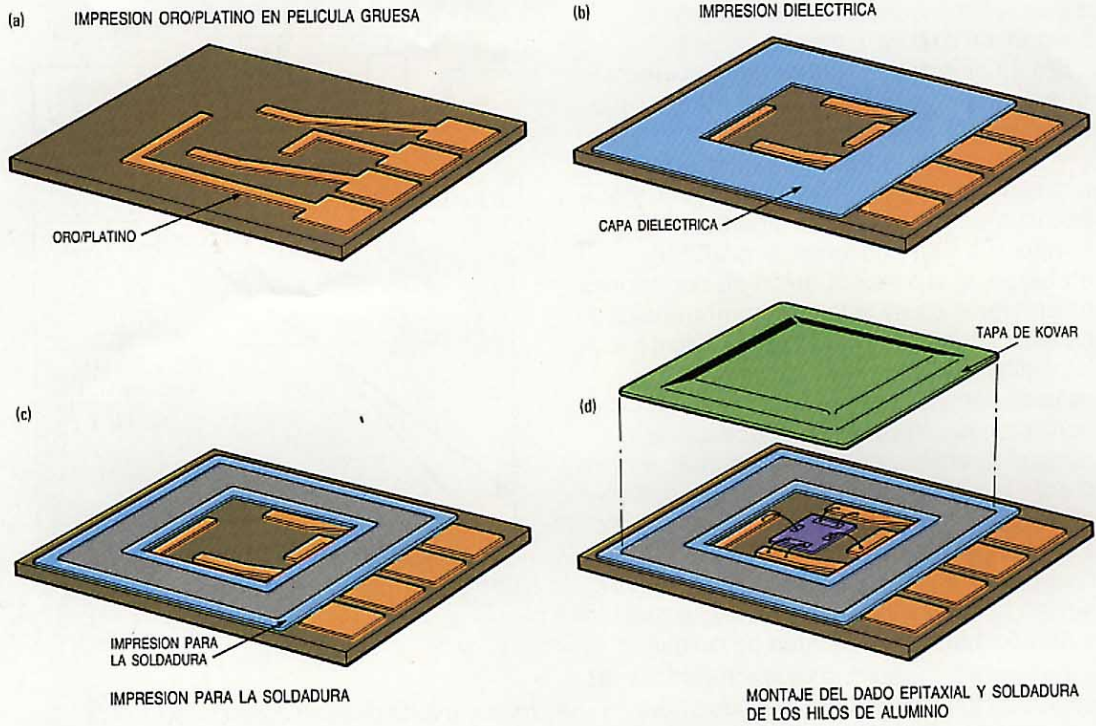
Figura 2
Encapsulado de bajo perfil de un dispositivo de efecto Hall, mostrando la pastilla de silicio fresada por debajo, el conexionado y la tapa magnética.



Tabla 1 - Selección de materiales (compromisos)

Factor de selección	InSb InAs	GaAs	Ge	Si
Salida	alta	alta	alta	baja
Variación con la temperatura	alta	baja	media	baja
Técnica de proceso	limitada	limitada	limitada	buenas
Suministradores	limitados	limitados	limitados	buenos
Reproducibilidad	pobre	pobre	pobre	buenas
Coste	medio	alto	bajo	mínimo

Figura 3
Proceso de encapsulado de película gruesa.



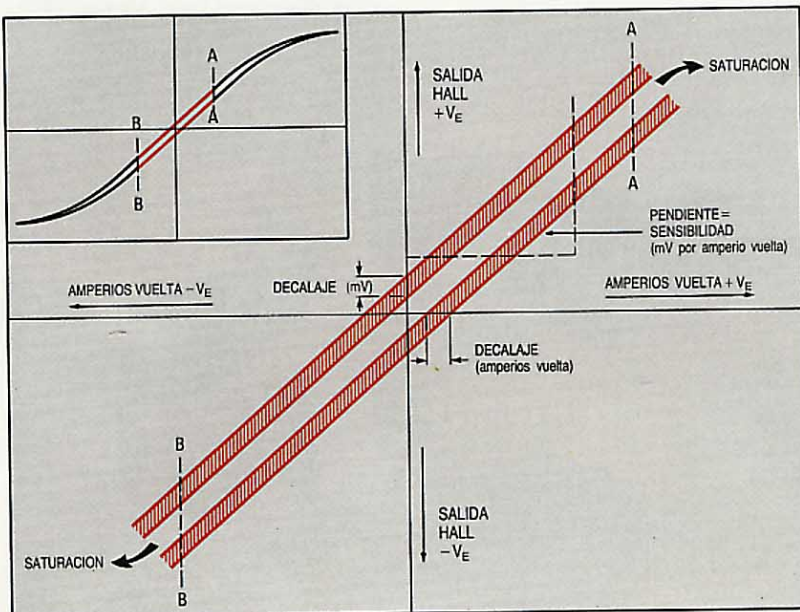
to por debajo. Las pastillas se probaron seguidamente con sondas sobre la misma oblea para determinar su resistencia y su decalaje de tensión. Finalmente, se cortaron con láser y se almacenaron.

Se fijaron después las pastillas dentro de un encapsulado de película gruesa hermético. Como hay que maximizar el flujo a través del dispositivo para incrementar la tensión Hall de salida V_H , se incorporó al encapsulado una tapa de Kóvar, magnéticamente blanda, que formaba parte del núcleo magnético reduciendo las partes no magnéticas del circuito. Se emplearon técnicas normalizadas para película gruesa. En las

figuras 2 y 3 se muestra el encapsulado de bajo perfil. El dado se pegó al sustrato de alúmina de tal modo que se redujeran al mínimo las deformaciones. La pastilla se conectó a los circuitos de película gruesa de AuPt mediante hilo de Al soldado a presión. Existen tapas ya cortadas y acabadas; sin embargo, es necesario cuidarse de conseguir una sólida soldadura oro/estaño que selle los bordes de la tapa y que cumpla la tasa de fugas de la especificación de fiabilidad BS 9540. También había que evitar que los hilos de soldadura hicieran cortocircuito con la tapa; por esta razón no se pensó en la soldadura por gota de oro de alto perfil. El espesor total del encapsulado y el entrehierro no magnético se controlaron cuidadosamente para lograr su reproducibilidad en las aplicaciones sustitutivas de relés. Para las unidades de medida de corrientes continuas grandes, la reproducibilidad no resultó tan importante.

La salida de un dispositivo Hall es lineal con los amperios-vuelta de corriente de la bobina hasta que se satura el núcleo. La figura 4 (interior) muestra la curva operativa típica de un dispositivo; cuando el campo es nulo hay una pequeña tensión de reposo (el decalaje de tensión). Esta puede ser causada por diversos factores: desplazamiento relativo de los contactos Hall; falta de homogeneidad en el material de silicio base; contactos no óhmicos, y deformación. Los primeros tres factores se minimizaron empleando material epitaxial tipo-*n* de alta calidad y técnicas de impresión precisas. La deformación originó pequeñas variaciones con la temperatura, debidas principalmente

Figura 4
Curva de trabajo de un dispositivo Hall típico, mostrando el decalaje de tensión V_{HO} con campo nulo y la tensión de salida Hall en función del flujo magnético de excitación en amperios-vuelta.



a pequeñas inconsistencias durante la fijación del dado y la tapa.

En un dispositivo Hall hay varios efectos que compiten y pueden afectar al decalaje de tensión. A menudo se piensa erróneamente que el dispositivo es comparable a una red resistiva de cuatro contactos, y que las resistencias de la red varían con la temperatura en una forma similar. Sin embargo, si la concentración de portadores es aleatoria, o hay faltas de homogeneidad de espesor o deformación a lo largo de la pastilla, los valores de resistencia no variarán necesariamente en forma predecible con la temperatura. Así, el decalaje de tensión puede aumentar o disminuir al crecer la temperatura según el dispositivo en cuestión. Mediante un diseño cuidadoso e investigando estas variaciones durante el encapsulado y proceso de los dispositivos, se han minimizado sus efectos y se han obtenido altos rendimientos de obleas.

La figura 5 muestra las características de conmutación y de salida. Con los subsiguientes amplificadores electrónicos (no descritos aquí en detalle) se pueden fijar las tensiones de umbral para obtener niveles de corriente de actuación/desactuación compatibles con las aplicaciones del relé tipo 3000. Por lo tanto, la característica de sensibilidad debe pasar por una "ventana" operativa para ser aceptable^{1,2} y entonces el dispositivo equivale de hecho a un convertidor analógico-digital. La histéresis y la reproducibilidad de la curva se mantiene en todo el margen de temperatura de trabajo (0 a 100°C), inclusive en caso de fallo, en que la bobina se puede calentar muy por encima del ambiente. Esto se consigue sin compensación de temperatura en la pastilla, ya que una selección cuidadosa de la concentración de portadores y la resistividad del dopado del silicio epitaxial permite mantener la salida Hall próxima a un nivel dado para una corriente estacionaria constante. Los circuitos circundantes mantienen, pues, constante la corriente en la pastilla. Otros diseños prefieren una tensión constante a través del dispositivo, con distintas técnicas de compensación. Se deben mantener niveles de corriente que aseguren un autocalentamiento mínimo.

La histéresis ilustrada en la figura 4 es función del circuito magnético, incluidos su diseño geométrico y el material del núcleo. Aunque pueda aceptarse cierta histéresis, sus límites deben estar dentro de una banda de tolerancias especificada. La elección del material del núcleo tuvo en cuenta dos factores principales: retentividad y permeabilidad. La retentividad debe ser pequeña para reducir la diferencia entre la excitación de *activado* y *desactivado*, mientras que la permeabilidad debe ser lo

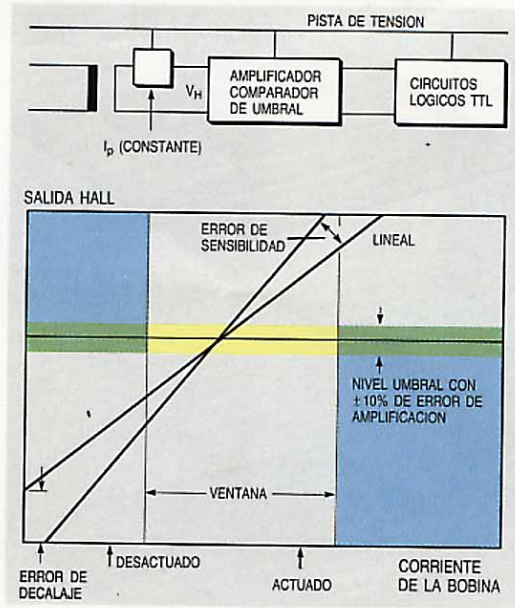
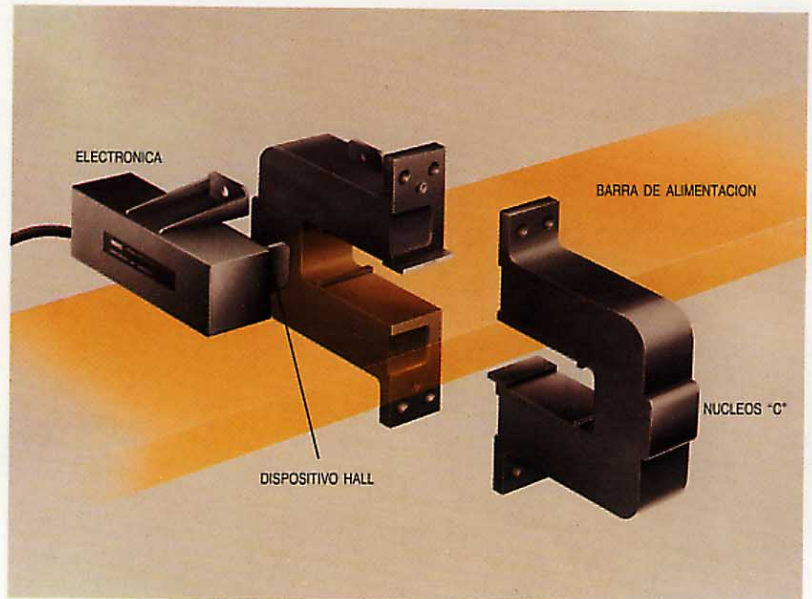


Figura 5 Curva de trabajo de un dispositivo de efecto Hall mostrando la "ventana" de corriente con la bobina actuada y desactuada, el comparador y amplificador electrónicos, y los errores de sensibilidad y decalaje.

más elevada posible para conseguir la máxima densidad de flujo con un mínimo de fuerza magnetizante (alta sensibilidad). Otros factores considerados fueron el coste y la facilidad de fabricación. El sensor tipo 102 emplea hierro magnético puro, ya que su permeabilidad es relativamente alta y es fácil darle la forma deseada. Cuando se necesitaron inductancias más altas, hubo que buscar un núcleo mayor; para el sensor tipo 101 los laminados de transformador resultaron ser los más adecuados. En ambos casos la longitud magnética era relativamente corta, y para conseguir inductancia y sensibilidad razonables el entrehierro debía mantenerse al mínimo, necesiéndose por lo tanto un dispositivo Hall ultrafino.

Figura 6 Vista de una unidad de medida de alta corriente.



Medida de corrientes muy grandes

Los conductores generan un campo magnético que es proporcional a la corriente; este campo se puede concentrar en un material de alta permeabilidad magnética que rodea al conductor o barra de alimentación^{3, 4}. El conductor equivale entonces en realidad a una bobina de una sola espira, generadora del campo magnético en el caso de relés. Se han obtenido linealidades muy buenas a la salida y sensibilidades uniformes en un margen de temperatura de trabajo desde 0 a 100°C, para campos hasta de 2500 amperios-vuelta. La figura 6 muestra un diseño mecánico con el dispositivo de efecto Hall inserto en el núcleo en un punto conveniente. Se han empleado estas unidades para medir hasta 2500 A CC, con una saturación aparente del núcleo próxima a 3000 A (densidad de flujo de 0,5 Tesla). Esto es muy inferior a la densidad de flujo de saturación del hierro de grano orientado, normal para transformadores; la discrepancia se debe a los campos marginales que en el entrehierro no atraviesan el dispositivo Hall. El entrehierro se puede modificar para extender la linealidad a corrientes más elevadas, pero entonces se reduce la sensibilidad. Se alcanza un compromiso empleando un núcleo rectangular con entrehierros distribuidos. La figura 7 muestra el efecto sobre la salida de la variación del entrehierro, con simple o doble ranura, en un núcleo de 14 pulgadas (356 mm) de longitud magnética.

Actualmente se suministran sensores Hall con un buen aislamiento eléctrico y se emplean como monitores en plantas de fabricación de gas electrolítico; con un sensor por ánodo, se conoce la distribución de corriente en toda la célula matriz, teniendo salidas para dar alarma de fallo o de sobrecorriente en un ánodo particular. Se emplean unidades que cubren márgenes lineales distintos, desde 20 a 500 A y 2500 ACC. Se utilizan dispositivos lineales de efecto Hall como sensores de corriente en armaduras de motores para sistemas de tracción eléctrica, como coches eléctricos y flotas lecheras.

Conclusiones

Los dispositivos de efecto Hall se han desarrollado desde una etapa en la que eran piezas experimentales hasta su empleo con éxito en un gran número de aplicaciones analógicas de alta fiabilidad. Un

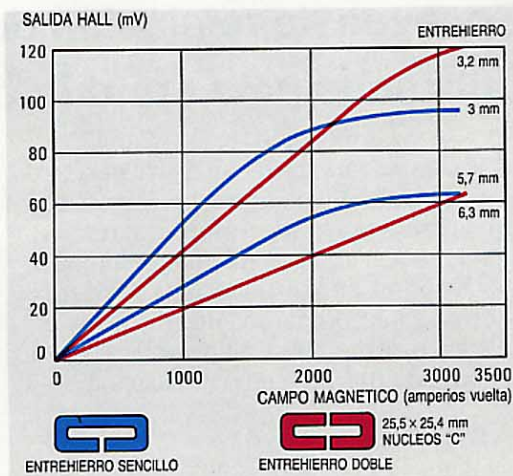


Figura 7
Salida de un dispositivo Hall para medir grandes corrientes en función de las dimensiones del entrehierro y del número de ranuras.

encapsulado hermético ultrafino ha permitido emplear el dispositivo en aplicaciones en las que la tensión de salida debe mantenerse dentro de estrechas tolerancias. Los decalajes de tensión se han minimizado y los efectos debidos a la temperatura se han identificado y controlado. La experiencia de STL en película gruesa y en encapsulado ha sido un factor importante en el desarrollo del sistema.

Podrán finalmente obtenerse mayores sensibilidades en el silicio merced a nuevos avances en las técnicas de proceso; sin embargo los dispositivos de GaAs que utilizan las últimas tecnologías de láser y la implantación iónica son altamente prometedores, y conducirán a una mayor explotación del efecto Hall.

Referencias

- 1 A. W. Sweet: Sustitutos electrónicos de relés: *Comunicaciones Eléctricas*, 1979, volumen 54, nº 1, págs. 54-58.
- 2 A. H. Marchant: Hall Effect Switching Devices: *New Electronics*, 17 mayo 1977, volumen 10, nº 10, págs. 79-80.
- 3 A. H. Marchant: The Hall Effect Device in an Industrial Application: *New Electronics*, 13 junio 1978, volumen 11, nº 12, págs. 30-33.
- 4 R. W. Lomax y A. H. Marchant: Designing for the Future: *Electronics Weekly*, 9 agosto 1978, nº 933, págs. 15-18.

A. H. Marchant se incorporó a STC en 1957 como ingeniero, trabajando en transformadores y posteriormente en fuentes de alimentación hasta llegar a ingeniero jefe de la división de rectificadores. En los últimos cinco años ha sido ingeniero de proyecto para los productos de efecto Hall en el UK Components Group, trabajando en contacto con expertos de STL. El Sr. Marchant está calificado como Ing. Jefe, y es miembro del IERE y el BIM.

G. D. Pitt: ver página 106.

Ensayos de relajación de tensiones en materiales utilizados para conductores y resortes

Se han efectuado pruebas de relajación de tensiones para evaluar materiales en los que la relajación podría afectar al rendimiento de los equipos en determinadas aplicaciones. Los resultados sirven para orientar a las compañías de ITT en la selección de metales y aleaciones a utilizar en los sistemas de telecomunicación.

W. R. George

Standard Telecommunication Laboratories Limited, Harlow, Inglaterra

Introducción

Standard Telecommunication Laboratories (STL) está desarrollando un programa de estudios para investigar las propiedades básicas de los materiales. Los resultados sirven para ayudar a las compañías de ITT en la selección de materiales, mejorando así la calidad y el rendimiento de sus productos. En uno de estos estudios, terminado recientemente, se evaluaron las características de relajación de tensiones en metales y aleaciones empleados en hilos conductores, hilos para resortes y resortes de lámina de equipos de telecomunicación. Se desarrolló un nuevo método de medida de tensiones para ensayo de los hilos, y se utilizó una técnica sencilla de flexión con cuña en las pruebas de los resortes de lámina. Además de dar información sobre los materiales existentes, el estudio sirvió

Equipo utilizado en Standard Telecommunication Laboratories para ensayos de relajación de tensiones en hilos.



para obtener nuevos elementos de equipo y determinó procedimientos viables para evaluar materiales que vayan apareciendo.

Efectos de la relajación de tensiones

Cuando se considera el empleo de un metal o de una aleación como material conductor o para resortes, hay que tener en cuenta, junto con su conductividad y coste, sus características de relajación de tensiones. La relajación de tensiones, que es la tendencia de un material a perder su elasticidad y deformarse permanentemente a consecuencia de una deformación elástica prolongada, puede provocar el deterioro gradual de la calidad del contacto de metal con metal y degradar así el rendimiento de un sistema de telecomunicación por la aparición de ruidos.

El hilo conductor puede sufrir relajación en sus conexiones terminales, especialmente en las centrales. Una conexión terminal, ya sea por presión, remoción del aislante, fijación por tornillo o conexión enrollada, puede deteriorarse si la unión pierde elasticidad. A medida que el metal se relaja, el contacto se afloja, crece gradualmente la resistencia y, con ella, el ruido.

Igualmente, conforme pierde tensión el resorte de hilo o de lámina de un relé, disminuye la presión que lo mantiene apretado contra el contacto fijo y aumenta la resistencia. Las variaciones de resistencia producen ruido de fondo.

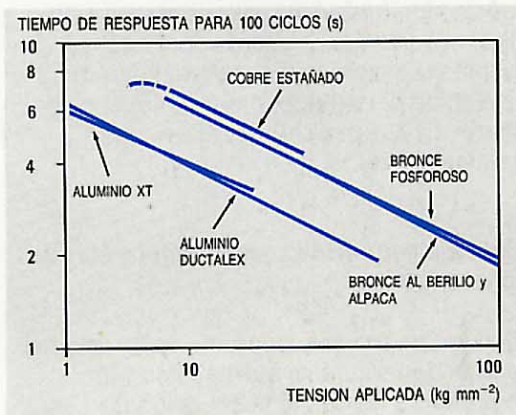
La degradación es lenta, pero al cabo de unos años el problema del ruido puede tornarse grave. La selección de unos materiales para hilos conductores y para resortes que resistan a la relajación de esfuerzos puede mejorar sustancialmente el comportamiento del equipo a largo plazo.

Tabla 1 — Hilos utilizados en pruebas de relajación

Material	Diámetro (mm)	Carga límite (N)	Tensión (N mm ⁻²)	Módulo de elasticidad (hbares*)
Para hilo conductor				
Cobre estañado	0,550	34	146	12,4 × 10 ³
Aluminio XT**	0,490	19,7	105	6,9 × 10 ³
Aluminio Ductalex**	0,515	55,0	264	6,0 × 10 ³
Para resortes				
Bronce fosforoso	0,510	190	910	11,0 × 10 ³
Alpaca	0,510	153	740	13,7 × 10 ³
Bronce al berilio	0,500	210	1070	13 × 10 ³

* Un hbar = 10 N mm⁻²

** Nombre comercial de hilo de aluminio conductor

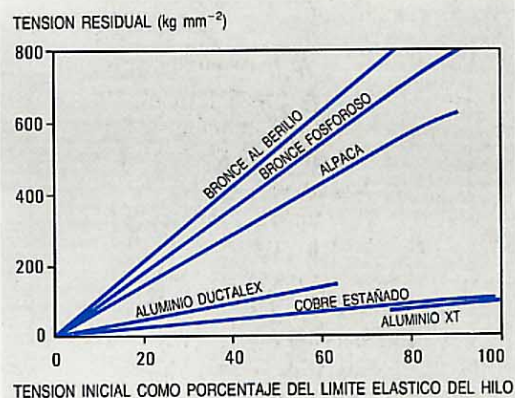
**Figura 1**
Tiempo de respuesta para 100 ciclos en función de la tensión aplicada a los hilos de muestra.

Ensayos de materiales utilizados para los conductores y resortes

Procedimientos de prueba

Los materiales probados para hilos conductores fueron cobre estañado y dos aleaciones de aluminio patentadas; para hilo de resortes se probaron tres aleaciones de cobre: bronce fosforoso, alpaca y bronce al berilio. En la tabla 1 se resumen las propiedades pertinentes de estos materiales.

Se ensayaron tres muestras de cada material a una temperatura nominal de 23°C durante periodos variables entre 2000 y

**Figura 2**
Tensión residual en función de la tensión inicial (% del límite elástico) para diversos hilos de 0,5 mm de diámetro, sometidos a esfuerzo durante 1000 horas a 23°C.

15000 horas. Se empleó una técnica original de observación: cada muestra se sometió a esfuerzo colgando un peso de un extremo. Luego se dio "un tirón electromagnético" al hilo mediante una bobina; después de un tiempo de retardo para que el impulso se estabilizara, la misma bobina midió la frecuencia de vibración¹. Se tiró de nuevo del hilo después de inmovilizarlo para asegurarse de que la tensión inicial no había cambiado. Se repitieron las medidas durante el periodo de pruebas para detectar cambios de frecuencia.

La frecuencia de vibración varía en razón inversa de la longitud y la raíz cuadrada de la masa, y proporcionalmente a la raíz cuadrada de la tensión. Si la longitud y la masa no varían, la tensión es inversamente proporcional al cuadrado del tiempo de respuesta; se considera como tal al tiempo de 100 vibraciones. Para cada muestra se registró este tiempo en función de la carga aplicada al hilo. En representación logarítmica se obtuvo una serie de líneas rectas (Fig. 1).

Los esfuerzos aplicados variaron entre 80 N mm⁻² para un ensayo con aluminio y casi 900 N mm⁻² para bronce al berilio. En algunas muestras las cargas superaron el 90% del límite elástico (punto en el que se presenta deformación inmediata permanente).

Los procedimientos de prueba acusaron un elevado grado de sensibilidad y no fue necesario recurrir a aceleración térmica para obtener resultados útiles.

Resultados de las pruebas

Las curvas de calibración de la figura 1 demuestran que aleaciones con módulos de elasticidad parecidos dan resultados semejantes. Así, las aleaciones de aluminio con bajos módulos de elasticidad van seguidas por las aleaciones de cobre; el cobre estañado puro, con su módulo ligeramente mayor, queda un poco más arriba. Todas las medidas se normalizaron, es decir, se dividieron por el valor inicial (en el momento cero) de la tensión y se registraron como porcentajes.

La figura 2 da los valores de la tensión después de 1000 horas a 23°C en función de la tensión inicial. De los materiales para resortes el mejor comportamiento correspondió al bronce al berilio, seguido de cerca por el bronce fosforoso y la alpaca. Los hilos de aluminio y cobre para conductores retuvieron sólo tensiones de nivel reducido.

Se observaron diferencias relativamente grandes dentro de algunos grupos de muestras, que se atribuyeron a variaciones de las propiedades mecánicas a lo largo del hilo². Se probaron muestras de 28 cm, tomadas de 12 trozos sucesivos de 110 cm de hilo de bronce fosforoso de 0,5 mm de

diámetro. Resultaron variaciones del límite elástico de ± 10 a $\pm 15\%$ (de 125 N), aunque la variación en las cargas de rotura no fue mayor de $\pm 1\%$ (de 198 N).

Ensayos de materiales utilizados para resortes de lámina

Procedimientos de prueba

Los materiales que se probaron fueron la alpaca, el bronce al berilio y dos clases de bronce fosforoso: tiras de sección decreciente de 50 mm de longitud, con un grosor de 0,5 mm y una dureza de 223 kg mm⁻², y resortes de lámina del tipo empleado en un relé de ITT, con un grosor de 0,15 mm y una dureza de 168 kg mm⁻² (tabla 2).

Se utilizó un procedimiento sencillo de flexión con cuña (Fig. 3)^{3,4}. Se aceleró la relajación aumentando la flecha inicial del resorte y la temperatura de envejecimiento. Algunas muestras se deformaron permanentemente al principio de la prueba utilizando una cuña mayor.

Para minimizar los errores por desplazamiento del cero, la cuña deflectora se introducía hasta la línea de fe y se retiraba antes de hacer la lectura inicial. Se hicieron medidas de carga y flecha con resortes de relé y cintas de sección decreciente (la variación de la sección garantizaba un momento de flexión constante). El comportamiento fue lineal, salvo cuando las cargas eran tan altas que producían una flexión permanente o deformación remanente. Las flechas iniciales estaban entre 7 y 13 mm a temperaturas de hasta 150°C durante un máximo de 5000 horas.

Se ensayaron cuñas mayores para determinar el efecto de la deformación plástica sobre la rapidez de relajación de tensiones. También sirvieron estas pruebas para comparar tiras de bronce fosforoso, alpaca y bronce al berilio a 125°C (Fig. 4).

Resultados de las pruebas

En la figura 5 se resumen las condiciones y los resultados de las pruebas. Las tiras de muestra de bronce fosforoso se relajaron más deprisa a temperaturas más altas y cuanto mayor fue la tensión inicial (por ej., a 30°C cuando la flecha inicial superó el 60%, más o menos, del límite elástico).

El límite de flexión del resorte calculado para las tiras de sección decreciente se aproximó mucho al determinado por carga progresiva en una máquina de pruebas automática. Como en el caso del hilo, hubo una relajación bastante rápida de la tensión inicial, que dio paso a un estado más estable al cabo de 100 horas. También se aceleró la relajación al aumentar los niveles de tensión inicial; esto se puso especialmente de

Tabla 2 — Tiras utilizadas en pruebas de relajación

Material de la cinta	Flecha inicial máxima (mm)	Módulo de elasticidad (hbares x 10 ³)	Límite de elasticidad (hbares)	Tensión inicial (hbares)	Flecha máxima del resorte (mm)	Dureza (kg/mm ⁻²)
Bronce fosforoso*	25	10,5	65	82,5	19,74	223
Bronce fosforoso	13	10,5	65	30,0	19,74	223
Bronce fosforoso	13	—	—	33	22,3	168
Alpaca*	25	13,1	60	98,3	15,8	170/210
Bronce al berilio*	25	12,4	105	93	27,7	373

* Se sobrepasó el límite de flexión máximo del resorte produciendo deformación permanente.

manifiesto al someter las tiras a deformación inmediata mediante la inserción de la cuña más grande.

En general, para los resortes de lámina, la relajación de tensiones de la aleación de bronce fosforoso de mayor dureza (223 kg mm⁻²) fue máxima para flechas iguales o próximas al límite de flexión. La relajación del bronce fosforoso más blando (dureza 168 kg mm⁻²) fue menor para flechas similares.

Energía requerida para la relajación de tensiones

Cuando un proceso depende de la temperatura, la dependencia puede a menudo expresarse mediante la ecuación de Arrhenius:

$$P = Ke^{-Q/RT}$$

donde

P = tensión residual expresada en porcentaje de la tensión inicial

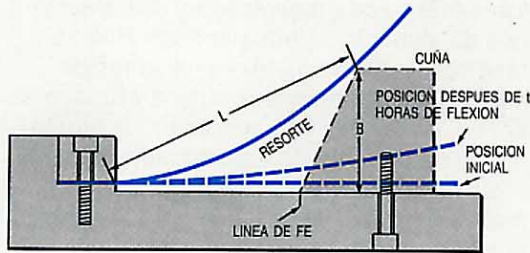


Figura 3 Técnica empleada en los ensayos de relajación de tensiones en resortes de lámina.

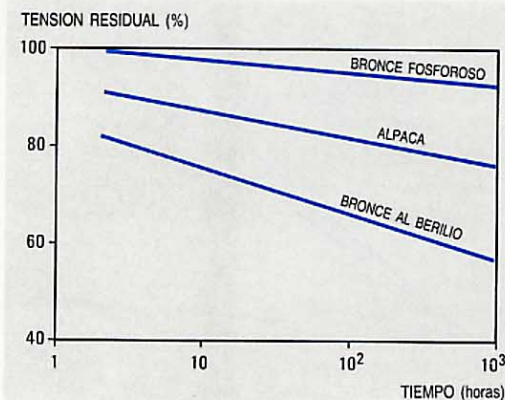


Figura 4 Tensión residual para tiras de sección decreciente (0,5 mm) de bronce fosforoso, alpaca y bronce al berilio, en función del tiempo a 125°C.

Figura 5
Tensión residual para dos tiras de muestra de bronce fosforoso en función del tiempo a diversas temperaturas; la flecha inicial fue inferior a 13 mm.

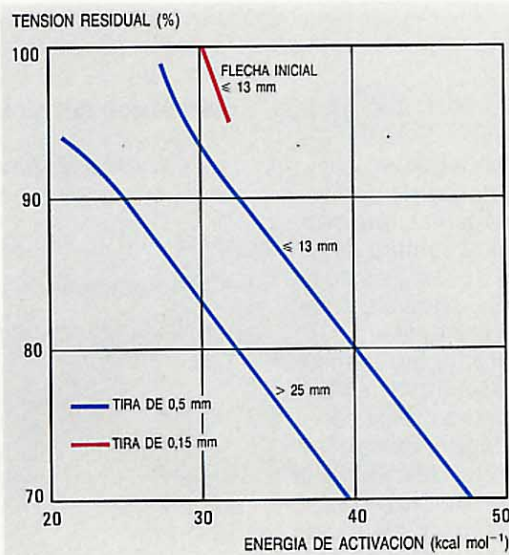
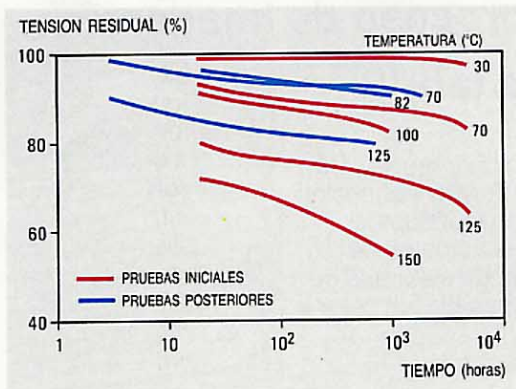


Figura 6
Energía de activación en el proceso de relajación de esfuerzos.

K, R = constantes
 e = constante exponencial
 T = temperatura absoluta
 Q = energía necesaria para activar el proceso en kcal mol^{-1} .

Utilizando valores elegidos idénticos de P , medidos a dos o más temperaturas, es posible calcular la energía que activa la relajación de tensiones. Como muestra la figura 6, la aleación de bronce fosforoso más delgada y más blanda resiste más a la relajación; las muestras deformadas permanentemente antes de la prueba se relajaron con facilidad.

Los valores de energía de activación obtenidos (de 20 a 50 kcal mol^{-1}) se asemejan a los necesarios para la autodifusión o difusión de elementos aleadores en el cobre y a los de la energía requerida para producir vacíos reticulares (30 kcal mol^{-1}).

Este hallazgo apoya la teoría de que la relajación de tensiones es un proceso regulado por difusión similar a la fluencia.

Conclusiones

Los materiales probados en STL pueden ordenarse de la forma siguiente, en cuanto a su capacidad de resistir los efectos de la relajación de tensiones a temperatura ambiente: bronce al berilio, bronce fosforoso, alpaca, aleaciones de aluminio y cobre estañado.

La rapidez de relajación aumenta con la tensión inicial y la temperatura; a temperaturas más altas, la fase primera de relajación rápida parece durar más tiempo. La velocidad disminuye después de un periodo inicial de relajación bastante rápida.

La elevada energía de activación necesaria para el bronce fosforoso más blando confirma que, en el caso de la aleación más blanda, ésta es más resistente a la relajación de tensiones que un material más duro y más fuertemente trabajado en frío. Igualmente, las tiras deformadas plásticamente, que requirieron menos energía de activación, se relajaron con mayor facilidad. La obtención de valores de la energía de activación es un método útil para ordenar los metales y las aleaciones según su comportamiento con respecto a la relajación de tensiones.

Referencias

- 1 S. Mellor: Acoustic Vibrating Strain Meter: Gauge Technique Ltd, Trowbridge, Wiltshire, 1971.
- 2 I. A. Odin (editor): Creep and Relaxation in Metals: 1965, Oliver & Boyd, pág. 308.
- 3 G. R. Fohn y A. Fox: Stress Relaxation in Metallic Springs and Conductors: *Electro Technology*, junio 1965, págs. 85-92.
- 4 A. Fox: Stress Relaxation and Fatigue of Two Electro-mechanical Spring Materials Strengthened by Thermomechanical Processing: *Transactions of the IEEE: Materials and Packaging*, PMP7, n° 1, marzo 1971, págs. 34-47.

Wilbert Ridd George nació en Swansea en 1922. Ingresó en 1939 en la Magnesium Metal Corporation como investigador auxiliar, llegando a ser metalúrgico de taller adjunto en 1945. Se graduó en metalurgia en el Swansea University College. El Sr. George trabajó de 1953 a 1963 en los English Electric Research Laboratories antes de entrar en STL, donde es ahora jefe del departamento de química de superficies. Ha sido miembro de la British Association for Brazing and Soldering desde su constitución y fue nombrado recientemente vicepresidente de la misma.

Sistemas de proceso de imagen en la industria fabril

Los sistemas de proceso de imagen están demostrando ya su valor para la inspección visual de componentes en la industria fabril. Las investigaciones actuales se dirigen hacia el desarrollo de sistemas de visión para autómatas, sensibles al color y tridimensionales.

I. H. Smith

Standard Telecommunication Laboratories Limited, Harlow, Inglaterra

Introducción

Gracias a los adelantos conseguidos en microprocesadores y memorias de semiconductores existen ya máquinas que ven, mediante la conexión de una cámara de televisión a un procesador y el análisis de la imagen observada. Aunque estos sistemas pueden sólo remedar una parte de las facultades del ojo y del cerebro humanos, hay muchas tareas visuales simples en la industria fabril que podrían realizarse con sistemas de proceso de imagen. Entre ellas están la inspección, el control de calidad, la identificación y clasificación de piezas, el control de máquinas y, en menor grado, la observación de eventos en un medio hostil al ojo humano. Con la aparición de brazos mecánicos fiables y programables, los autómatas dotados de visión vienen a ser una solución práctica en los sistemas de fabricación automatizados.

El mecanismo de la visión humana se da muy por supuesto hasta que se intenta emular sus procesos con algoritmos de programación y diseñar un procesador capaz de ejecutar dichos algoritmos dentro de una escala de tiempos útil.

La mayoría de los sistemas de proceso de imagen utilizados en la industria hacen tal proceso en dos dimensiones, con una gama de 2 a 256 tonos grises (es decir, niveles de oscuridad o luminosidad). Se están investigando sistemas capaces de analizar información en color¹ y de identificar formas en tres dimensiones², pero su uso no se ha extendido todavía.

Se han comercializado sistemas de visión de aplicación general, y su empleo en la industria se extiende a medida que disminuyen los costes y se aprecian más y más sus posibilidades. Sin embargo, es mucho más usual que los sistemas de proceso de imagen realicen una sola tarea sin intervención de operador. Esto conduce a la necesidad de sistemas flexibles de desarrollo, aptos para evaluar un problema potencial y formular la solución apropiada.

Elementos del sistema

Los sistemas de proceso de imagen constan de cuatro elementos principales (Fig. 1):

- sistema de captación de la imagen
- preprocesador de señales
- procesador principal de información (ordenador)
- salida.

La importancia relativa de cada elemento depende de su tarea en cuanto a complejidad de la imagen, velocidad requerida, etc.

Captación de la imagen

Este sistema consta generalmente de los dispositivos de iluminación y ópticos necesarios para crear la imagen y de un sensor que convierte ésta en información electrónica. Con frecuencia se subestima la importancia de la captación de imagen. Múltiples problemas de análisis de la imagen pueden simplificarse mucho generando una imagen adecuada mediante una de las numerosas técnicas existentes (por ej., el empleo de dos espejos detrás de un objeto cilíndrico para obtener vistas de todo su contorno)³. La imagen que parece más adecuada para el ojo humano puede no ser la mejor para su captación por una cámara de televisión y su posterior análisis por procesador.

Las técnicas de iluminación corrientes suelen ser válidas. La iluminación a contraluz, cuando es factible, se emplea para crear siluetas, ideales para la identificación de objetos. Se necesita iluminación por reflexión para obtener información de la textura de las superficies, y puede ser la única forma viable de iluminación. La luz ambiental no suele ser apropiada por su variabilidad y problemas de sombras y reflejos. Se usa a veces la luz de láser, pero normalmente ésta exige unos sistemas de exploración mecánicos o de óptica más complejos. No obstante, se utilizan fuentes

de luz láser en sistemas en desarrollo para observación en tres dimensiones⁴ e inspección de circuitos impresos⁵.

Los sensores, que convierten la información óptica en electrónica, se clasifican en tres categorías principales:

- dispositivos bidimensionales
- dispositivos unidimensionales
- sensores de punto único.

Los que se utilizan en la industria responden fundamentalmente a la intensidad total de la luz incidente (es decir, de forma parecida a la televisión en blanco y negro), aunque se trabaja cada vez más en el análisis de imágenes en color.

Los sensores bidimensionales son los más corrientes, y comprenden las cámaras de tipo vidicón normal (televisión) y los CCD (dispositivos acoplados por carga). La cámara vidicón normal, o sus variantes especializadas, es adecuada para muchas aplicaciones; no es cara y se encuentra fácilmente. Sus desventajas principales son su menor precisión — frente a los dispositivos CCD — en aplicaciones que requieren medidas precisas de dimensiones, y el que la velocidad de entrega de datos (definida por la frecuencia de exploración de líneas) sea en general demasiado alta para interconexión directa con sistemas de procesadores, si bien esto admite solución.

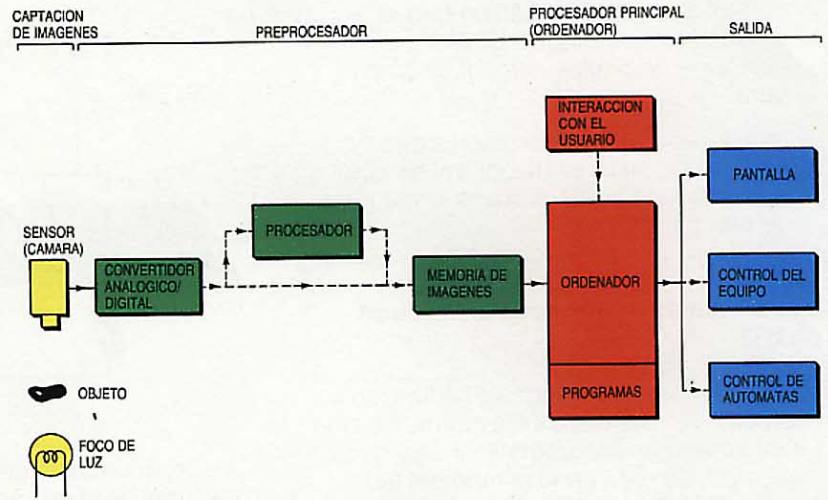
Han aparecido recientemente cámaras bidimensionales CCD, aunque todavía sean algo caras. Por su precisión y su control de la velocidad de entrega de datos es probable que reemplacen a las vidicón en cuanto descienda su coste.

Los dispositivos unidimensionales (generalmente del tipo CCD de bajo coste) se utilizan sobre todo cuando hay un segundo eje de movimiento proporcionado por el desplazamiento de la vista que se está analizando (por ej., objetos sobre una cinta transportadora, trenes laminadores de bandas metálicas). Estas aplicaciones están también indicadas para técnicas de iluminación por bandas⁶.

Los sensores de punto único por lo general sólo se usan en sistemas ópticos de exploración, y existen en numerosas variantes, desde simples fotodiodos a fotomultiplicadores.

El preprocesador de señales

En casi todos los casos, la salida del sensor de imagen es una tensión analógica de un valor que depende de la intensidad luminosa en el punto a que corresponde. Casi siempre, la primera etapa de preproceso convierte esta tensión analógica en una serie de códigos digitales que puedan ser descifrados por un procesador. La imagen total se descompone normalmente en una matriz cuadrada de *elementos de imagen* (pixels), generalmente entre 64 × 64 y



512 × 512. Cada elemento de imagen puede representarse en forma digital por un 1 ó un 0 (blanco o negro), o por un número que corresponda a la tonalidad de gris, normalmente entre 0 y 256.

Después de su digitalización, la información puede pasar directamente al procesador principal o sufrir otro análisis, bien para reducir el volumen de datos enviados al procesador principal (un conjunto de 256 × 256 pixels con tonos de gris entre 0 y 256 ocupa 64 k-octetos), bien para ejecutar con el equipo algunos algoritmos del análisis que reduzcan el tiempo total de proceso.

La información digital de la imagen se pasa normalmente al procesador principal a través de una memoria de imágenes, que en esencia es un bloque de memoria de alta velocidad a la que el procesador accede cuando es necesario. La información procedente de la cámara se introduce en la memoria bajo control del equipo, con una base de tiempos obtenida de las señales de sincronización de la cámara y de un reloj que funciona a una frecuencia compatible con el tamaño del conjunto de elementos de imagen que se están registrando.

Procesador principal

La misión del procesador principal es la ejecución de una gran variedad de algoritmos para obtener información de la imagen que se le ofrece. Estos algoritmos pueden proporcionar la identificación de piezas, su orientación, decisiones sobre calidad, etc.

El procesador puede ser un microprocesador pequeño o un miniordenador potente, dependiendo de las necesidades de un sistema dado. Pueden existir programas apropiados, pero en muchos casos habrá que desarrollar algoritmos específicos para tener la solución óptima.

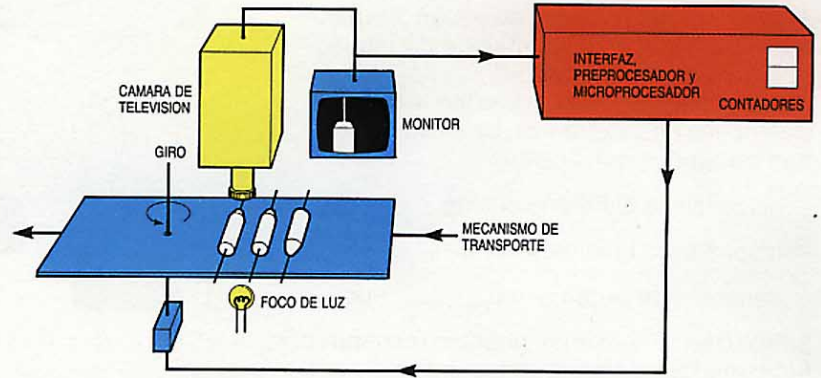
Salida

Los resultados del análisis de la imagen pueden utilizarse de diversas formas:

- información sobre una pantalla

Figura 1
Elementos básicos de un sistema de proceso de imagen.

- control de equipo mecánico (por ej., activación de un chorro de aire para la selección de piezas, control de soldadura^{7, 8})
- transferencia de información a otro equipo (ej., sistema de control de autómatas⁹ o realimentación a controladores de procesos).



Los sistemas de proceso de imagen en STL

En los últimos cuatro años se ha llevado a cabo en STL (Standard Telecommunication Laboratories) un programa de investigación básica y desarrollo en el campo del tratamiento de la imagen por procesadores y su posible uso dentro de las unidades de fabricación de ITT. Durante las etapas iniciales de este proyecto, no se disponía en el mercado de sistemas de proceso de imagen de aplicación general a precios razonables. Por consiguiente, se pensó que el desarrollo propio era el mejor modo de adquirir experiencia para satisfacer las necesidades de los usuarios potenciales de las compañías de ITT. El sistema de visión de STL se diseñó para cumplir los requisitos específicos de aquéllos, lo que a menudo supuso el tratamiento de problemas de análisis de imagen relativamente simples a elevadas velocidades y a un coste razonable. Utilizando el sistema de desarrollo de laboratorio se evalúan los problemas previsible con el fin de obtener una solución óptima, en cuanto a equipo y programación, para la instalación definitiva en fábrica.

Sistema de desarrollo

El sistema de visión de STL se basa en el uso de un procesador PDP11/34A y una cámara vidicon corriente, aunque éstos no están conectados entre sí de la forma normal; en lugar de pasar información al procesador a través de una memoria de imágenes, con su consumo de tiempo inherente, se ha construido un interfaz que permite cargar una imagen de 256×256 pixels con dos tonos de gris en la memoria del procesador, en tiempo real y sin modificar la cámara. La imagen analizada se presenta simultáneamente en monitores normales en tres momentos:

- salida analógica directa de la cámara
- después de la asignación de los dos tonos grises por umbrales
- una vez tratada por el procesador.

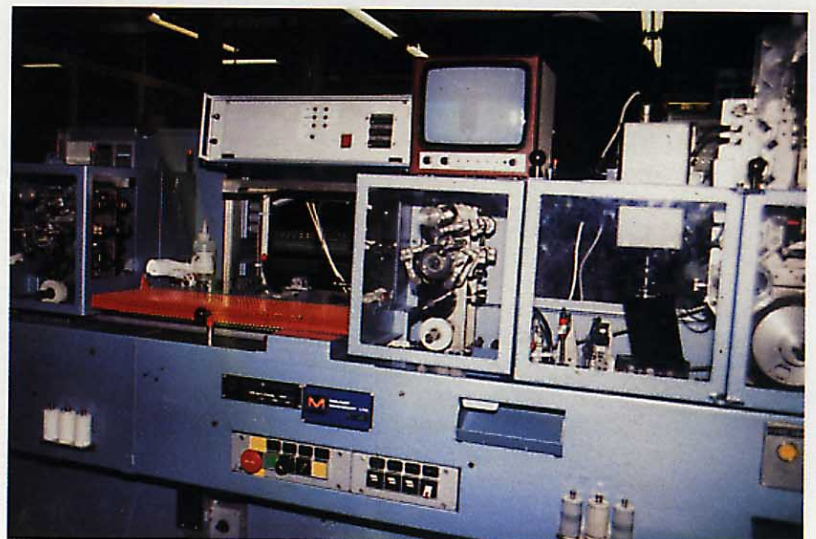
Gracias al interfaz utilizado entre la cámara y el procesador, los datos llegan a la memoria en forma de bitios (es decir, cada bitio de una palabra u octeto corresponde a un elemento de imagen; el estado de ese bitio indica si el elemento de imagen correspondiente era blanco o negro).

La programación de análisis de la imagen está organizada en base a subrutinas modulares. Puede utilizarse cualquier subrutina para actuar sobre la imagen captada mediante una rutina interactiva de teclado y presentar el resultado en pantalla. Las subrutinas de tratamiento de la imagen están escritas en lenguaje ensamblador (MACRO 11) para optimizar la velocidad de ejecución y permitir la fácil manipulación de los datos en forma de bitios. Se ha construido una biblioteca de rutinas normales, que comprenden operaciones corrientes tales como detección de bordes, cálculo del perímetro y la superficie de un objeto con independencia de su orientación, filtros y la detección e identificación de objetos. Se escriben a menudo rutinas especiales a fin de conseguir la solución óptima para aplicaciones específicas.

La combinación de la captación de imágenes en tiempo real y de la programación modular en lenguaje ensamblador significa que el sistema de visión de STL puede realizar operaciones de tratamiento de la imagen más aprisa que la mayor parte de los sistemas de desarrollo existentes en el mercado. Además de utilizarse como herramienta de desarrollo para evaluar aplicaciones potenciales, el sistema de visión de STL está conectado a un pequeño brazo

Figura 2
Sistema de STL diseñado para orientar correctamente componentes axiales en una línea de producción automatizada.

Figura 3
Equipo de reglaje y disposición en canana de componentes axiales, basado en el sistema de la figura 2.



automático, permitiendo hacer algunos trabajos de visión automatizada básica.

Aplicaciones

Se han emprendido numerosos estudios de factibilidad empleando el sistema de STL; ya hay un sistema en línea y un segundo está en pleno desarrollo.

Orientación de componentes axiales

El sistema operacional asegura la orientación correcta de los componentes axiales respecto a la polaridad eléctrica antes de entrar en la canana para su uso en un equipo automático de ensamble.

La máquina admite tres tamaños diferentes de componentes, cuya polaridad viene dada por un bisel en un extremo del componente. El sistema de inspección tiene en cuenta automáticamente los diferentes tamaños sin intervención del operador y puede atender con facilidad a la máxima capacidad de trabajo del equipo de alimentación y disposición en canana, que es de unas 7000 unidades a la hora (aproximadamente dos por segundo). En la figura 2 se muestra un diagrama del sistema.

Dicho sistema de inspección consta de una cámara vidicon normal conectada a un preprocesador de diseño especial que extrae información de cada "línea" de vídeo en tiempo real. El preprocesador pasa luego el resultado a un microprocesador equipado en una sola placa al completarse cada línea de vídeo, eliminando así la necesidad de una memoria de imágenes ya que el microprocesador puede tratar fácilmente el volumen de datos de entrada que le proporciona el sistema.

La cámara va montada sobre el sistema transportador de los componentes (Fig. 3), debajo del cual hay un foco de luz difusa que produce una imagen en silueta. La figura 4 muestra el componente e la imagen de cada extremo del mismo dada por el procesador (obtenidas con el sistema de laboratorio al principio del desarrollo). Se utiliza una luz interior (que no se muestra en la figura 3) para asegurarse de que la luz ambiental no produzca efectos indeseables.

Durante cada ciclo de inspección el microprocesador ejecuta un algoritmo de programación, contenido en una memoria de sólo lectura programable eléctricamente, el cual determina la orientación del componente interpretando si pasa por el campo de observación de la cámara un extremo con bisel o sin bisel, y controla luego el mecanismo de elevación y giro utilizado para reorientar el componente en caso necesario.

Se espera ampliar el sistema para abarcar una parte de la inspección visual de cada componente. En la figura 5 se muestra un defecto debido a la aparición de elementos metálicos internos a través de la cubierta exterior de plástico. Esta figura muestra

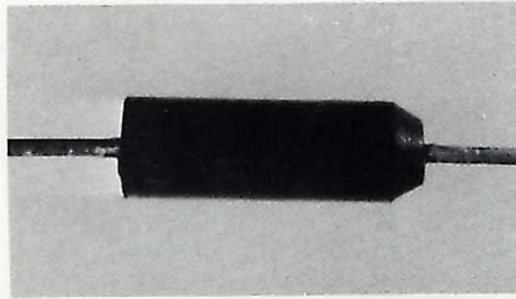
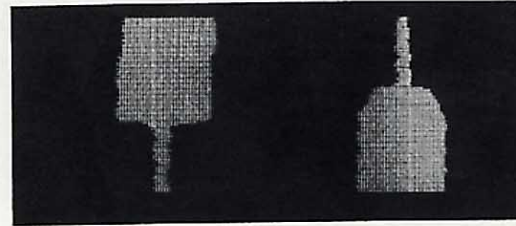


Figura 4
Inspección de componentes mediante el proceso de imagen: componente axial con un extremo biselado (arriba), e imágenes por procesador en silueta de los extremos no biselado (izquierda) y biselado (derecha).



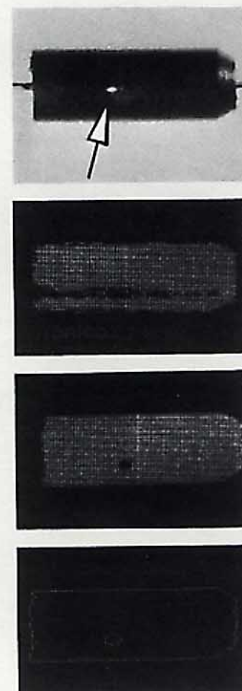
también diversas fases del tratamiento de la imagen para aislar el defecto, las cuales se obtuvieron en STL iluminando los componentes por reflexión. Evidentemente, en cada aplicación industrial habría que utilizar una técnica apropiada para inspeccionar toda la superficie del componente.

Alineamiento de circuitos integrados

El segundo sistema de proceso de imagen que se desarrolla en STL asegurará el posicionamiento exacto de las conexiones de hilos de oro sobre placas de conexión situadas en la superficie de un circuito integrado complejo. Actualmente los circuitos integrados se fijan al armazón móvil de una canana mediante un adhesivo termoes estable, y luego pasan por un equipo automático de conexión de hilos. Por desgracia, los circuitos integrados tienden a moverse ligeramente con relación al armazón móvil mientras se cura el adhesivo. Así, pues, el circuito puede no estar en la posición correcta cuando pase por el equipo de conexión, dando lugar a un número bastante crecido de unidades defectuosas.

El sistema en desarrollo (Fig. 6) determinará la posición de las placas de conexión cuadradas de $100 \mu\text{m}$ de lado con una precisión mayor de $15 \mu\text{m}$, y controlará unos motores de velocidad gradual para ajustar la posición del equipo de conexión a la de cada circuito integrado. A fin de conseguir la precisión necesaria, se ha desarrollado un accesorio especial de visión microscópica para la cámara de televisión, de modo que una parte considerable del campo visual de la cámara se llene con una sola placa de conexión. Un sistema tal no permite evaluar el movimiento rotacional, pues todas las placas de conexión se encuentran situadas sobre los dos lados cortos del dado rectangular. Por ello, se ha incorporado al sistema óptico microscópico normal un divisor de la imagen que permite observar a la vez dos placas de conexión, aparentemente yuxtapuestas aunque de hecho

Figura 5
Detección de defectos por el proceso de imagen. De arriba a abajo: defecto en la cubierta de un componente; imagen inicial; imagen después de la asignación de tonos por umbrales; imagen después de la detección de los salientes.



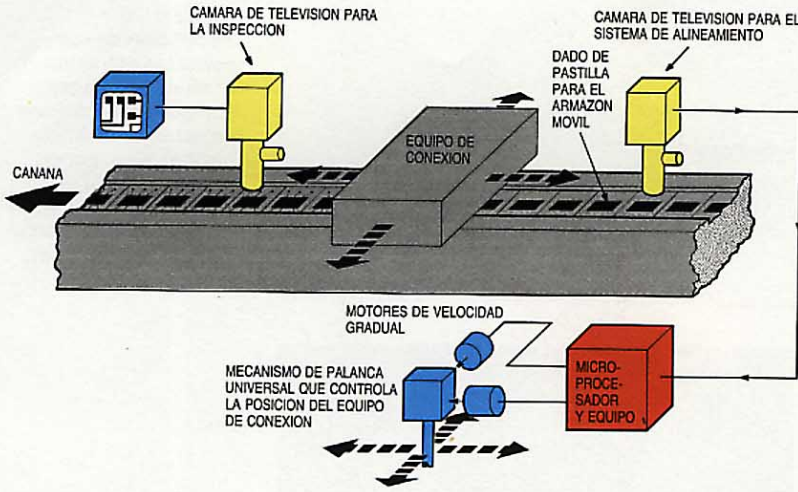


Figura 6
Esquema del equipo automático de alineamiento de componentes.

están separadas 5 mm. El procesador analiza esta doble imagen de las placas y extrae información sobre el desplazamiento ortogonal y rotacional respecto a un origen predeterminado.

Las principales ventajas de este sistema sobre los equipos de conexión de hilos con ajuste óptico que hay en el mercado, son el poder añadirse a un equipo de conexión ya instalado y el evaluar realmente la posición de la placa de conexión en lugar de la del borde del dado (determinando también el desplazamiento rotacional). Además, la tecnología desarrollada en STL hace que se pueda diseñar y construir este tipo de equipo en la Compañía propia, con una considerable reducción de coste respecto a los sistemas hoy disponibles.

Conclusiones

Los sistemas de proceso de imagen serán casi con certeza cada vez más importantes en la futura automatización de la industria fabril. Estos sistemas tienen el potencial necesario para aumentar la capacidad y la fiabilidad de la inspección y para mejorar la flexibilidad de otros equipos automatizados, como los brazos automáticos. Las aplicaciones de la tecnología actual seguirán creciendo a medida que los costes se reduzcan y se reconozcan plenamente las posibilidades de estos sistemas.

La evolución de los equipos existentes permitirá abordar una gama más amplia de aplicaciones. Se están investigando activamente tres áreas principales de desarrollo: autómatas con visión, sistemas sensibles al color y visión en tres dimensiones (es decir, la capacidad de reconocer un objeto en el espacio en vez de en un plano). La introducción de estas técnicas dependerá de su economía y de la disponibilidad de una tecnología apropiada.

Referencias

- 1 D. M. Connah y C. A. Fishbourne: The Use of Colour Information in Industrial Scene Analysis: *Proceedings of the First International Conference on Robot Vision and Sensory Controls*, Stratford-upon-Avon, 1-3 abril 1981, págs. 340-347.
- 2 J. Slavik: Three-Dimensional Optical Sensor Design for Industrial Robots: *Proceedings of the First International Conference on Robot Vision and Sensory Controls*, Stratford-upon-Avon, 1-3 abril 1981, págs. 255-262.
- 3 J. C. M. Santos, A. Campilho, A. J. Padilha y B. G. Batchelor: Automatic Grading of Bottle Corks: *Proceedings of the Fifth International Conference on Automated Inspection and Product Control*, Stuttgart, 24-26 junio 1980, págs. 425-436.
- 4 C. J. Page y H. Hassan: Non-Contact Inspection of Complex Components using a Rangefinder Vision System: *Proceedings of the First International Conference on Robot Vision and Sensory Controls*, Stratford-upon-Avon, 1-3 abril 1981, págs. 245-254.
- 5 J. Bedford: The Use of the Laser for the Inspection of Printed Circuit Boards and Laminates: *Symposium of Circuit Technology*, Newcastle, 19 noviembre 1979.
- 6 C. G. Dodd and L. Rossol: Computer Vision and Sensor-Based Robots: Nueva York, Plenum, 1979, ix, 253 págs.
- 7 I. Masaki, R. R. Gorman y D. C. Jordan: How Vision is Helping Unika take the Correct Welding Path: *Sensor Review*, abril 1981, volumen 1, n° 2, págs. 89-92.
- 8 E. Johnston: Spray Painting Random Shapes using CCTV Camera Control: *Proceedings of the First International Conference on Robot Vision and Sensory Controls*, Stratford-upon-Avon, 1-3 abril 1981, págs. 187-192.
- 9 B. Carlisle, S. Roth, J. Gleason y D. McGhie: The PUMA/VS-100 Robot Vision System: *Proceedings of the First International Conference on Robot Vision and Sensory Controls*, Stratford-upon-Avon, 1-3 abril 1981, págs. 149-160.

Ian Smith nació en Hereford, Inglaterra, en 1956. Estudió física y meteorología en la Reading University, donde se graduó en 1978. Ingresó entonces en STL, donde ha trabajado en el desarrollo de un sistema de visión por procesador y en la introducción de esta tecnología en las compañías fabricantes de ITT.

Pantallas de cristal líquido

Las pantallas de cristal líquido han alcanzado un nivel de desarrollo en el que pronto podrán reemplazar, en algunas aplicaciones, a los tubos de rayos catódicos.

P. W. Ross

Standard Telecommunication Laboratories Limited, Harlow, Inglaterra

Introducción

Los cristales líquidos se descubrieron a finales del siglo pasado, pero sólo en las dos últimas décadas se ha visto la posibilidad de emplearlos como pantallas. En los años 80 los desarrollos en materiales y en los métodos de empleo de los cristales líquidos hacen posible la realización de pantallas complejas. El objetivo de hallar una pantalla plana que sustituya al tubo de rayos catódicos es ya asequible en muchas aplicaciones.

Los cristales líquidos son líquidos con cierta ordenación en orientación y/o posición. Una gran variedad de materiales orgánicos presentan una fase de cristal líquido entre la fase sólida y la líquida isotrópica normal. Los diferentes tipos de cristal líquido se clasifican por el tipo de ordenación, como se muestra en la figura 1:

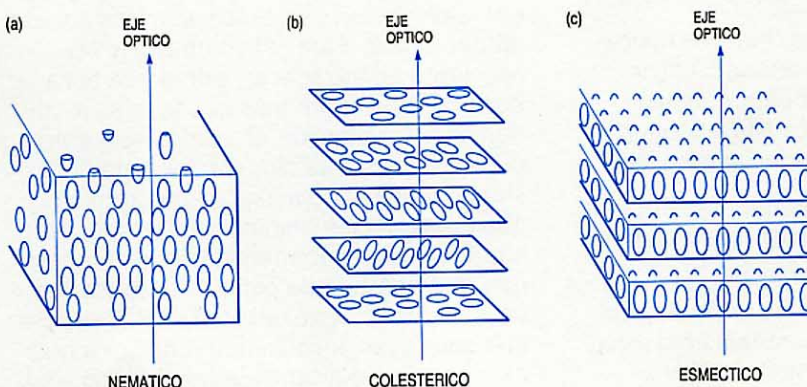
- Los cristales líquidos nemáticos muestran sólo una ordenación de orientación. La forma alargada de las moléculas impide la rotación, de ahí que las moléculas tiendan a situarse con sus ejes largos en la misma dirección.
- Los cristales líquidos colestéricos son similares a los nemáticos, excepto en que cada molécula tiende a situarse formando un pequeño ángulo con su vecina. Aunque localmente se comporten de un modo muy similar a los nemáticos, los ejes moleculares describen una hélice a través de la muestra.

- Los materiales esmécticos tienen un orden orientacional semejante a los nemáticos, pero además se ordenan en posición con tendencia a formar capas.

Debido a la ordenación de las moléculas, en grandes muestras también se observan algunas propiedades moleculares. Para la realización de pantallas son particularmente importantes la anisotropía dieléctrica y la birrefringencia. La primera se debe a los diferentes momentos del dipolo inducido longitudinal o transversalmente al eje molecular. En un campo eléctrico, las moléculas tienden a alinearse con el momento del dipolo mayor paralelo al campo, permitiendo la reorientación eléctrica de las capas de cristal líquido. La birrefringencia se debe a los diferentes índices de refracción a lo largo de los ejes moleculares, y es importante en los dispositivos nemáticos y colestéricos para guiar las ondas de luz siguiendo estructuras helicoidales.

Actualmente se emplean con frecuencia las tres clases de cristales líquidos en las pantallas complejas. Los nemáticos se emplean mucho para lograr el *efecto de rotación nemática*; las mezclas colestéricas-nemáticas con tintes dicróicos disueltos son importantes para combinarlas con sustratos semiconductores; y los esmécticos con o sin tintes se emplean en pantallas de memoria.

Figura 1
Estructuras de cristales líquidos: a) nemático, b) colestérico, y c) esméctico.



Modos de presentación

Efecto de rotación nemática

Es una tecnología en maduración, por cuanto el comportamiento de los dispositivos parece aproximarse a los límites teóricos. El funcionamiento de este tipo de dispositivo se muestra en la figura 2. Un campo eléctrico alterno elimina el efecto de rotación del guiaoonda en el líquido nemático. Al suprimir el campo la rotación se restablece, alineándose las moléculas nemáticas con las superficies interiores (especialmente tratadas) de la célula. El campo se aplica por medio de conductores transparentes de óxido de indio dopado con estaño.

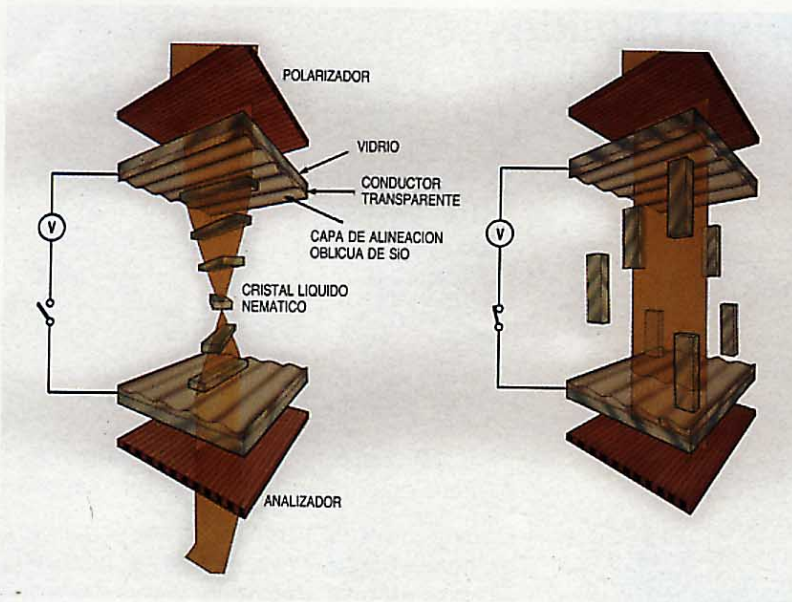


Figura 2
Principio del efecto de rotación nemática.

Para maximizar la complejidad de la información en la pantalla y reducir el número de circuitos de excitación e interconexiones, se intenta multiplexar las conexiones a los elementos del cristal líquido. Los conductores se pueden disponer en forma de matriz con electrodos separados para las filas y columnas. El cristal líquido responde a la tensión eficaz, y se aplican las tensiones de datos y de muestreo de modo que todos los elementos oscuros (activados) tengan un cierto nivel de tensión y los elementos claros (desactivados), tensiones de excitación menores. El efecto electro-óptico debe discriminar entre estos dos niveles. Debido a la naturaleza de la estructura en guisaonda y a la forma en que responde a la tensión, hay diferentes respuestas ópticas para distintos ángulos de visión. El resultado es que a mayor grado de multiplexación se reduce el margen de ángulos de visión posibles. En los últimos 20 años se han efectuado intensas investigaciones sobre la síntesis de nuevos materiales y los requisitos de un óptimo comportamiento óptico. Normalmente se requieren complejas mezclas de unos cuantos materiales de cristal líquido. Para cada aplicación puede ser necesario optimizar ciertos parámetros de comportamiento de la célula, incluyendo:

- Anisotropía dieléctrica: muchas aplicaciones requieren que la tensión de trabajo sea pequeña para poder emplear baterías primarias. Una alta anisotropía dieléctrica reduce la tensión necesaria.
- Viscosidad: en casi todos los sistemas, la viscosidad ha de ser baja para obtener respuestas rápidas.
- Constantes elásticas: los cristales líquidos presentan un comportamiento elástico, pudiendo así transmitir un par a

través de todo su volumen. Los valores de las constantes elásticas afectan de modo complejo a la capacidad de multiplexar el material, dependiendo de la configuración de la célula de pantalla.

- Margen de temperaturas: se emplean mezclas eutécticas de materiales para maximizar el margen de temperaturas de operación. Con los materiales disponibles actualmente, el límite inferior de temperatura viene usualmente fijado por un rápido incremento de la viscosidad (largos tiempos de respuesta).

El límite superior de temperatura para el efecto nemático de rotación viene impuesto por la máxima temperatura de servicio de la hoja polarizadora situada en las superficies anterior y posterior de la pantalla. El límite presente de multiplexado viene a ser de 24 vías para mantener un cono de visión de 45° (que se considera aceptable para la mayoría de las aplicaciones de las pantallas alfanuméricas). Ello permite mostrar en una sola pantalla hasta seis líneas de información alfanumérica, ya que en una célula se pueden construir dos matrices de visualización independientes.

Efectos de colestéricos teñidos

Se pueden lograr útiles efectos electro-ópticos empleando tintes dicróicos disueltos en cristales líquidos colestéricos. El funcionamiento de este dispositivo se muestra en la figura 3. La molécula de tinte absorbe sólo la luz que tenga su vector de polarización paralelo al eje molecular largo (absorción). El cristal líquido, al ser excitado, ordena el tinte de forma similar al efecto nemático de rotación. En el estado de no excitación, la luz se guía débilmente a lo largo de la hélice colestérica, que tiene un paso típico de 3 μm . En este estado la luz es en gran parte absorbida por las moléculas de tinte. Cuando se aplica una tensión alterna (p. ej., 10 V sobre una capa de 10 μm) la estructura del cristal líquido cambia a la de un líquido nemático. Por esta razón, este efecto se llama normalmente *efecto de cambio de fase de colestérico teñido a nemático*. En esta orientación hay poca absorción de luz por las moléculas de tinte y el cristal líquido aparece claro. Para esta pantalla no se requieren polarizadores, por lo que brilla considerablemente más que las de efecto nemático de rotación. El comportamiento con la temperatura también ha mejorado, siendo más rápido a bajas temperaturas que en la rotación nemática. La temperatura superior viene determinada por la temperatura de transición de colestérico-a-isotrópico, que puede alcanzar los 100°C. Debido a que trabaja por absorción del tinte, el ángulo de visión es prácticamente hemisférico.

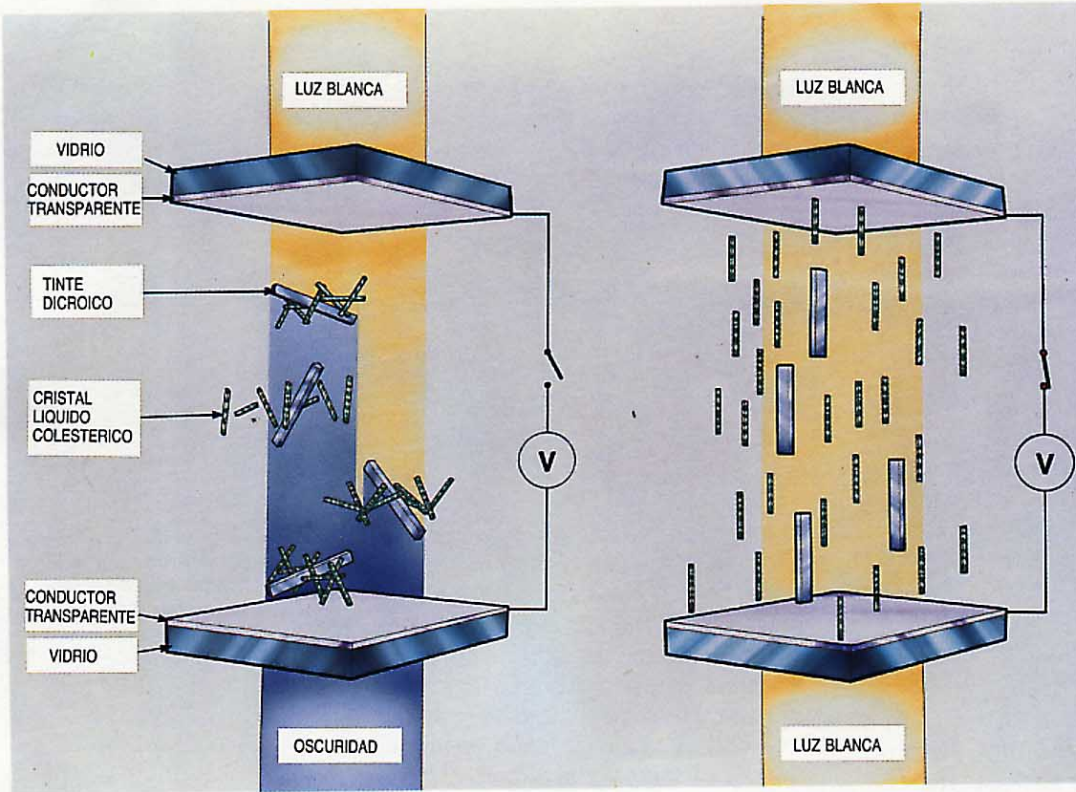


Figura 3
Efecto de cambio de fase de colestérico teñido a nemático.

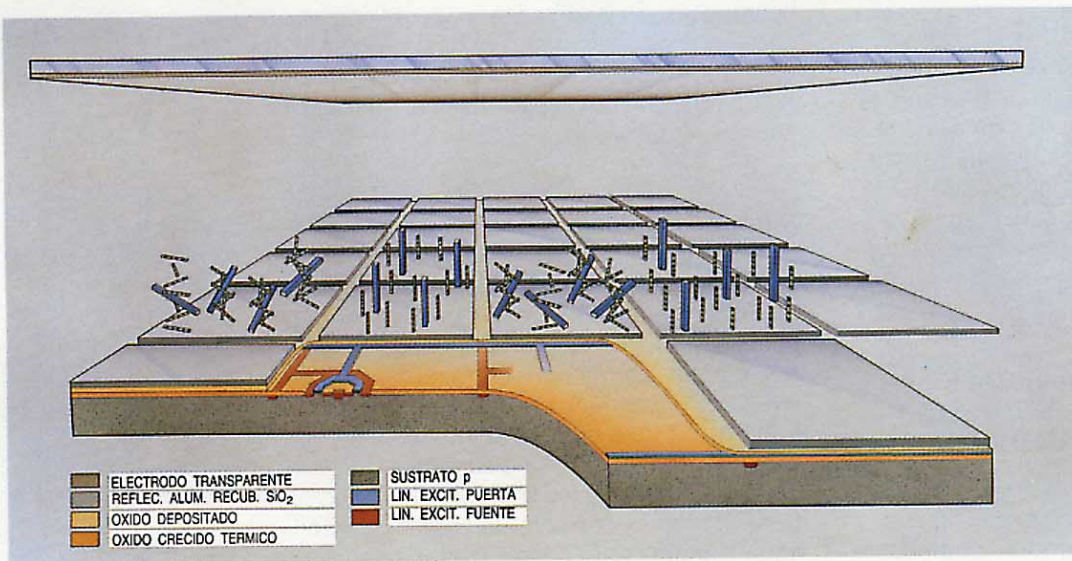


Figura 4
Cambio de fase de un cristal teñido sobre pantalla de silicio.

Los fuertes efectos de histéresis en la característica de transmisión de la luz en función de la tensión, hacen que este modo de pantalla no sea apropiado para un multiplexado de más de tres vías. Sin embargo, es muy interesante emplear este efecto en contacto directo con un sustrato de silicio en el que se incorporen todos los circuitos de excitación. Cada elemento de la imagen se excita directamente desde un circuito sencillo en el silicio (Fig. 4).

Este tipo de pantalla se está desarrollando en Standard Telecommunication Laboratories para ser empleado en pantallas visuales de mano. El objetivo es lograr un alto con-

traste perceptible con el máximo de brillo de los elementos claros para aproximarse a la calidad de la impresión sobre papel. Es necesario conseguir tiempos de respuesta lo suficientemente rápidos y un amplio margen de temperatura, manteniendo la compatibilidad con las tensiones de excitación disponibles en el sustrato de silicio.

Cuando se elige una mezcla de cristales líquidos deben tenerse en cuenta varios factores:

Paso de la hélice. Un paso de hélice corto para el colestérico conduce a mayores contrastes y tiempos de respuesta más

rápidos, pero incrementa la tensión de trabajo. El paso de la hélice se puede ajustar variando con nemáticos el grado de dilución.

Concentración de tinte. Existe una concentración de tinte óptima para lograr la máxima percepción de contraste. Si es demasiado pequeña produce una sensación de gris sobre blanco, mientras que si es excesiva se percibe como negro sobre gris oscuro. El nivel exacto puede depender de las condiciones de visión: las iluminaciones fuertes permiten colores más oscuros.

Parámetro de ordenación del tinte. Es una medida del grado de ordenación de las moléculas de tinte en el medio colestérico, así como de la absorción anisótropa. Se precisan valores elevados, y ello ha exigido considerables esfuerzos. Las antraquinonas son unos materiales que presentan altos parámetros de ordenación de tinte, junto con estabilidad fotoquímica y solubilidad en cristales líquidos.

Birrefringencia. Se requiere una baja birrefringencia para minimizar el efecto de guíaonda en el estado de rotación y así conseguir una máxima absorción del tinte.

Se aplican a las pantallas colestéricas teñidas los mismos parámetros del material que para el efecto nemático de rotación, si bien de forma modificada debido a la diferente estructura física. Las distintas aplicaciones requieren una cuidadosa selección de todos estos parámetros. El comportamiento típico que se puede conseguir con estas pantallas es:

Relación de contraste: 4 a 1 (periódicos 5 ó 6 a 1)

Tiempo de respuesta: menor de 25 ms, para actuación o desactuación a 25°C
Brillo en actuación: 50% de una tarjeta blanca.

Estos valores son para una excitación de 12 V (compatible con la proporcionada por un sustrato de silicio) y en modo de reflexión.

Diseño de reflectores

Cuando un cristal líquido se pone en contacto directo con un reflector surge un interesante problema. Para el caso de un sustrato de silicio activo el reflector es aluminio. (La plata tiene mayor reflectividad, pero es incompatible con el silicio.) No es deseable una superficie reflectante especular, ya que las reflexiones de objetos se confundirían con la información que se desea presentar. Alterando las condiciones de deposición del aluminio se pueden

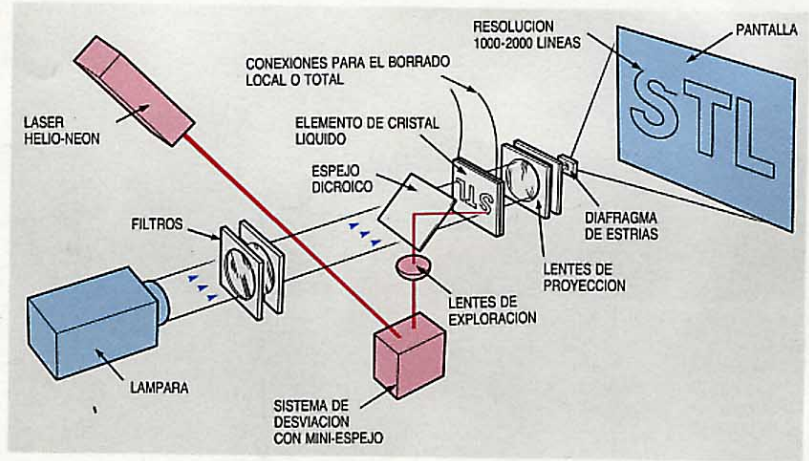


Figura 5
Sistema de proyección esmético direccionado por láser.

lograr diferentes acabados superficiales, desde especular a blanco mate. Sin embargo, el blanco mate se oscurece sensiblemente al ser mojado por el cristal líquido, entre otras razones porque la luz que llega al reflector desde el cristal líquido de alto índice de refracción se dispersa isotrópicamente. Los rayos de luz cuyo ángulo con la normal es superior al ángulo crítico no pueden escapar del medio hacia el observador y son finalmente absorbidos. Debe hallarse un compromiso entre la especularidad y la reflexión difusa. Se está probando un método consistente en grabar una estructura reticular bidimensional sobre la superficie del aluminio.

Sustrato de silicio

El efecto de cambio de fase de colestérico teñido a nemático se diseña para ser compatible con la tecnología estándar de proceso de obleas semiconductoras. En particular, en STL (Standard Telecommunication Laboratories) se emplea la tecnología MOSFET de canal *n*. Una configuración típica de circuito (Fig. 4) emplea un solo transistor en cada punto de cruce. El cristal líquido actúa como condensador de carga en paralelo con la capacidad del reflector al sustrato. La pantalla se direcciona línea a línea, con lo que se activan todos los transistores de una línea, y se carga o descarga el condensador según proceda. Dichos transistores se desactúan seguidamente, mientras se direccionan las otras filas. Se estima que se puede conseguir una resolución de hasta 500 x 500. Existen diseños para matrices de 240 x 240, con circuitos de conversión de datos serie-paralelo en el sustrato. El rendimiento de fabricación es muy importante para dispositivos de esta clase. Se puede emplear una generosa redundancia en los circuitos de direccionamiento periférico para lograr un buen rendimiento. Sin embargo, no se dispone de

técnica adecuada para redundancia de los transistores de la matriz de visualización. Afortunadamente, en esto nos ayudan dos factores. En primer lugar, se dispone de grandes áreas de silicio para diseñar los dispositivos activos, con dimensiones generosas si es preciso. En segundo lugar, la experiencia demuestra que para aplicaciones alfanuméricas puede fallar un cierto número de elementos antes de que el observador medio lo advierta, con tal de que el fallo produzca un brillo igual que el fondo. Simulaciones en una pantalla con una típica matriz de puntos muestran que puede haber un 1% de elementos defectuosos sin que ello sea apreciable. Sin embargo, se requiere que los elementos defectuosos estén distribuidos aleatoriamente, pero por lo menos los resultados exigidos son radicalmente distintos a los de las memorias de semiconductores, cuya complejidad es similar.

Se están examinando distintos diseños de pantalla con matrices activas, incluyendo un programa para incorporar a esta técnica la posibilidad de tonalidades grises para aplicaciones de reproducción de imágenes.

Pantallas de cristal líquido esméctico

Debido a su estructura más ordenada, las películas delgadas de cristal líquido esméctico se mantienen estables durante muchos meses. Esto es cierto tanto para estructuras altamente alineadas como para las desordenadas. Por ser direccionables mediante señales térmicas o eléctricas, pueden aplicarse a visualizadores. El desarrollo de sistemas de pantalla se dirige a encontrar medios de excitar la pantalla en ambas direcciones, y también de convertir las distintas estructuras en efectos visuales de contraste.

Las técnicas de direccionamiento térmico trabajan por calentamiento del cristal líquido esméctico para atravesar la temperatura de transición de fase a las fases nemáticas o isótropas. Un subsiguiente enfriamiento rápido "congela" la estructura desordenada: un modo de hacerlo consiste en emplear calentamiento por láser en combinación con un tinte disuelto para absorber la radiación. Esta técnica se ha desarrollado en STL, conjuntamente con Laserscan Laboratories. En la actualidad se emplea la luz de un láser de helio-neón, desviada bajo control de ordenador, para barrer una pequeña célula esméctica, que es parte de un sistema de proyección (Fig. 5). El ancho de las líneas de escritura se reduce hasta $10 \mu\text{m}$, con una resolución de la imagen proyectada que alcanza las 1000 líneas. La velocidad de escritura depende de la poten-

cia del láser. Empleando un láser de helio-neón de 3 mW, se pueden obtener velocidades de escritura hasta de 100 mm s^{-1} sobre célula esméctica. La información escrita se puede almacenar indefinidamente, o bien ser borrada mediante un impulso de alta tensión a través de la célula. También se puede borrar selectivamente por direccionamiento simultáneo con el láser (a baja velocidad) y con un campo eléctrico.

Debido a las limitaciones de velocidad de escritura, este sistema es apropiado para pantallas de alta resolución, donde sólo se requiere escasa información. Ejemplo es la proyección de símbolos sobre un mapa.

Para pantallas complejas, como las alfanuméricas, los cristales líquidos esmécticos con direccionamiento eléctrico proporcionan una visualización adecuada. Se requieren dos efectos: uno para convertir los puntos de la pantalla al estado de dispersión (o absorción), y otro para clarearlos.

Si se emplean tensiones de excitación de baja frecuencia (en torno a 50 Hz y generalmente de 250 V), con dopantes iónicos adecuados en el esméctico, entonces tiene lugar la conducción eléctrica, rompiendo la estructura laminar del esméctico. Al final del impulso se mantiene la textura dispersiva. Por consiguiente, si se aplican impulsos cortos (de unos 10 ms) a una tensión inferior, éstos sólo actúan sobre los dipolos inducidos del esméctico, reordenando la estructura al estado claro. Se obtiene así un contraste de dispersión controlable. Con iluminación oblicua y un fondo negro, se pueden hacer pantallas de alto contraste. Alternativamente, las moléculas de tinte dicróico se pueden disolver en el esméctico. En forma similar al cambio de fase de colestérico teñido a nemático, puede con-

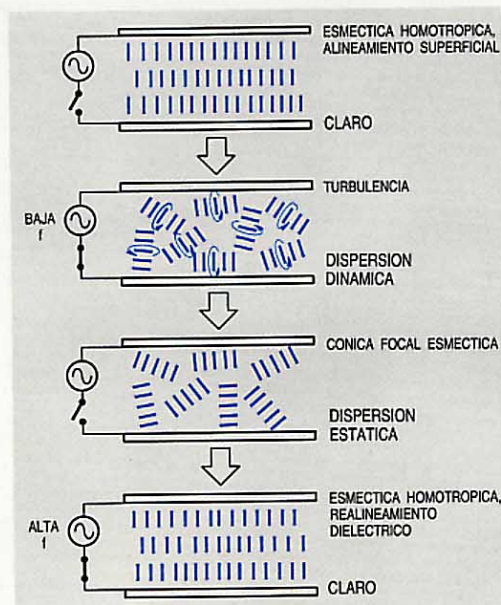


Figura 6
Principio de una pantalla esméctica con barrido electrónico.

seguirse un contraste por absorción que no precise más iluminación que la ambiente.

Para la operación de este sistema de pantalla con memoria, se pone inicialmente la pantalla en el estado de dispersión mediante un impulso de baja frecuencia. Seguidamente se inyectan las señales de datos a los excitadores de la pantalla, que generan impulsos cortos de tensión. Los elementos se direccionan línea a línea, y los elementos que han de ser clareados se disponen de modo que su tensión sea superior a la de los que deben quedar difusos. El tiempo de respuesta para el clareado depende fuertemente de la tensión; así el tiempo de acceso de cada línea se puede elegir para que sólo se clareen los elementos deseados. Además, si las tensiones residuales, que permanecen en los elementos direccionados cuando se excitan las líneas siguientes, se mantienen por debajo del nivel umbral en el que ocurre el efecto de clareado, entonces en principio se puede direccionar un número infinito de líneas. En la práctica se pueden lograr estas condiciones, aunque se necesiten algunas modificaciones para permitir la entrada de un carácter solo. El tiempo de acceso de línea es de 10 ms, lo que da lugar a una velocidad de escritura de hasta siete líneas de caracteres por segundo. Actualmente STL se dedica a un programa de desarrollo destinado a lograr una compleja matriz de 25 filas de 80 caracteres que sustituya al tubo de rayos catódicos en pantallas visualizadoras. La figura 7 muestra un prototipo de pantalla esmética con contraste por dispersión.

Conclusiones

El objetivo de un gran número de investigadores y realizadores de pantallas — reem-



Figura 7
Prototipo de pantalla esmética con barrido electrónico desarrollada en STL.

plazar el tubo de rayos catódicos en algunas aplicaciones — se alcanzará probablemente en un tiempo no muy largo. Este artículo se ha concentrado en los dispositivos cuya importancia como pantallas alfanuméricas de alta complejidad puede anticiparse, destacando aquéllos con posibilidades demostradas. Otros tipos de pantallas de cristal líquido tendrán también interés en el futuro. Los dos enfoques ahora previsibles apuntan hacia nuevas formas de memoria y sustratos de semiconductores de mayores áreas para usarse con cristales líquidos teñidos. Ambos enfoques son un buen ejemplo de desarrollos todavía en el estado de síntesis y evaluación de materiales básicos. La recompensa de un programa con éxito será el disponer de una pantalla con gran demanda potencial.

P. W. Ross estudió física en la Universidad de Southampton, ingresó en STL en 1974, y desde 1977 se ha dedicado a investigación y desarrollo de sistemas con cristales líquidos, en especial los de alta complejidad.

Película gruesa: materiales y fiabilidad

La investigación detallada de las tintas conductoras, resistivas y aislantes es esencial cuando se quiere asegurar la fiabilidad de los circuitos híbridos. Los medios existentes en STL (Standard Telecommunication Laboratories) permiten estudiar los materiales disponibles y valorar con rapidez el potencial de los nuevos materiales.

P. W. Graves

Standard Telecommunication Laboratories Limited, Harlow, Inglaterra

Introducción

Tecnología de película gruesa es un término genérico que cubre cualquier proceso que defina un circuito eléctrico por técnicas de impresión serigráfica; incluye un amplio margen de técnicas de fabricación, desde las tradicionales pastas de metales nobles sobre un sustrato de alúmina, hasta las tintas a base de resinas, impresas en sustratos de tipo orgánico. Esta tecnología se está usando ampliamente en electrónica, en aplicaciones que van desde los complejos híbridos multicapa para avanzados sistemas militares hasta las simples redes resistivas. Ahora es posible fabricar resistencias con tolerancias estrictas y bajos coeficientes de temperatura, y circuitos multicapa, gracias sobre todo a las mejoras en las pastas conductoras, resistivas y aislantes hoy disponibles en el mercado.

El ITT Components Group fabrica desde hace unos 15 años circuitos híbridos de película gruesa, y pronto se tuvo conciencia de que dicha tecnología sólo podía ser controlada mediante un conocimiento profundo de los materiales y sus mecanismos de fallo. Por esta razón, STL comenzó en 1969 un pequeño programa de soporte con el análisis de materiales conductores y resistivos. Desde entonces se han desarrollado muchas técnicas de evaluación¹, recopilado gran cantidad de datos de fiabilidad y construido adecuados medios de procesamiento.

Tintas quemadas en atmósfera de aire sobre alúmina

La tecnología de película gruesa empezó con tintas de metales preciosos quemadas al aire sobre sustratos de alúmina, utilizándose aún este método para la mayor parte de la producción.

Sustratos

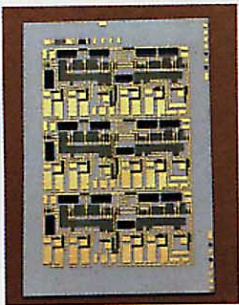
Los sustratos de alúmina al 96%, con fundente de silicato de magnesio, se han convertido en típicos para circuitos de película gruesa. El fundente de silicato de magnesio, que se añade para reducir la temperatura de sinterización de la alúmina, afecta a las prestaciones de las tintas quemadas², sobre todo las conductoras. Los sustratos de alúmina disponibles en los años 70 diferían en su composición, y por ello STL desarrolló métodos químicos de análisis³ para seleccionar los tipos compatibles con las mejores tintas entonces existentes.

Además de la composición, la curvatura y la rugosidad superficial del sustrato son factores esenciales para lograr impresiones de calidad y buena definición.

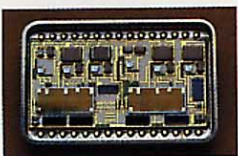
Conductores

Los conductores cuyo quemado se realiza en atmósfera de aire se basan en metales como oro y plata, y sus aleaciones con paladio y platino. En general, se usa el oro cuando se requiere alta fiabilidad y también en estructuras multicapa.

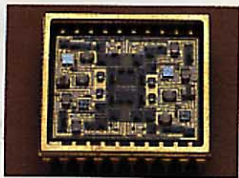
Muchos de los sistemas de conductores de oro y plata incorporan entre un 5% y un 10% de vitrificado para mejorar la adhesión al sustrato. En un modelo propuesto², durante el quemado tiene lugar una unión química entre la fase vítrea y el fundente del sustrato, mientras que sólo se establece unión mecánica entre la zona vitrificada y las partículas metálicas sinterizadas. Ello explica la crítica relación que existe entre el quemado y la adhesión del conductor al sustrato. Un quemado insuficiente reduce la adhesión, puesto que la reacción entre la zona vitrificada y el fundente es insuficiente, mientras que un sobrequemado provoca movilidad en las partículas vítreas, que se separan de la superficie del sustrato, reduciendo la fijación mecánica al conductor.



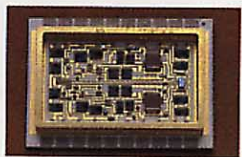
Sustrato de 3×2 pulgadas con 3 circuitos multicapa de oro idénticos.



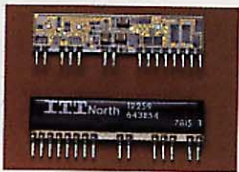
Híbrido de película gruesa en oro, junto con circuitos de película fina, en montaje rígido de pared.



Híbrido con pasta de oro en paquete cerámico multicapa (soldadura lateral).



Híbrido con pasta de oro en encapsulado de sustrato integral.



Híbrido con pasta de oro con terminales soldados, antes y después de la encapsulación conformal en plástico.



Sustrato de 3 x 2 pulgadas con 10 circuitos idénticos, usando conductores de paladio-plata.

Esto se ha comprobado disolviendo el metal sinterizado y observando la fase vítrea en un microscopio de barrido electrónico. Un conductor correctamente quemado tiene una película vítrea sobre el sustrato, desde la cual se proyectan unas columnas en forma de remache hacia el interior del metal sinterizado.

Para el caso de circuitos híbridos con componentes soldados, se usan las tintas de paladio-plata preferentemente a las de oro o plata puros, puesto que aquéllas presentan una mejor resistencia al arrastre de partículas en la suelda. Sin embargo, las primitivas aleaciones de paladio-plata mostraban un pronunciado descenso en la adhesión de los terminales soldados al someterlos a envejecimiento térmico, debido a una difusión del estaño (de la suelda de estaño-plomo) en el conductor, formándose un compuesto intermetálico de paladio-estaño ($PdSn_3$)⁴. La formación de este compuesto provocaba tensiones y rupturas entre el conductor y el esmalte, con la consiguiente pérdida de adhesión. Este problema se ha resuelto a base de optimizar la proporción de metales, el tamaño del grano, el tipo de esmalte y otros factores, de forma que los actuales conductores de paladio-plata puedan soportar múltiples inmersiones en suelda de estaño, así como envejecimientos prolongados a 150°C.

En los primeros años 70 se descubrieron numerosas limitaciones en los conductores de oro vitrificados, desarrollando entonces los fabricantes de tintas sistemas de conductores de oro de unión reactiva o sin vitrificar, cuyas características se presumían superiores. Se llevó a cabo una profunda evaluación⁵ para determinar la estructura, propiedades y limitaciones de varios sistemas conductores de este tipo. Aparte del oro, los componentes principales fueron como era de esperar el cobre y el cadmio, ya que el oro puede unirse al sustrato a través del óxido de cobre. Sin embargo, dos de los conductores investigados contenían además cantidades significativas de bismuto, de modo que la adhesión al sustrato era de tipo mixto, es decir, en parte a través del cobre, pero principalmente por la formación de una zona vitrificada durante el quemado que reaccionaba con el fundente del sustrato.

La adhesión de los conductores de unión reactiva y de los mixtos resultó ser superior a la del oro vitrificado sobre alúmina⁵. Se comprobó asimismo la factibilidad de usar conductores de oro de unión reactiva sobre alúmina del 99,5%. Sin embargo, aparecieron limitaciones a tales sistemas⁵; en particular, el óxido de cobre formado sobre la superficie del oro después del quemado de

la capa de protección a temperaturas entre 500 y 600°C, dificultaba la soldadura de los hilos.

Se elige a menudo el oro para aplicaciones de alta fiabilidad, creyendo equivocadamente que, como metal noble, será muy estable, particularmente en condiciones adversas. Sin embargo, el oro puede emigrar con gran rapidez cuando se polariza eléctricamente en presencia de humedad⁶, lo mismo que le ocurre a la plata. Este fenómeno se ha investigado en STL⁷ sobre conductores de paladio-plata, determinándose con precisión los mecanismos de emigración.

Resistencias

Una ventaja de la tecnología de película gruesa es la de integrar en un mismo sustrato una gama de resistencias de distintos tamaños. Uno de los primeros sistemas con éxito comercial estaba basado en la dispersión de plata, paladio y óxido de paladio¹ en una masa vítrea. Sin embargo, este sistema tenía limitaciones debido a la formación de más óxido de paladio durante el proceso de quemado, lo cual le hacía depender de éste. El mayor avance en los sistemas de pastas resistivas vino con el uso de pigmentos conductores basados en bióxido de rutenio, y particularmente con el rutenato de bismuto en la familia de pastas resistivas "Birox". La serie DP-1100 fue ejemplo de estas últimas; varios miembros de la serie se analizaron con detalle en STL para determinar cómo se controlaba la resistividad laminar^{1,8}. A la serie DP-1100, que tenía una baja temperatura de quemado (760°C), le sucedieron otros sistemas "Birox" (ej., DP-1300 y DP-1400) con mejor adaptación de la zona vitrificada al sustrato, lo cual mejoraba el coeficiente de variación de la resistencia con la temperatura. Otra ventaja de estos sistemas es su optimización para el ajuste de resistencias a un valor seleccionado, mediante técnicas de láser.

Los trabajos en STL para determinar la estabilidad y los mecanismos de fallo operantes en las resistencias de película gruesa, estaban impulsados por las exigencias de larga vida de los productos para telecomunicaciones, tales como sistemas de conmutación o de transmisión submarina. Se ha obtenido una amplia base de datos sobre el particular; en especial los datos de envejecimiento térmico (hasta 200°C) para la serie DP-1400 en aire y nitrógeno⁹, y también en hidrógeno y nitrógeno¹⁰, alcanzando a más de 30.000 horas.

Las características de envejecimiento de las tintas resistivas DP-1400^{9,10} se han fijado en diversas condiciones ambientales. Para resistencias no vidriadas se produce

un 0,1% de variación en su valor, a 25°C y sin carga, al cabo de 9×10^5 horas para tintas con resistividades entre $100 \Omega/\square$ y $10 \text{ k}\Omega/\square$, y de $1,5 \times 10^5$ horas para tintas de $1 \text{ M}\Omega/\square$ de resistividad. Vidriando las resistencias DP-1400 con pasta DP-9137 se aumenta su estabilidad y se mejora drásticamente al envejecerlas en atmósfera de hidrógeno-nitrógeno¹⁰.

Capas aislantes

Se usan capas impresas y quemadas de material aislante en híbridos de película gruesa para proteger las resistencias y evitar los efectos de emigración en los conductores. Además, la capa aislante define las áreas de soldadura del híbrido. Estas capas se procesan normalmente a temperaturas entre 500°C y 525°C, como última etapa de quemado antes del ajuste de resistencia y ensamble de componentes.

Otro uso de las capas aislantes es la construcción, bien de simples cruces de conductores o bien de estructuras multicapa, que aumentan notablemente la densidad de interconexión del circuito. En ambos casos, las capas de protección se procesan a la misma temperatura que conductores y resistencias (850°C), aunque los fabricantes de estas tintas recomiendan temperaturas de quemado más altas (925°C). Estas pastas de procesado a altas temperaturas son composiciones de vidrio, ya sean de tipo amorfo o cristalino. Con ellas puede lograrse un elevado número de capas (8 capas conductoras se han usado en ITT Avionics), pero se ha de tener sumo cuidado en la calidad de la impresión para evitar defectos en las capas dieléctricas que puedan provocar cortocircuitos.

Debido a la fácil difusión de la plata a través de la masa vítrea, no deben realizarse estructuras multicapa de alta fiabilidad con conductores de plata, ya que hay probabilidad de fallos en ciertos dieléctricos⁷. Sin embargo, futuros desarrollos pueden evitar estos problemas. El oro se emplea normalmente para híbridos multicapa, aunque el cobre puede ser una buena alternativa.

Tintas quemadas en atmósfera de nitrógeno sobre alúmina

El inconveniente principal de las tintas quemadas en atmósfera de aire es la necesidad de costosos metales nobles en conductores y resistencias. Por esta razón hay un creciente afán por desarrollar tintas de metales básicos, y el cobre es entonces el material conductor naturalmente elegido. En STL se realiza desde hace algunos años una extensa evaluación de tintas comerciales de cobre¹¹. También se ha evaluado el

sistema de resistencias Du Pont CMS¹², y aunque el margen de resistencias sea limitado (resistividades entre $20 \Omega/\square$ y $70 \text{ k}\Omega/\square$) sus prestaciones son en general comparables con la serie DP-1400. El desarrollo de capas aislantes (dieléctricos) por algunos suministradores de tintas permite ya realizar estructuras multicapa con conductores de cobre. El procesamiento y prestaciones de tales estructuras se están evaluando por el ITT Components Group y por Bell Telephone Mfg. Company (BTM)¹³, con los medios disponibles en STL.

Ensamble de híbridos

STL ha adquirido experiencia en varios aspectos del ensamble de circuitos híbridos, particularmente en el uso de resinas para el montaje de semiconductores y para su encapsulación.

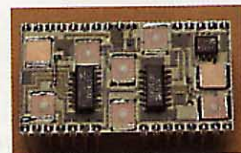
Resinas conductoras

Las resinas adhesivas con cargas de plata y oro se usan casi en exclusiva para la inserción de componentes semiconductores (pastillas) en sustratos híbridos porque pueden curarse a bajas temperaturas y admiten reparaciones. Se ha investigado la composición química, programa de curado y propiedades de una buena cantidad de resinas epoxídicas con cargas de plata¹⁴, permitiendo aplicar procesos de selección a estos y otros materiales utilizables. Las técnicas de análisis térmico han demostrado su gran valor para la caracterización de resinas orgánicas de este tipo.

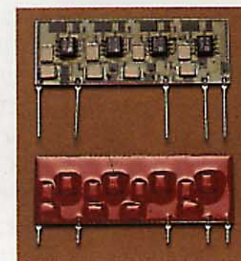
Resinas encapsulantes

Por razones de coste, se tiende a no usar encapsulaciones herméticas en metal, salvo en aplicaciones de muy alta fiabilidad.

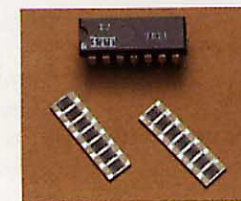
En vez de ello, los delicados semiconductores se encapsulan localmente con una resina de silicona blanda (revestimiento primario) y el híbrido completo se encapsula después con un material rígido (encapsulación secundaria). Pionera en este tipo de encapsulación de híbridos fue ITT North Microsystems para aplicaciones de conmutación, y actualmente lo utilizan otros fabricantes de híbridos de ITT o de la competencia. Las Administraciones están comenzando a aceptar esta encapsulación, junto con un revestimiento conformal en el caso de usar circuitos integrados miniatura en cápsula de plástico. La correcta selección de los materiales encapsulantes es vital, puesto que deben ser mutuamente compatibles. Pueden surgir problemas por la diferencia de dilataciones entre las resinas y los finos hilos ($25 \mu\text{m}$ de diámetro) de



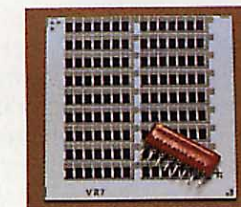
Circuitos ensamblados con estaño sobre pistas de paladio-plata.



Circuitos ensamblados con estaño sobre pistas de paladio-plata, antes y después de la encapsulación conformal con plástico.



Redes de resistencias en formato "en doble fila".



Red de resistencia impresa (STL) en un sustrato de 2×2 pulgadas.

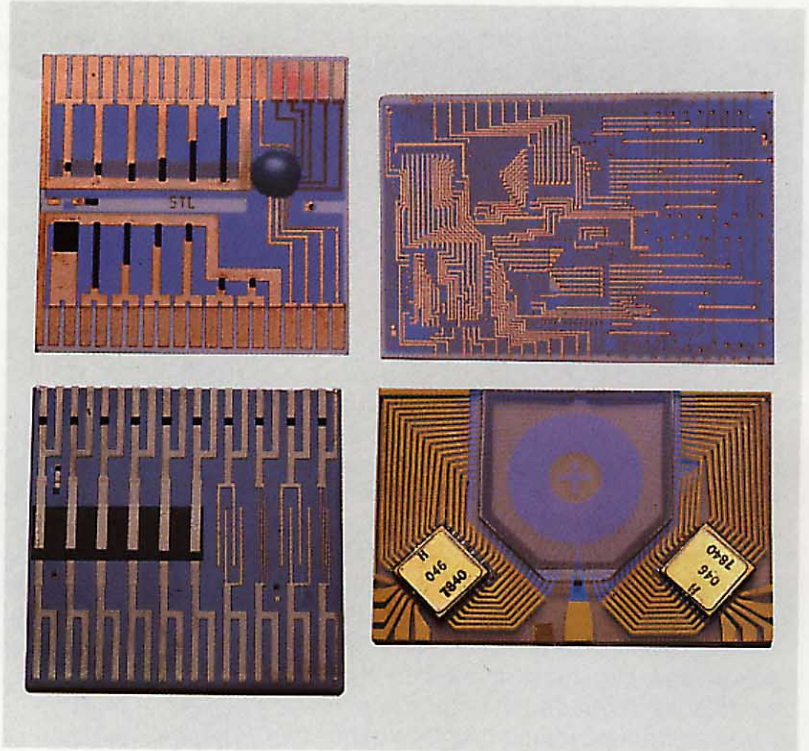
unión entre el semiconductor y el sustrato híbrido. STL está evaluando materiales para la encapsulación primaria, para lo cual se ha desarrollado un método rápido de variación cíclica de temperatura¹⁵ a fin de eliminar composiciones que pudieran provocar fallos en los hilos de oro de unión. La proporción de fallos de estos hilos depende mucho del módulo de elasticidad del encapsulante¹⁵.

La capacidad de la encapsulación primaria de silicón para proteger al semiconductor de la humedad atmosférica, depende de la buena unión química con todas las superficies. Una soldadura inadecuada puede provocar la formación de una capa de humedad entre el encapsulante y la superficie del semiconductor, que acabará provocando una corrosión metálica y por tanto la degradación del dispositivo. Es, pues, esencial aplicar la silicón en superficies limpias, y por ello STL ha investigado varios tratamientos que aseguren una buena limpieza¹⁶. Se ha desarrollado un proceso de limpieza con disolventes compatibles con los híbridos, el cual es eficaz en desprender contaminantes, tanto orgánicos como inorgánicos, y asegura una adhesión muy buena de los materiales encapsulantes de silicón. Las interacciones entre encapsulación primaria y encapsulación secundaria se están investigando por métodos analíticos previamente desarrollados^{14,15}.

Sustratos alternativos

Las limitaciones en el tamaño de los sustratos de alúmina promovieron el desarrollo y evaluación de otros materiales. La porcelana sobre acero (Enamelled Steel) es apropiada para sustratos de gran tamaño, con las ventajas de su robustez, posibilidad de preformado y taladrado antes del recubrimiento con porcelana, y una alta disipación térmica. La mayoría de los fabricantes de tintas han desarrollado sistemas compatibles con este tipo de sustrato, si bien las temperaturas de quemado se limitan a los 550°C debido al relativamente bajo punto de reblandecimiento de la porcelana.

Se han utilizado también cristales especiales sódico-cálcicos como sustrato para procesamiento de película gruesa^{9,17}, principalmente para preparación de pantallas de cristal líquido integrado con su parte electrónica correspondiente, eliminando así el uso de conectores poliméricos. Los grupos de Thick Film y de Display de STL han colaborado en el desarrollo de este tipo de visualizadores. El proceso estaba limitado igualmente por las temperaturas de quemado, inferiores a 550°C. La adhesión adecuada se logró únicamente con tintas de



aleaciones de oro. No hubo problemas con el interfaz entre el oro y el conductor de película gruesa (óxido de indio y estaño) utilizado para el direccionamiento de la pantalla de cristal líquido, ni tampoco con las terminaciones estañadas para los portadores de circuito añadidos.

Agradecimiento

El autor agradece el apoyo prestado por sus colegas del grupo de Thick Film de STL, particularmente a M. V. Coleman y G. E. Gurnett. Agradece también la cooperación de ingenieros de BTM Gante, SEL Nuremberg, ITT North Microsystems, e ITT Components Group Hybrid Unit de Yarmouth, donde P. W. H. Moore ha colaborado especialmente.

Referencias

- 1 M. V. Coleman: Evaluation Methods for the Examination of Thick Film Materials: *Radio and Electronic Engineer*, marzo 1975, volumen 45, n° 3, págs. 121-130.
- 2 L. Hailes y W. A. Crossland: Thick Films: The Substrate-Conductor Relationship: *Electronic Packaging and Production International*, julio/agosto 1972, volumen 8, n° 4, págs. 3-7.
- 3 M. V. Coleman y G. E. Gurnett: Surface Area, Structure and Composition of Debased Alumina Substrates: *Proceedings of the Conference on Hybrid Microelectronics*, Loughborough, 9-11 septiembre 1975, Institution of Electrical and Radio Engineers Conference Proceedings n° 31, 1975, págs. 1-16.

Tecnologías alternativas de película gruesa:
Circuito de prueba con multicapa de cobre y resistencias impresas en un sustrato de alúmina de 2 x 2 pulgadas (arriba, izquierda), y conductores multicapa en sustrato de 3 x 2 pulgadas (arriba, derecha); sustrato de porcelana sobre acero de 2 x 2 pulgadas con pistas de prueba (abajo, izquierda), y pantalla de cristal líquido con electrónica asociada en sustrato de cristal de 2,3 x 1,5 pulgadas (abajo, derecha).

- 4 W. A. Crossland y L. Hailes: Thick Film Conductor Adhesion Reliability: *Solid State Technology*, febrero 1971, volumen 14, nº 2, págs. 42–47.
- 5 M. V. Coleman y G. E. Gurnett: The Limitations of Reactively-Bonded Thick Film Gold Conductors: *Solid State Technology*, marzo 1979, volumen 22, nº 3, págs. 45–51.
- 6 A. Shumka y R. P. Piety: Migrated-Gold Resistive Shorts in Microcircuits: *13th Annual Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers Reliability Physics Symposium*, Las Vegas, 1–3 abril 1975, págs. 93–98.
- 7 M. V. Coleman y A. E. Winster: Silver Migration in Thick Film Conductors and Chip Attachment Resins: *Microelectronics Journal*, julio/agosto 1981, volumen 12, nº 4, págs. 23–29.
- 8 W. A. Crossland y L. Hailes: The Structure of Resistor Compositions: en P. J. Hølnes y R. G. Loasby (editores): *Handbook of Thick Film Technology*, Electrochemical Publications Ltd., 1976, págs. 137–151.
- 9 M. V. Coleman: Thick Film Materials for Hybrids: *Radio and Electronic Engineer*, mayo 1982, volumen 52, nº 5, págs. 227–234.
- 10 M. V. Coleman: The Effect of Nitrogen and Nitrogen-Hydrogen Atmospheres on the Stability of Thick Film Resistors: *Proceedings of the 1979 International Microelectronics Symposium*, Los Angeles, 13–15 noviembre 1979, págs. 255–262.
- 11 M. Hrovat y G. E. Gurnett: The Influence of Firing Conditions on the Properties of Some Copper-Based Thick Film Compositions: *Zbornik Referatov, Simpozija o Elektronskih Sestavnih Delih in Materialih – SD 79 (Proceedings of the XV Yugoslav Symposium on Electronic Components and Materials)*, Ljubljana, octubre 1979, págs. 217–226.
- 12 M. V. Coleman y G. E. Gurnett: Evaluation of Du Pont Copper-Compatible Resistor System: *Proceedings of the Third European Hybrid Microelectronics Conference*, Avignon, 20–22 mayo 1981, págs. 197–206.
- 13 M. Hinoul, W. Vermeirsch y R. Vlaeminck: Tintas de metales no nobles para circuitos híbridos de película gruesa: *Comunicaciones Eléctricas*, 1982, volumen 57, nº 2, págs. 137–141 (en este número).
- 14 D. M. Shenfield: Materials and Curing Characterisation of Conductive Epoxy Adhesives: *Proceedings of the 1979 International Microelectronics Symposium*, Los Angeles, 13–15 noviembre 1979, págs. 368–373.
- 15 P. J. Etter, H. K. C. Chan y S. M. Boyer: Evaluation of Bonded Connections and Conformal Coatings on Hybrid Integrated Circuits by Thermal Cycling: *Proceedings of the Third European Hybrid Microelectronics Conference*, Avignon, 20–22 mayo 1981, págs. 466–473.
- 16 S. M. Boyer y B. H. Claussen: The Protection of Substrates from Moisture-Related Conductance Effects: *Proceedings of the Third European Hybrid Microelectronics Conference*, Avignon, 20–22 mayo 1981, págs. 345–354.
- 17 M. V. Coleman: Screen Printed Conductors and Resistors on Alternative Substrates to Alumina: *Proceedings of the 1980 International Microelectronics Symposium*, Nueva York, 20–22 octubre 1980, págs. 104–110.

Peter W. Graves nació en 1937 en Dover, Inglaterra. En 1959 se graduó en física metalúrgica por la Universidad de Birmingham y en 1963 obtuvo el título de Doctor en Físicas. Se inició en la investigación en el North American Aviation Science Center (hoy Rockwell), en California. El Dr. Graves comenzó su trabajo en STL en 1964, y en 1971 fue nombrado jefe del departamento de pasivos y cerámicos. Actualmente dirige la división de pasivos e híbridos. Es miembro del ISHM-USA.

Conductores polímeros: materiales y aplicaciones del proceso

Los conductores polímeros de formulación específica ofrecen significativas ventajas económicas sobre la tecnología convencional de circuitos impresos. Su fiabilidad ha sido ya probada en aplicaciones que van desde circuitos impresos multicapa para productos de consumo hasta diversos tipos de sensores, pasando por circuitos de teclado.

G. L. Ashcroft

Standard Telecommunication Laboratories Limited, Harlow, Inglaterra

Introducción

Los circuitos impresos y los circuitos híbridos de película gruesa son las dos principales técnicas usadas para interconexión de componentes electrónicos. Ambas son apropiadas tanto para circuitos de una cara como para multicapa, pero son de coste relativamente alto. Cuando se requiere un circuito impreso de dos o más capas, se han de usar taladros metalizados en placas impresas complejas. Los circuitos de película gruesa emplean costosas tintas de metales nobles, así como sustratos cerámicos.

En muchas aplicaciones no se requiere la alta densidad de interconexión que proporcionan los circuitos impresos y de película gruesa, y se pueden usar tecnologías alternativas que reduzcan los costes de fabricación o de materiales, o que mejoren el rendimiento. Una de estas aplicaciones es el caso de circuitos con densidad de pistas media pero que no pueden acomodarse en una placa de una cara. Tales circuitos suelen rediseñarse con menor densidad de pistas sobre circuitos impresos de doble cara que requieren taladros metalizados.



Pistas de epoxia cargada con plata usadas en una placa de control remoto para TV (arriba), y placa de control para una mezcladora de alimentos (abajo).

Ejemplos de lo anterior pueden encontrarse tanto en aplicaciones de consumo (televisión, juegos electrónicos) como en las semiprofesionales (teclados, teclados para teléfonos). Estas aplicaciones cubren alrededor del 50% del total de la producción de circuitos impresos.

En este contexto, se ha desarrollado en STL (Standard Telecommunication Laboratories) una técnica alternativa de bajo coste para interconexión de circuitos. Dicha técnica mantiene las características necesarias para la fiabilidad de las interconexiones, pero reduce los costes de fabricación al utilizar materiales más baratos. La tecnología se basa en el uso controlado de conductores polímeros aplicados en sustratos polímeros estables, bien por impresión serigráfica o a través de una boquilla neumática. Se pueden realizar estructuras multicapa de gran tamaño, y fabricar los circuitos directamente a partir del dibujo mediante un sistema de ayuda al diseño por ordenador (CAD) acoplado a un aplicador de pasta conductora. Los cambios rápidos de diseño, reprocesos y cambios durante la producción, pueden conseguirse en una sola operación.

A veces entran en conflicto las prestaciones físicas y químicas que se exigen a las tintas conductoras. Por ejemplo, la posibilidad de impresión de líneas finas implica el uso de tintas que, en general, no satisfacen los requerimientos de máxima conductividad. Igualmente, las temperaturas de curado bajas pueden no ser compatibles con un largo tiempo de almacenamiento, especialmente en tintas de un solo componente (resina de fácil mezcla y endurecedor); ni tampoco el bajo coste es compatible con tintas químicamente estables y de alta conductividad, a base de metales nobles. Sin embargo, no es necesario que una sola tinta conductora polímera satisfaga todos

los requisitos: puede aceptarse una gama de tintas, cada una de las cuales responda a necesidades particulares.

Caracterización de la fase conductora

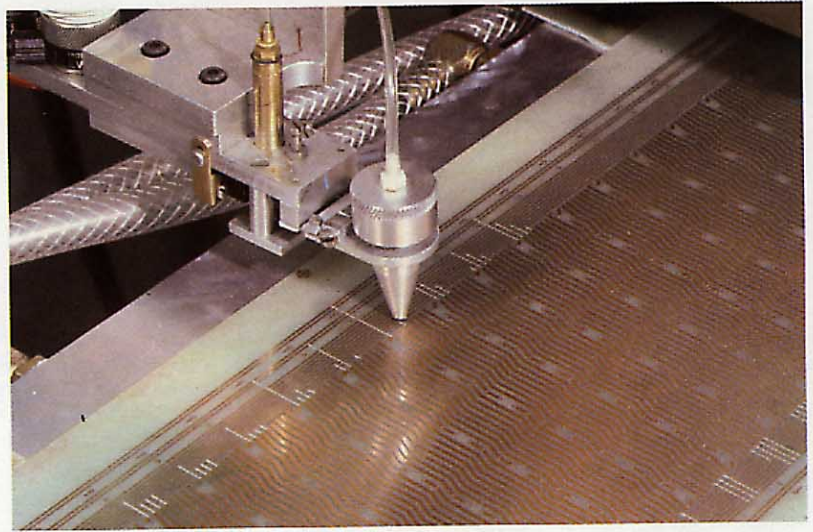
Morfología del conductor

En circuitos de película gruesa, la conducción se consigue sinterizando tintas de metales nobles sobre sustratos cerámicos. Los flujos de corriente tienen lugar a través de una sola estructura metálica densificada, que poco o nada recurre a mecanismos de contacto "partícula a partícula". La morfología (tamaño y forma de las partículas) puede optimizarse para posibilitar la impresión de líneas finas, así como para un buen control de las dimensiones.

Por otra parte, los polímeros con carga metálica sólo conducen mediante contacto "partícula a partícula", no siendo posible la sinterización y sí sólo en escasa medida la soldadura en frío (fusión) como ayuda a la conducción. De hecho, los primitivos conductores polímeros con carga metálica no optimizada tenían altas resistividades, lo que demuestra la importancia del tamaño, forma y distribución de las partículas metálicas de relleno, así como la naturaleza físico-química del contacto "metal-metal".

Se observa un umbral en la carga de partículas metálicas por debajo del cual la conductividad es prácticamente nula, y al superarlo, dependiendo del relleno, hay conducción. La conducción se produce cuando el promedio de contactos por partícula es mayor que uno¹, aumentando hasta un límite de dos contactos por partícula. Esto implica que estadísticamente todas las partículas están incluidas en la red conductora y que, en teoría, la adición de más partículas no debería afectar a la conductividad. Para ello hay que suponer que no se interfieren las partículas adyacentes y que todas ellas tienen morfología similar. En la práctica ambas hipótesis son inaceptables.

Los tamaños y formas de las partículas del conductor son muy importantes para conseguir máxima conductividad con una mínima carga de partículas y para optimizar las propiedades reológicas (comportamiento de viscosidad). Sin embargo, los dos requisitos son contradictorios, pues la conductividad de la resina aumenta con el tamaño de las partículas (dentro de un margen bien definido), mientras que el control de la reología de la tinta y la aptitud para la impresión se mejoran con partículas más pequeñas. Esto es especialmente cierto en el caso de partículas de plata, en las que se basan la mayoría de los resultados dados en este artículo. Una de tales tintas, desarrollada en STL, usa polvos de

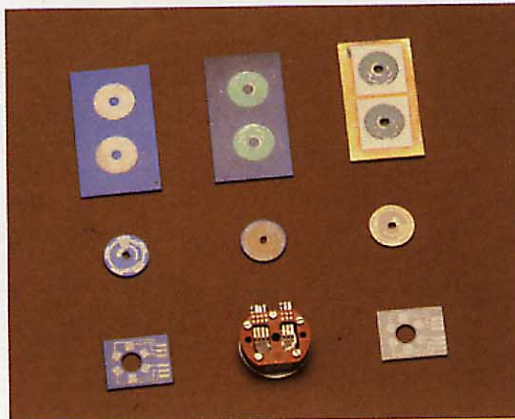


Aplicador de tinta polímera conductora controlado por ordenador. Imprime pistas de conexión en la parte inferior de un teclado modular de diseño específico.

plata en copos con un diámetro medio de partícula de $35 \mu\text{m}$ y un espesor aproximado de $8 \mu\text{m}$. Se utilizó como vehículo una resina epoxídica basada en Bisphenol A. El CVF* (fracción crítica de volumen) puede descender hasta 0,085 (8,5% de volumen de plata en la tinta), para conductividades mínimas, mientras que la máxima conductividad se consigue con un CVF de 0,295, o con una relación de 3 a 1 en peso plata/resina. La conductividad de estas composiciones puede apartarse de las estimaciones teóricas por diversos factores, como distribución de tamaño, fusión, efecto túnel, conducción en bandas de energía y difusión iónica, pero ninguno de estos efectos puede explicar los cambios reales observados en la resistividad.

El examen de diversas formulaciones, tanto comerciales como de laboratorio, muestra que todas ellas exhiben un comportamiento corriente-voltaje lineal (óhmico), desde los microamperios hasta varios amperios, sin evidenciar rectificación de contactos o del conductor con polarización

* Carga por volumen de una distribución aleatoria de material conductor de relleno en una matriz aislante, por encima de la cual tiene lugar la conducción metálica.



Diversos formatos de conductores impresos para un conmutador rotativo codificado, cuya disposición se muestra en prototipo.

inversa en CC. Así, pues, debe atribuirse a mecanismos adicionales dentro de la mezcla conductora el comportamiento eléctrico (y mecánico) observado.

Condicionamientos térmicos

El comienzo de la conducción en los polímeros conductores varía con la temperatura y rapidez de curado, con los disolventes y la resina, dependiendo la conductividad final de la historia térmica (p. ej., si se aplicó un curado parcial previo, o bien ciclos de curado a baja temperatura). La contracción de volumen durante el curado, así como la temperatura de transición de fase de la resina, moderan la influencia de la temperatura sobre la conductividad eléctrica, pero ninguno de los dos fenómenos explica por completo el comportamiento de las resinas conductoras expuesto en la tabla 1.

La dependencia de la temperatura que presenta la conductividad de la resina es común a la mayoría de los sistemas y no parece ser función de la morfología del conductor; más bien parece estar relacionada con la composición química de la resina, endurecedor, disolvente y fases del metal. Las observaciones 3, 4 y 5 de la tabla 1 pueden atribuirse a la contracción de la resina (lo cual mejora el contacto metalúrgico durante el curado), pero las 1, 2, 6 y 7 no pueden explicarse del mismo modo. La mayoría de los conductores polímeros se cargan de partículas metálicas hasta su CVF máximo, pero siguen comportándose como aislantes antes del curado.

Una explicación consiste en suponer la presencia de un recubrimiento orgánico reactivo que afecta al contacto entre partículas. El comportamiento descrito en la tabla 1 se debería, entonces, a la interacción entre la "capa barrera" y su inmediato entorno químico: concentración de disolventes, reactividad del endurecedor y presión del vapor orgánico durante el curado. Es sabido que durante la fabricación del polvo se incorporan agentes lubricantes y dispersantes orgánicos con el fin de impedir la fusión de las partículas y asegurar su flujo libre (p. ej., un ácido graso o una sal de ácido graso como el estearato de zinc). Los puntos de fusión de estas sustancias orgánicas están entre 50 y 200°C, y se sabe que son miscibles en muchos de los disolventes utilizados en las resinas conductoras. La reactividad relativa entre la fase semisólida de estos lubricantes y alguno o todos los ingredientes químicamente activos de las tintas depende posiblemente de la temperatura y del tiempo. Nunca se insistirá bastante sobre la influencia del curado en las propiedades finales físicas y eléctricas de las resinas, tanto experimentales como comerciales.

Tabla 1 — Resistividad de conductores polímeros con carga metálica

- | | |
|---|---|
| 1 | La resistividad global de las tintas no curadas es prácticamente infinita. |
| 2 | El paso de aislante a conductor ocurre a los pocos segundos de iniciar el curado, cuando la mayoría de las resinas permanece en fase líquida (gel). |
| 3 | La resistividad global final depende de la rapidez y temperatura del curado. |
| 4 | El curado posterior afecta poco o nada a la resistividad, a menos que la resina no se haya curado suficientemente. |
| 5 | La reactividad química entre resina y endurecedor tiene un marcado efecto sobre el margen de resistividades posible. |
| 6 | La resistividad global suele disminuir cuando la resina contiene modificadores de viscosidad. |
| 7 | Las condiciones ambientales durante el curado influyen mucho en la resistividad final de una cierta combinación resina/conductor (p. ej., existencia de un gas y su presión parcial). |

Implicaciones del proceso

El coste y las propiedades mecánicas pueden tener igual o mayor importancia que la conductividad eléctrica en algunas aplicaciones. La resistencia al desgaste, la estabilidad mecánica y la resistencia a la oxidación superficial (resistencia de contacto estable), por ejemplo, son requisitos importantes para los conmutadores rotativos impresos, mientras que la resistencia a la flexión, baja temperatura de curado y alta adhesividad son exigencias típicas en la tecnología de teclados de membrana flexible. Además, la temperatura de curado de la resina determina el tipo de sustrato a usar. Por eso, el comportamiento de las tintas no depende sólo de la fase conductora, sino también de las propiedades físicas y químicas de la resina, el endurecedor y los modificadores de viscosidad utilizados en la composición de la tinta.

Tres son las características dominantes en la elección de una resina: la temperatura de curado, el tiempo de curado y la temperatura de transición de fase. Cuatro tipos de resinas cubren prácticamente el 95% del total: epoxídicas, fenólicas, de poliéster y acrílicas. Su característica más importante es la baja temperatura de curado (bastante inferior a 200°C), que permite el uso de un amplio surtido de sustratos, desde poliámiida, poliimida y poli(eter) sulfonas para altas temperaturas hasta sustratos termoplásticos de poli-carbonatos, acrílicos y de poliestireno, pasando por vidrio epoxídico, fenólicos y de poliéster. Los trabajos realizados en STL se han concentrado en el uso de resinas de un solo componente (endurecedor latente) y resinas de dos componentes (endurecedor más resina). Los sustratos por ello se han limitado a epoxia con carga de vidrio, papel fenólico y poliéster. La amplia gama de sustratos utilizables con las formulaciones específicas de conductores polímeros dan una considerable libertad de elección al diseñador.

Reología de la tinta

Una tinta conductora preparada según lo expuesto resultaría demasiado espesa, y se requiere, pues, diluirla. Existen dos tipos de disolventes: los que reaccionan químicamente con la resina y el endurecedor, y los que se evaporan o disocian durante el curado (comúnmente disolventes orgánicos). Deben de tener una baja volatilidad para asegurar una larga vida y para evitar daños en la red de conductores por culpa de una evaporación rápida; al mismo tiempo, no deben de dejar residuos en el curado de la resina que pudieran impedir el curado completo, con el consiguiente reblandecimiento de la resina. Los disolventes más comunes son el Terpineol y el 2-Butoxi-etanol, aunque se prefieran los hidrocarburos alifáticos de alto punto de ebullición cuando se requieren modificadores de viscosidad secundarios (de tipo tixotrópico) para controlar el flujo de la tinta durante la impresión.

Es de capital importancia el comportamiento viscoso de una tinta bajo una fuerza aplicada (reología). Las tintas deben de ser lo suficientemente viscosas como para impedir que fluyan por gravedad, pero también han de tener el necesario grado de fluidez ante el esfuerzo cortante para poder aplicarse al sustrato. Más aún: no deben desparramarse en el sustrato una vez aplicadas y antes del curado. La figura 1 muestra la curva ideal de viscosidad para una pasta polímera conductora.

Basándose en los precedentes datos empíricos y teóricos, STL ha desarrollado una serie de tintas conductoras polímeras. La pasta STL LHFS₆BCl₃ tiene una resistividad volumétrica mínima de $20 \times 10^{-6} \Omega \text{ cm}$ y permite imprimir pistas hasta de 0,3 mm de anchura usando técnicas de serigrafía o mediante una boquilla aplicadora. Esta tinta resiste hasta 12 meses en almacenamiento y dos semanas al aire libre (en condiciones de impresión serigráfica). El ciclo de curado es de 30 minutos a 150°C en un horno convencional, y aún más breve en un horno de rayos infrarrojos.

Aplicaciones del proceso

Las condiciones de impresión de tintas pueden definirse con precisión para conseguir un método fiable de deposición con un control adecuado del trazado y del comportamiento de los materiales. STL ha desarrollado un método para la fabricación, estandarización y especificación del proceso de un sistema de conductores polímeros de baja temperatura de curado, que utiliza actualmente el ITT Components Group en diversas aplicaciones. El proceso se llama

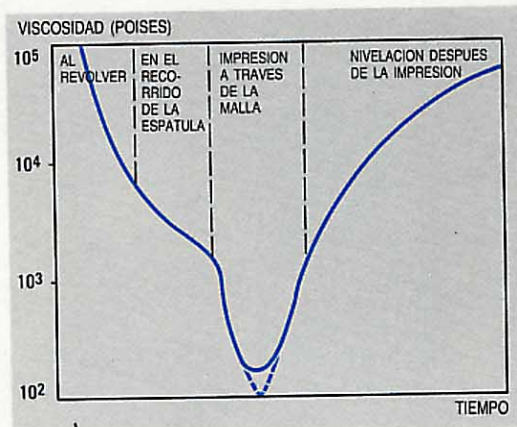


Figura 1
Curva de viscosidad ideal de una pasta conductora polímera para impresión serigráfica. La curva de puntos indica el margen de viscosidad aceptable.

LTAC (tecnología de conductores aditivos de baja temperatura)^{2,3}.

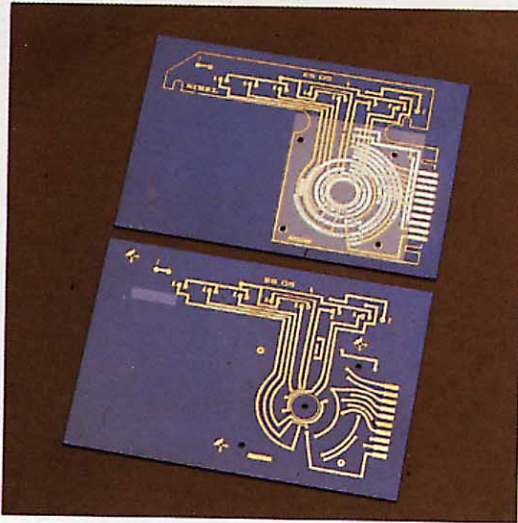
El proceso LTAC ofrece una buena alternativa a los circuitos impresos de doble cara con taladros metalizados, basada en impresiones sucesivas de capas conductoras y dieléctricas sobre un sustrato de epoxia cargado con fibra de vidrio, con curados a temperaturas de 150°C o inferiores. El desarrollo del LTAC con especificaciones ITT y de British Standards ha llevado consigo una gran cantidad de pruebas, algunos de cuyos resultados se dan en la tabla 2. Es fundamental el uso de cobre atacado como nivel conductor básico para asegurar una inserción de componentes fácil y fiable.

Los primeros resultados indicaban que la conexión impresa entre los niveles superior e inferior de conductores, era el parámetro más sensible del proceso y físicamente el más difícil de conseguir. Por ello, en la mayoría de las pruebas se adoptaron dos modelos: uno, en forma de meandros, en tres niveles de cobre-plata-cobre con 500 interconexiones por pistas conductoras de 0,8 mm de ancho, diseñado para resaltar los problemas de interconexión; el otro, con 596 cruces de plata sobre cobre aislados por dieléctrico intermedio, pretendía poner de relieve los aspectos de integridad del dieléctrico (ej., porosidad, penetración de

Tabla 2 — Resultados de validación del proceso LTAC

Fallo de vía de interconexión	0 días	1 en 56000
	56 días	1 en 3600
Fallo de cruce	0 días	1 en 50000
	56 días	1 en 3000
Resistencia de contacto cobre-plata		25 mΩ
Resistencia de contacto plata-plata		10 mΩ
Resistividad global del conductor polímero (STL)		$2 \times 10^{-6} \Omega \text{ cm}$
Resistividad global del cobre		$1,6 \times 10^{-6} \Omega \text{ cm}$
Anchura de pistas impresas (sin vías)		0,35 mm
	(con vías)	0,8 mm
Espesor de pistas		20 μm
Capacidad de conducir corriente		5 A mm ⁻²

Conmutador rotativo empleado en el panel de control de una lavadora, que utiliza conductor de epoxia con cargas de plata impreso directamente en una placa de circuito.



humedad, emigración de partículas conductoras, capacidad del cruce y voltaje de ruptura). Se realizó una prueba ambiental de 56 días de duración a 85°C de temperatura y al 85% de humedad relativa. El criterio de fallo para las vías de interconexión era el de cambio de 1 a 10 en la resistencia (desde 30 hasta 300 mΩ). Un fallo no implicaba necesariamente la condición de circuito abierto.

Las ventajas económicas del uso de LTAC frente a circuitos impresos de doble cara y taladros metalizados se cifran entre 2 y 6 a 1 (circuito impreso/LTAC)⁴. Las mayores reducciones de costes son debidas a reemplazar las etapas de taladro y metalización por una sola etapa de impresión serigráfica, y a sustituir los sustratos epoxídicos de alta calidad con fibra de vidrio por otros de menor coste.

Se han fabricado en France Cadrans placas de circuito, usando el proceso LTAC, para aplicaciones que van desde placas de control para lavadoras hasta conmutadores rotativos impresos y circuitos de teclado semiprofesionales⁵. Realizando ligeros cambios en las tintas conductoras de STL, éstas se pueden ya depositar con boquillas neumáticas especialmente diseñadas.

Si la posición y orientación del aplicador neumático (o de las placas) se controlan por ordenador, se puede "trazar" directamente el circuito eléctrico a gran velocidad. Los datos del circuito vienen sencillamente en forma de coordenadas numéricas (para las

pistas de interconexión), o de "tablas de verdad" (para conmutadores rotativos). STL ha desarrollado un versátil sistema de diseño automático e impresión bajo control de un ordenador PDP-11, que actualmente está utilizando el ITT Components Group en Francia para la producción y evaluación de prototipos de teclados de consola modulares, cuyo diseño no hubiera sido posible sin el uso de tintas conductoras polímeras de gran versatilidad de impresión.

Conclusiones

Los circuitos fabricados mediante la tecnología de conductores aditivos a baja temperatura de STL ofrecen, en muchas aplicaciones, numerosas ventajas sobre los circuitos impresos convencionales y los circuitos híbridos. Los costes pueden ser menores y las técnicas de diseño, muy flexibles. Esta nueva tecnología se está usando ya en circuitos para electrodomésticos, automóvil, teclados de control remoto y aparatos de teléfono, así como para la construcción de circuitos impresos multicapa, de conmutadores rotativos o de selectores de función rotativos. Las posibles aplicaciones van desde dispositivos interruptores de corriente y sensores diversos hasta sistemas que expiden billetes.

Referencias

- 1 G. E. Pike y C. H. Seager: Percolation and Conductivity: A Computer Study. I: *Physical Review B*, 15 agosto 1974, volumen 10, n° 4, págs. 1421-1434.
- 2 G. Ashcroft: *Design Rules for Low Temperature Additive Technology*, 1981. (Pedidos al autor).
- 3 G. Ashcroft: *Process Specifications for LTAC*, 1981. (Pedidos al autor).
- 4 M. Poletti: *Leap II PCB Working Group Report*, enero 1982. (Pedidos al autor).
- 5 R. J. Hodges y T. M. Jackson: *STL CG France (joint project) CAD LTAC Keyboards*. (Pedidos al autor).

G. L. Ashcroft estudió metalurgia y ciencias de materiales en la Universidad de Birmingham, graduándose BSc en 1974. Seguidamente entró en STL, Harlow, en donde ha trabajado en una amplia gama de proyectos de investigación, que incluyen las técnicas de ataque de plasma por gas y estudios químicos de polímeros para adhesivos y dieléctricos. El Sr. Ashcroft es actualmente ingeniero senior de investigación y pertenece a la International Society for Hybrid Electronics.

Tintas de metales no nobles para circuitos híbridos de película gruesa

Las pastas conductoras de cobre hoy disponibles y sus dieléctricos compatibles exhiben propiedades comparables a las de los conductores basados en oro. Los nuevos materiales pueden usarse para fabricar sustratos multicapa fiables a costes razonables.

M. Hinoul
W. Vermeirsch
R. Vlaeminck

Bell Telephone Manufacturing Company,
Gante, Bélgica

Introducción

Los circuitos híbridos consisten esencialmente en un conjunto de conductores y resistencias realizados por impresión serigráfica o por deposición al vacío, sobre los que pueden montarse componentes activos y pasivos; el sustrato base es de alúmina casi exclusivamente. Estos circuitos se llaman de película *fin*a o *gruesa*, dependiendo de las técnicas de deposición utilizadas. Los conductores y resistencias de película fina se depositan al vacío con espesores típicamente menores de $1\ \mu\text{m}$, mientras que los circuitos de película gruesa se construyen por impresión serigráfica de pastas (tintas) conductoras y resistivas sobre un sustrato de alúmina. Después de la impresión, las pastas se sinterizan en un horno de cadena a temperaturas del orden de 900°C , alcanzando un espesor final de 8 a $15\ \mu\text{m}$.

Los circuitos de película gruesa se utilizan ahora ampliamente en aplicaciones tanto comerciales como profesionales. Por ejemplo, en los sistemas de conmutación de ITT, METACONTA* 10C y 1240. El uso de circuitos de película fina está, sin embargo, restringido a aplicaciones de muy alta frecuencia.

La flexibilidad de diseño es una importante ventaja de los circuitos híbridos. La densidad de interconexión es intermedia entre la de circuitos integrados y la de placas impresas. Se han desarrollado nuevos materiales para circuitos impresos que en potencia permiten una mayor densidad de interconexión en grandes áreas, y actualmente hay una fuerte tendencia a mejorar la tecnología de película gruesa. Un

paso esencial en este desarrollo ha sido la introducción de pastas aislantes, que han permitido realizar por impresión circuitos multicapa de película gruesa. A pesar de su capacidad de interconexión, los circuitos multicapa tenían el problema del coste de los materiales empleados. Las pastas conductoras de película gruesa, basadas principalmente en suspensiones de plata en polvo con pequeñas cantidades de paladio y/o platino, no eran del todo fiables para estas aplicaciones debido a la emigración de la plata en el interior de la capa aislante. La única alternativa entonces era la de conductores de oro, con su alto e imprevisible precio, lo cual limitaba el uso de multicapa en película gruesa a aplicaciones militares y espaciales, donde la alta densidad — y no el bajo coste — es el requisito esencial.

Para ensanchar este mercado, los fabricantes de pastas han estado investigando el posible uso de metales no nobles en sus formulaciones. El cobre, de precio bajo y estable, y mejor conductor que el oro, ha sido el material más usado. Desde hace varios años existen en el mercado tintas conductoras basadas en cobre, aunque sus formulaciones siguen mejorándose con regularidad. Como estos conductores se han desarrollado para circuitos multicapa, también se requieren sistemas compatibles de dieléctricos y resistencias, bastante más difíciles de producir que los conductores y todavía apenas comercializados.

Se emprendió un estudio en Bell Telephone Manufacturing Co., en cooperación con las Universidades de Gante y Lovaina, para investigar la aplicabilidad y fiabilidad de las tintas conductoras y materiales dieléctricos en circuitos con grandes densidades de interconexión, para las centrales digitales ITT 1240.

* Marca registrada del Sistema ITT

Programa experimental

Sustratos de prueba

Se han realizado dos tipos de sustratos de prueba: uno para el uso de pastas conductoras y el otro para dieléctricos. El sustrato de pruebas para conductores se muestra en la figura 1. Consiste básicamente en una pista de 0,25 mm de ancho y 325 mm de largo, 9 cuadros de 2 x 2 mm y 16 cuadros de 1,3 x 1,3 mm. Esta disposición se repite cuatro veces en un sustrato del 96% de alúmina (Al₂O₃) que mide 50,8 x 50,8 x 0,635 mm.

Después de procesados, se midió la resistividad y el espesor de los conductores. Se empleó un microscopio de barrido electrónico para analizar la energía y la dispersión cristalina y para observar el grado de sinterización, resolución, porosidad, etc.

En la figura 2 se muestra el segundo sustrato de pruebas usado para pastas dieléctricas. Consiste en dos pistas conductoras de 0,5 mm de anchura, entre las cuales se sinterizan dos capas de dieléctrico. Los conductores van girados 90° para producir 256 cruces. Nuevamente el dibujo se repite cuatro veces en un sustrato de alúmina al 96%. El circuito equivalente comprende 256 condensadores en paralelo, cada uno de los cuales tiene un área de 0,5 x 0,5 mm y una separación entre electrodos igual al espesor de las capas de dieléctrico sinterizadas.

Se midieron las siguientes características eléctricas:

- capacidad entre los electrodos superior e inferior, lo cual permite calcular la constante dieléctrica
- resistencia de aislamiento entre conductores superior e inferior (antes y después de la prueba de humedad)
- voltaje de ruptura.

Se determinó también la influencia de la capa de protección en estos valores. Se usó el microscopio electrónico para analizar química y estructuralmente las pastas dieléctricas.

Proceso

Todos los modelos de prueba se imprimieron en sustratos estándar de alúmina al 96%. Después de la impresión serigráfica se dejaron estabilizar los sustratos de 10 a 15 minutos en condiciones ambientales normales, y posteriormente se secaron a 125°C durante 15 minutos. Finalmente, se sinterizaron en un horno de cadena de 6 zonas, en atmósfera de nitrógeno. Se vigiló el contenido en oxígeno de la atmósfera de nitrógeno, que se mantuvo inferior a los

15 ppm (partes por millón), con valores típicos de 3 a 5 ppm dentro del horno.

Dos pastas fueron difíciles de sinterizar correctamente: la ESL 2311 conductora y la ENG A-4058 dieléctrica.

Resultados experimentales

La tabla 1 resume los principales resultados del espesor y resistividad laminar, medidos en conductores y dieléctricos compatibles, ya sinterizados. En esta fase no se realizó ningún intento de estudiar combinaciones de conductores y dieléctricos de distintos suministradores.

Espesor de conductores y dieléctricos

De las medidas reseñadas en la tabla se pueden sacar las siguientes conclusiones. Primero, la pasta conductora DP 9924 está bien equiparada en espesor con el dieléctrico compatible DP 4275, lo cual es importante para la realización de circuitos multicapa. El espesor del dieléctrico es ligeramente inferior al valor óptimo de 20 µm.

En contraste, las pastas HER 7029-d y HER 7116, conductora y dieléctrica respectivamente, tienen más espesor, lo que implica un mayor consumo de pasta. La equiparación de espesores del conductor y dieléctrico es adecuada, pero sería difícil la realización de estructuras multicapa con estas tintas debido a su gran espesor.

El espesor de la tinta conductora ENG A-4109 es aceptable, pero el dieléctrico es demasiado fino y por ello inadmisibles, dado su bajo aislamiento eléctrico.

Por último, el conductor ESL 2311 y el dieléctrico ESL 4901-H están bien equiparados en espesor, y éste es óptimo con muy pequeña dispersión. Pueden, pues, resultar excelentes para la fabricación de multicapa.

Resistividad eléctrica

Esta propiedad es muy importante en redes de interconexión, donde se requiere la menor resistividad posible. Sin embargo, como los espesores de los conductores

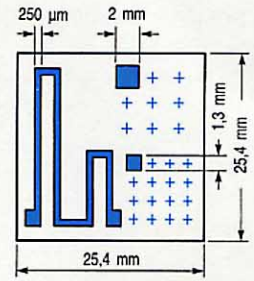
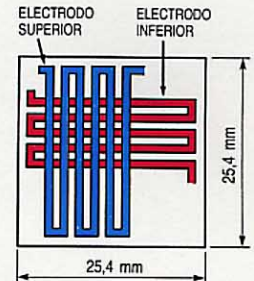


Figura 1
Sustrato de pruebas para pastas conductoras de cobre.



ANCHO DEL CONDUCTOR: 0,5 mm
SEPARACION DE CONDUCTORES: 0,5 mm
NUMERO DE CRUCES: 256

Figura 2
Sustrato de pruebas para dieléctricos.

Tabla 1 — Espesor y resistividad en conductores de cobre y dieléctricos compatibles

Conductor	Espesor (µm)		Resistividad laminar (mΩ/□)		Dieléctrico compatible	Espesor (µm)
	en alúmina	en dieléctrico	en alúmina	en dieléctrico		
DP 9924	16,5	15,8	3,09	2,83	DP 4275	16
HER 7029-d	27,2	30,0	1,38	1,51	HER 7116	35
ENG A-4109	21,9	24,0	2,05	1,73	ENG A-4058	11
ESL 2311*	20,1	20,2	4,74	3,17	ESL 4901-H	20

* Este conductor se sinterizó insatisfactoriamente en el 50% de los casos, lo cual explica su alta resistividad.

pueden variar mucho, los resultados obtenidos deberán interpretarse de forma comparativa y no como datos absolutos.

Estos valores permiten calcular la resistencia total de una pista conductora en un circuito dado. La disminución de la resistividad laminar del cobre dieléctrico es bastante significativa, excepto para el conductor HER 7029-d. A modo de comparación, la mayoría de los conductores de oro tienen una resistividad de 4 a 6 mΩ/□, los de paladio-plata entre 20 y 60 mΩ/□, y los de paladio-oro entre 10 y 100 mΩ/□, dependiendo en estos dos últimos casos de la proporción de metales en la aleación. Hay, pues, una clara ventaja en el uso de conductores de cobre en redes de interconexión.

Observaciones y análisis con el microscopio de barrido

Todos los conductores y dieléctricos, una vez quemados, se analizaron semi-cuantitativamente usando un microscopio de barrido electrónico, equipado con espectrómetros dispersivos de energía y de longitud de onda. Se fotografiaron las imágenes de electrones secundarios y dispersados para estudiar la calidad de la sinterización, porosidad, resolución y homogeneidad. Las figuras 3 a 10 ilustran algunas de estas importantes características.

Los principales resultados de estos estudios se resumen a continuación. La pasta conductora DP 9924 contiene, además de alrededor del 94% en cobre, óxidos de bismuto, plomo, boro y silicio, que constituyen el flujo vítreo que une la pasta sinterizada al sustrato.

La porosidad del conductor (Fig. 3) es aceptable, la resolución muy buena, y la estructura del grano es regular.

La pasta dieléctrica compatible DP 4275 contiene principalmente SiO₂, Al₂O₃, BaO, y PbO. Otros óxidos presentes (menos del 5%) son B₂O₃, ZrO₂, ZrO, MgO y CaO. Los PbO y ZrO son peligrosos por la posibilidad de ser reducidos a metales plomo y zinc, haciendo disminuir la fiabilidad de cruces y multicapas. Este dieléctrico presenta pocas porosidades (Fig. 4) pero su superficie es más bien irregular. La composición química de la superficie es muy heterogénea.

El conductor HER 7029-d contiene alrededor del 95% de cobre más óxidos de plomo, silicio, boro y cadmio. Sólo se detectan vestigios de Al₂O₃ y Bi₂O₃, lo que significa que es una pasta conductora mixta, que asegura la adhesión al sustrato no sólo mediante una fase vítrea (borosilicato de plomo) sino también a través de reacción química que da lugar a la formación

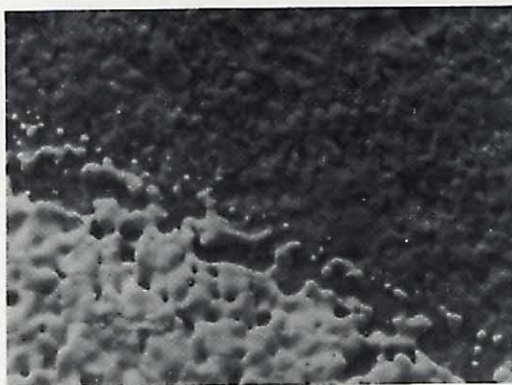


Figura 3
Conductor DP 9924
sobre sustrato de
alúmina
(500 aumentos).

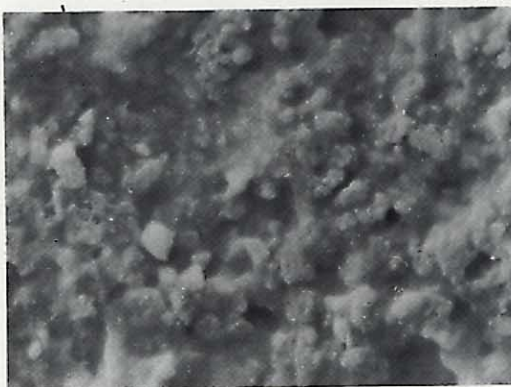


Figura 4
Dieléctrico DP 4275
(1000 aumentos).

de Al₂O₃. CdO. Este conductor tiene una estructura regular y de grano fino, y es muy denso, pero carece de resolución (ver figura 5).

El HER 7116, dieléctrico compatible con la anterior pasta conductora, contiene principalmente SiO₂, Al₂O₃ y ZrO₂, así

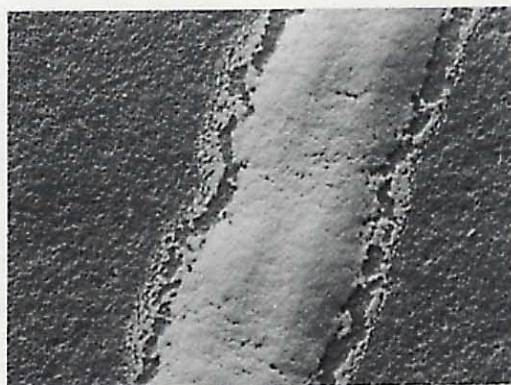


Figura 5
Conductor HER 7029-d
sobre sustrato de
alúmina
(100 aumentos).



Figura 6
Dieléctrico HER 7116
(1000 aumentos).

como un 5 a 10% de BaO y ZnO, y Co_2O_3 , B_2O_3 , CaO y MgO, en cantidades menores del 5%. El Co_2O_3 se añade como *fuentes de oxígeno*, es decir, que se incluye en la composición de la pasta por disociarse a temperaturas entre 600° y 700°C liberando oxígeno que es consumido en la sinterización de otros compuestos. Este dieléctrico es más poroso (Fig. 6), tiene una superficie más irregular y es aún más heterogéneo que el DP 4275.

La pasta conductora ENG A-4109 contiene alrededor del 95% de cobre además de óxidos de magnesio, aluminio, silicio, plomo y bismuto. Su contenido de Bi_2O_3 es aceptable, por lo que su adhesión al sustrato es mediante fase vítrea. Tiene una estructura de grano muy regular (Fig. 7), es muy densa, pero la resolución no es tan buena como la del DP 9924.

El dieléctrico compatible ENG A-4058 contiene principalmente PbO ($\pm 70\%$) más óxidos de aluminio y silicio. Los vestigios detectados de sodio y cloro son probablemente contaminantes, pues su división es heterogénea. La superficie del dieléctrico es muy densa (Fig. 8) y más bien lisa. Está parcialmente devitrificada y por tanto es heterogénea.

El conductor ESL 2311 contiene alrededor del 93% de cobre, con óxidos de bismuto, boro, silicio, plomo y cadmio. Las cantidades de SiO_2 y PbO son inferiores a las esperadas en un medio vítreo de borosilicato de plomo. Se encontraron problemas de sinterización con este conductor, pero no está claro si eran debidos al medio vítreo. Hay CdO como elemento de fijación química al sustrato. La estructura granular del material es más bien regular, pero la porosidad es muy alta (Fig. 9) y la resolución es inaceptable.

El dieléctrico ESL 4901-H contiene sobre todo Al_2O_3 , SiO_2 y PbO. También existen óxidos de boro, calcio y cobalto. En menor proporción ($< 1\%$) se encuentran los MgO, BaO, ZnO y ZrO_2 . El Co_2O_3 actúa de nuevo como fuente de oxígeno. Este dieléctrico es más bien liso, pero muy poroso (Fig. 10).

Pruebas eléctricas y ambientales en dieléctricos

Las combinaciones de materiales estudiadas se muestran en la tabla 2. Esta no incluye el dieléctrico ENG A-4058, pues todos los circuitos a base de este material fallaron.

Se utilizó la matriz de pruebas mostrada en la figura 11 para todas las combinaciones. Los principales resultados de las pruebas se resumen seguidamente.

La encapsulación con Durez (silicona) e Hysol (epoxia) tiene una influencia adversa en la resistencia de aislamiento, probable-

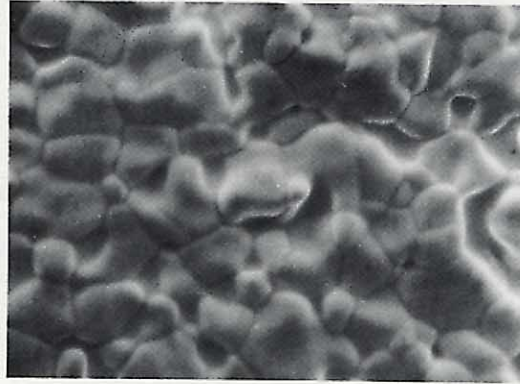


Figura 7
Conductor ENG A-4109
en sustrato de alúmina
(1000 aumentos).

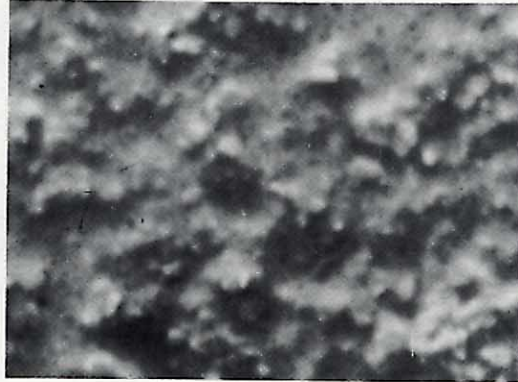


Figura 8
Dieléctrico ENG A-4058
(600 aumentos).

mente por interacción con la capa impresa superior. La constante dieléctrica (y por tanto la capacidad de acoplamiento entre capas) es notablemente menor que para dieléctricos quemados en aire. En el caso del DP 4275, su valor es la mitad que para el DP 9950. Este es un factor importante a

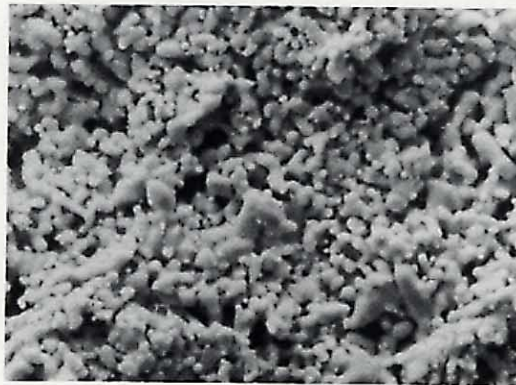


Figura 9
Conductor ESL 2311
en sustrato de
alúmina; la muestra
fue mal sinterizada
(1000 aumentos).

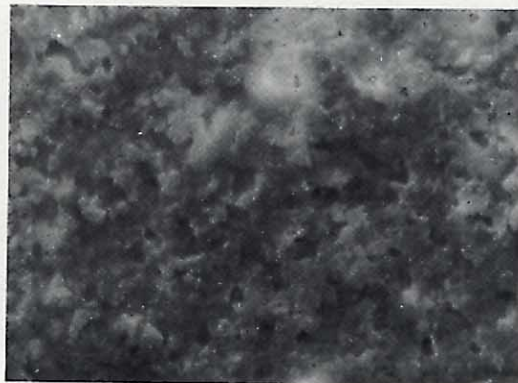


Figura 10
Dieléctrico ESL 4901-H
(1000 aumentos).

favor de los dieléctricos quemados en atmósfera de nitrógeno.

Los voltajes de ruptura son sólo marginalmente menores que en los sistemas de quemado en atmósfera de aire, alcanzando los 800 V con capa protectora encima.

Las combinaciones 1 y 2 son las más fiables, seguidas de las 5 y 6. La fiabilidad es algo menor que en conductores de oro, pero mucho mayor que para conductores con plata. Las combinaciones 3, 4 y 7 no han demostrado ser fiables.

Conclusiones

Las pastas conductoras de cobre y sus dieléctricos compatibles pueden ser suministradas al menos por cuatro fabricantes de materiales de película gruesa. A lo largo de este estudio se ha adquirido confianza en su procesabilidad, lo que ha conducido al desarrollo de un circuito de tres capas para el Sistema ITT 1240. Este circuito permite la interconexión de 4 puertos de conmutación, ofreciendo una reducción de la complejidad de la placa de circuito impreso y mejorando la reparabilidad y la realización de pruebas.

Se dispone también de tintas resistivas, pero hay todavía problemas de estabilidad y para conseguir resistencias de valores altos. El desarrollo de una completa gama de tintas resistivas con valores más estables permitirá la sustitución del oro en un buen número de híbridos usados en el Sistema ITT 1240.

Por tanto, las posibilidades de las pastas basadas en cobre se limitan hoy estrictamente a las redes de interconexión. En el futuro podrán reemplazar al oro en los actuales circuitos híbridos.

Martin Hinoul nació en Maaseik, Bélgica, en 1940. Se doctoró en físicas en la Universidad Católica de Lovaina, en 1971. Antes de ingresar en BTM en 1973, llevó a cabo trabajos postdoctorales en física de estado sólido en varias universidades. Durante dos años trabajó en fabricación como ingeniero de procesos avanzados. Desde 1975, el Dr. Hinoul ha dirigido el departamento de investigación y desarrollo de la fábrica de componentes de BTM en Gante.

Tabla 2 — Combinación de materiales para pruebas de dieléctricos

Combinación	Conductores superior e inferior	Dieléctrico	Capa de protección
1	DP 9924	DP 4275	—
2	DP 9924	DP 4275	DP 4275
3	DP 9924	HER 7116	—
4	DP 9924	HER 7116	HER 7116
5	HER 7029-d	HER 7116	—
6	HER 7029-d	HER 7116	HER 7116
7	ESL 2311	ESL 4901-H	—

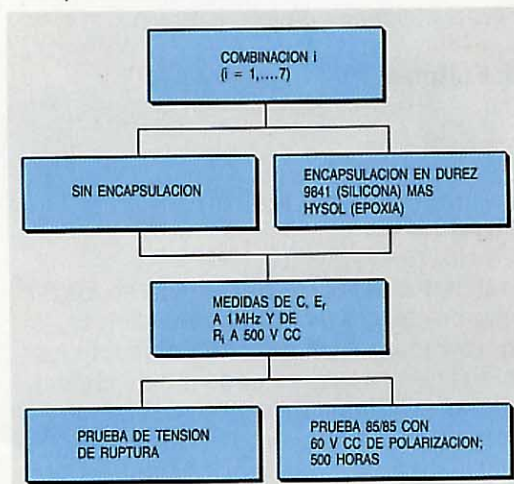


Figura 11 Matriz de pruebas para combinaciones de conductores y dieléctricos. C es la capacidad entre los conductores de arriba y de abajo, E_r es la constante dieléctrica relativa, y R_i es la resistencia de aislamiento entre los conductores superior e inferior.

Walter Vermeirsch nació en 1951. En 1974 se graduó como ingeniero metalúrgico en la Universidad de Gante, donde ha trabajado como adjunto y más tarde como catedrático. Se dedicó principalmente a técnicas analíticas de rayos X, tales como fluorescencia, difracción y análisis microscópico. El Sr. Vermeirsch ingresó en BTM en 1979, donde trabaja habitualmente en el laboratorio de tecnología y análisis de superficies sobre fiabilidad y desarrollos en híbridos de película gruesa.

R. Vlaeminck nació en Brujas, Bélgica, en 1934. Se graduó como ingeniero eléctrico en la Escuela Técnica superior de Ostende en 1956. Ingresó en BTM en 1958, trabajando en resistencias de carbón, semiconductores de potencia, dispositivos MOS y memorias de burbuja. Desde 1975 ha dirigido el laboratorio analítico y tecnológico de BTM en Gante. Las principales técnicas de análisis usadas en este laboratorio son: espectroscopia Auger, espectroscopia de rayos X, análisis por dispersión de energía y longitud de onda, y microscopia de barrido electrónico.

Sustratos de interconexión tipo chipstrato para sistemas electrónicos avanzados

El CHIPSTRATO*, tecnología basada en el recubrimiento de sustratos con elastómeros para reducir la fatiga mecánica en el montaje de componentes, combina muchas de las ventajas de la tecnología híbrida de película gruesa con el tamaño y bajo coste de las placas de circuito impreso. Puede usarse para el montaje de componentes sin terminales ni encapsulado, con altas densidades de interconexión.

M. El Refaie

Exacta Circuits Limited, Selkirk, Escocia

Introducción

Gran parte del coste del equipo en los sistemas electrónicos depende de los componentes y de las técnicas adoptadas en su interconexión. Puede mejorarse por tanto el rendimiento económico usando técnicas de interconexión eficientes, de alta densidad, adecuadas para los componentes sin terminales, sean encapsulados o no.

Los estudios de costes relativos de interconexión a distintos niveles han demostrado que el interconectar funciones lógicas dentro de la pastilla es lo más eficaz en el aspecto económico. El coste de interconexión a este nivel es tan sólo del 3% del coste al nivel siguiente (placa de circuito impreso) y apenas el 0,04% de la interconexión mediante cables coaxiales y conectores. Se ha estimado igualmente que una considerable proporción del coste total de un sistema depende del área de los sustratos de interconexión, llegando hasta un 65% del coste de un ordenador digital y un 50% para una central telefónica.

De aquí resulta el considerable interés en el desarrollo de técnicas para el montaje superficial de componentes que sean más eficaces, más económicas y capaces de admitir altas densidades de interconexión. Estas son las razones que han movido al desarrollo de la técnica del chipstrato, ideal para el montaje de los modernos componentes sin terminales ni encapsulado, con altas densidades de empaquetado y usando técnicas automáticas de producción. Con ella pueden producirse fácilmente circuitos multicapa, y es posible incorporar disipadores de calor integrales.

Se han utilizado ya con éxito sustratos de este tipo en cierto número de aplicaciones.

Comportamiento

El tiempo de ejecución de decisiones lógicas, es decir, el tiempo de retardo, da una medida del comportamiento del sistema. Las medidas han demostrado que dicho retardo viene a ser inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la densidad real de empaquetado de puertas a nivel de placa de circuito impreso.

La densidad real de empaquetado puede aumentarse haciendo mayor la escala de integración a nivel de pastilla y la densidad de terminales; esto a su vez exige mejorar los encapsulados LSI y desarrollar nuevos sustratos compatibles con ellos. Se ha seguido este camino en el desarrollo de la tecnología chipstrato utilizada con los actuales componentes, sin terminales ni encapsulado.

Encapsulado e interconexión de pastillas

La densidad de terminales de entrada/salida para cápsulas DIP (en doble fila) es pequeña frente a la que permiten los portadores de circuito y la soldadura automática por cinta (TAB)¹. Los portadores sin terminales y con soldadura TAB no necesitan taladros para el montaje. Las interconexiones entre planos de señal requieren taladros mucho menores, liberando así un valioso espacio de interconexión y permitiendo montaje superficial de componentes en ambas caras del sustrato. Resulta, pues, que el encapsulado sin terminales aumenta la densidad total y mejora el comportamiento del sistema. Igualmente, el uso de tales encapsulados reduce el coste y mejora la fiabilidad².

* Marca registrada del Sistema ITT

Tecnología chipstrato

Los principales requisitos técnicos del chipstrato son los siguientes:

- compatibilidad entre componentes y sustrato
- alta densidad de interconexión
- buena disipación térmica.

Compatibilidad componentes-sustrato

El montaje superficial de componentes directamente sobre un sustrato plantea diversos problemas. Los componentes carecen de terminales, presentan superficie de contacto plana y tienen propiedades mecánicas diferentes de las del sustrato.

La fatiga en la unión componente-sustrato se expresa por la siguiente ecuación:

$$\text{fatiga} = \text{deformación} \times \text{módulo de elasticidad.}$$

Para que la fatiga quede reducida a un valor aceptable, la deformación o el módulo de elasticidad deben mantenerse en valores bajos. Ciertos cambios en la geometría de la unión pueden reducir la deformación que se transmite al sustrato, pero ello está limitado por las configuraciones de los componentes y conductores.

En el caso de carga térmica, la deformación es proporcional al cambio de temperatura y a la diferencia en los coeficientes de dilatación del componente y del sustrato. Puede, pues, reducirse la deformación minimizando cualquier subida de temperatura o bien equilibrando dichos coeficientes de dilatación. Un ejemplo de esta última solución es la tecnología híbrida de película gruesa, donde las propiedades mecánicas de los componentes y sustratos son similares, reduciéndose por tanto deformaciones y fatigas durante el ciclo térmico.

Otra solución es considerar el módulo elástico equivalente

$$E = E_s \left(\frac{E_s}{E_c} + 1 \right)^{-1}$$

Se observa que si el módulo de elasticidad del sustrato E_s es mucho menor que el de los componentes E_c , la fatiga resultante es pequeña. Cuando se usan materiales con módulos de elasticidad elevados (alúmina o silicio), pequeñas diferencias en los coeficientes de dilatación pueden producir fatigas inaceptables durante el ciclo térmico.

Los polímeros, reforzados o no, presentan básicamente las propiedades físicas de la matriz polímera. Los módulos de elasticidad de los polímeros son un orden de magnitud menores que los de los materiales cerámicos de alúmina o silicio. Esto ha sido confirmado por los trabajos sobre fiabilidad

del montaje superficial de portadores cerámicos sin terminales en placas de circuito impreso de epoxia con refuerzo de vidrio^{3,4,5,6,7} cuya vida media está limitada; además el diagrama de fallos de las soldaduras suele ser direccional, dependiendo de la geometría de reforzamiento.

También se ha apreciado el efecto del módulo de elasticidad durante la investigación experimental del encapsulado con polímeros⁸; los encapsulantes con menor módulo de elasticidad han producido las tasas mayores de fiabilidad en las soldaduras de la pastilla durante los ciclos térmicos.

Debe advertirse que el efecto del módulo de elasticidad se presenta igualmente en los casos de carga mecánica estática y dinámica (choque y vibración).

Sustratos recubiertos de elastómeros

Utilizando el principio de reducción del módulo de elasticidad equivalente, se ha desarrollado una solución basada en la unión de los nodos de montaje de componentes y los conductores al sustrato mediante un elastómero.

Los elastómeros son de uso común en la industria electrónica. Tenemos como ejemplo las poliimidadas, epoxia, epoxia modificada y mezclas de caucho nitrílico con fenoles, epoxias, acrílicos, etc. Se aplican al sustrato mediante recubrimiento, inmersión o serigrafía de polímeros líquidos, o por laminación de polímeros semicurados bajo calor y presión. El grosor del recubrimiento suele ser de 0,002 a 0,004 pulgadas (0,05 a 0,10 mm). El curado del recubrimiento de polímero se consigue calentando el sustrato en un horno con circulación de aire de 160 a 200°C, durante 2 a 3 horas.

El diagrama de conductores se forma por electrodeposición de cobre dúctil; el sustrato soporte puede ser un dieléctrico (p. ej., laminado de epoxia reforzada con vidrio, como en la tecnología de circuito impreso), o un conductor (cobre o aluminio) para mejorar la disipación térmica.

Dos sustratos diferentes, recubiertos de elastómero, se sometieron a pruebas de ciclo térmico (norma militar 833B, método 1010.2, condición B) junto con sustratos de control de alúmina y poliimida reforzada. Los dos sustratos recubiertos de elastómero soportaron los 432 ciclos de -55 a $+125$ °C, confirmando así la validez de este concepto⁷. Los resultados también confirmaron los hallazgos anteriores^{3,4,5} de que sólo pueden esperarse tasas de supervivencia limitadas con portadores cerámicos montados directamente en la superficie de placas laminadas de epoxia con refuerzo de vidrio, sobre todo si se trata de cápsulas de gran número de terminales.

La figura 1 muestra un prototipo de sustrato recubierto de elastómero para un intercomunicador de mano. La estructura del diagrama de conductores se cambió en dos etapas. Primero, todos los componentes pasivos de tipo convencional con terminales se remplazaron por componentes en pastilla sin terminales, montados superficialmente en la cara opuesta a las cápsulas DIP. Segundo, los componentes en cápsulas DIP se sustituyeron por encapsulados cerámicos equivalentes. Esto demuestra que una estructura de sustrato recubierto de elastómero, como el chipstrato, admite tanto el montaje superficial como la inserción de componentes en una o ambas caras al mismo tiempo, con lo que se libera espacio y se puede hacer el ensamble automático de componentes. En otros ejemplos esto permitiría el aumento de la densidad de empaquetado, obteniéndose costes más bajos y mejor comportamiento.

La adición de un elastómero en las caras de montaje de componentes no se limita a los sustratos de doble cara (Fig. 2); puede aplicarse igualmente a configuraciones multicapa.

La estrecha similitud entre los procesos de fabricación de sustratos recubiertos de elastómero y placas de circuito impreso convencionales, permite modificar con rapidez las instalaciones de cualquier planta de fabricación, pudiendo introducirse la nueva tecnología chipstrato con una mínima inversión adicional. El coste de fabricación del sustrato no debe por tanto diferir apreciablemente de los costes de fabricación de circuitos impresos convencionales.

Alta densidad de interconexión

En circuitos impresos convencionales, la densidad de interconexión viene fijada por la distancia entre los taladros de montaje de componentes (0,1 pulgada ó 2,54 mm) y el número de pistas conductoras entre nodos. Pueden conseguirse densidades de interconexión de una, dos o tres pistas conductoras. Este último caso exige el uso de pistas y separaciones de 0,004 pulgadas (0,10 mm), con taladros de 0,04 pulgadas (1 mm) y diámetros de nodo de 0,065 pulgadas (1,65 mm). La densidad varía linealmente con el número de niveles de interconexión (capas), cuando todas las interconexiones, tanto para vías de paso como para inserción de componentes, utilizan taladros metalizados.

Para las vías de paso pueden utilizarse taladros menores si así lo exige el trazado de los conductores. En el caso de estructuras multicapa, algunas vías de paso pueden estar limitadas a ciertos pares de capas internas y no es preciso que aparezcan en toda la estructura; de este modo no limitan

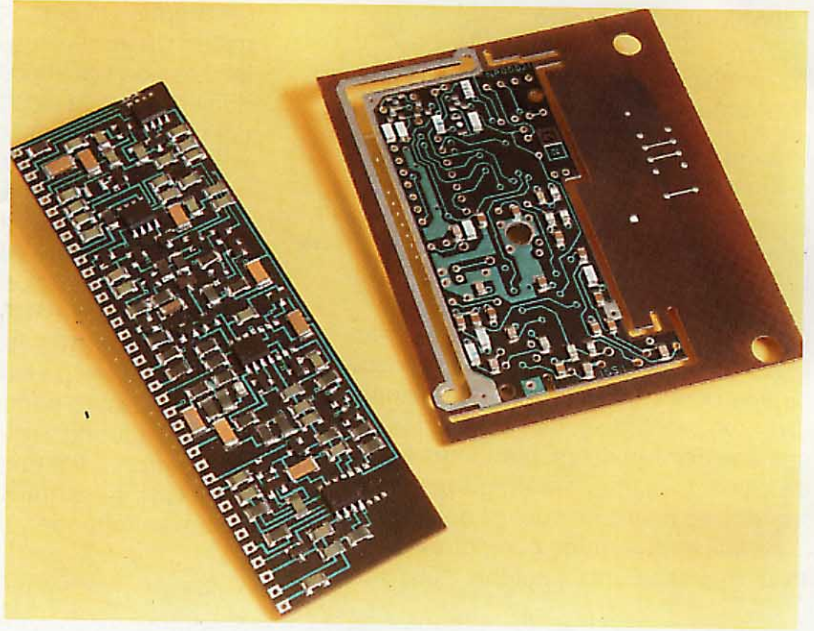


Figura 1
Circuito chipstrato de doble cara para intercomunicador (izquierda) desarrollado por Standard Telephones and Cables; el circuito se usó para montaje de componentes, tanto superficial como por taladros. A la derecha hay un circuito de línea de abonado para montaje superficial, encapsulados miniatura y componentes en pastilla.

la capacidad de interconexión de otras capas.

La tabla 1 describe el estado actual de la tecnología de circuitos impresos convencionales, demostrando que los circuitos impresos son generalmente compatibles con las densidades de interconexión que exigen las cápsulas DIP^{2,6,9,10}. El cambio a componentes y encapsulados sin terminales elimina la necesidad de taladros para montaje de componentes, ahorrando así un valioso espacio para interconexión en el sustrato. Se ha seleccionado el tamaño de taladro mínimo fiable con el fin de obtener la máxima densidad de pistas en el sustrato. La densidad de interconexión exigida para portadores de circuito sin terminales es el doble que la requerida por las cápsulas DIP. Al cambiar de la rejilla de 0,050 pulgadas (1,27 mm), necesaria para los taladros de 0,034 pulgadas (0,86 mm), a la nueva rejilla de 0,025 pulgadas (0,64 mm) que permiten las vías de 0,013 pulgadas (0,33 mm), la densidad de interconexión aumenta¹¹ en un 75%. Las nuevas anchuras de pista y

Tabla 1 — Comparación entre placas de circuito impreso y sustratos avanzados

Parámetro	Circuitos impresos actuales	Requisitos para sustratos avanzados
Taladro mínimo	0,013 pulgadas	0,004 pulgadas
Relación máxima longitud/diámetro	5,3	3
Máximo número de capas	14	6
Tamaño máximo	24 x 24 pulgadas	6 x 8 pulgadas
Mínima separación del dieléctrico	0,004 pulgadas	0,002 pulgadas
Anchura mínima de conductor	0,006 pulgadas	0,004 pulgadas
Anchura mínima de separación	0,006 pulgadas	0,004 pulgadas
Mínimo grosor del conductor	0,0005 pulgadas	0,0002 pulgadas
Resistencia térmica	aceptable	buenas
Propiedades dieléctricas	aceptables	buenas

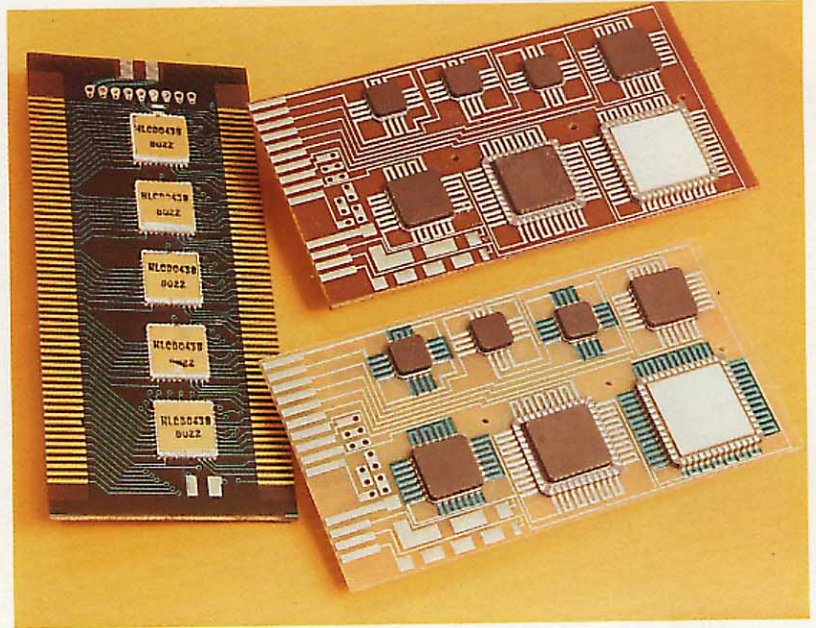
separaciones son de 0,008 y 0,014 pulgadas (0,2 y 0,36 mm), respectivamente. Estos parámetros encajan bien en las posibilidades de un proceso controlado de placas de circuito impreso.

En los casos de soldadura por TAB y adhesión directa al sustrato, la densidad exigida es de unas cinco veces la de las cápsulas DIP. Las anchuras de pista y separaciones son de 0,004 pulgadas (0,10 mm) o menos, con hasta seis niveles de interconexión para posibilitar el funcionamiento eléctrico, los cambios y reparaciones. Con tan alta densidad de pistas, una reducción en la constante dieléctrica mejorará las propiedades de transmisión en línea (capacidad, impedancia, diafonía).

Los circuitos híbridos de película gruesa ofrecen varias ventajas, entre ellas elevada fiabilidad, la posibilidad de integrar redes resistivas en el sustrato, su alta conductividad térmica, y pérdidas relativamente bajas en alta frecuencia. Tienen sin embargo inconvenientes, incluyendo limitación de tamaño, alta constante dieléctrica (alrededor de 10) y baja conductividad de los conductores. Además, la definición de las líneas está limitada por la técnica de serigrafía. Se utilizan metales nobles (oro, plata, paladio) en la fabricación de los conductores, lo cual eleva los costes, aunque los últimos avances en tintas conductoras de cobre pueden resolver este problema¹². Por último, el sistema secuencial de fabricación da lugar a bajos rendimientos de producción y alto coste unitario, en especial para los circuitos multicapa más complejos.

Por el contrario, la tecnología chipstrato ofrece tamaños que alcanzan las dimensiones estándar de los circuitos impresos (24 x 24 pulgadas en doble cara ó 14 x 14 pulgadas en multicapa), una constante dieléctrica baja (entre 2 y 5) y conductores de alta conductividad formados por deposición electrolítica de cobre. La definición de las pistas es también muy fina, y los circuitos multicapa complejos resultan más económicos. La tabla 1 contrasta la tecnología chipstrato con las características de los circuitos impresos convencionales.

La figura 3 muestra un circuito impreso de 10 capas, de 0,062 pulgadas (1,57 mm) de grueso, con vías de interconexión enterradas entre dos pares de planos de señal. Se necesitan técnicas de electrodeposición muy precisas para asegurar un metalizado uniforme ($\pm 5\%$ del grosor nominal) en taladros que tengan una relación de aspecto alta (7,5). Los anchos de pista y separaciones de 0,006 pulgadas (0,15 mm) son usuales en la industria de circuitos impresos. La figura 4 muestra que mediante un láser pueden conseguirse interconexiones de vías de 0,004 pulgadas (0,10 mm) de



diámetro, y aún menos, con alta precisión de posicionado.

Disipación térmica

La capacidad de disipación térmica es fundamental en cualquier sistema avanzado de interconexión para asegurar que el sistema opera a la temperatura adecuada.

Las cápsulas DIP y ciertos componentes con terminales permiten la inclusión de una escala o pista térmica en el sustrato, por debajo de los componentes, proporcionando así un camino de conducción térmica desde las cápsulas a la parte disipadora de calor de la estructura. La figura 5 muestra el uso de una escala térmica en una placa de circuito impreso multicapa.

Con la aparición de los componentes de montaje superficial (portadores de circuito sin terminales y componentes en pastilla), han surgido problemas en la fabricación de sustratos de interconexión convencionales adecuados para circuitos con alta disipación de potencia. Las cápsulas o pastillas carecen de terminales, son de configuración

Figura 2
Los sustratos recubiertos de elastómero son compatibles con portadores cerámicos, sin terminales. Vehículos de prueba para rutinas de ciclo térmico (derecha) y circuito chipstrato para visualizador (izquierda), usados en el sistema de vigilancia remota Hermes de Marconi Avionics.

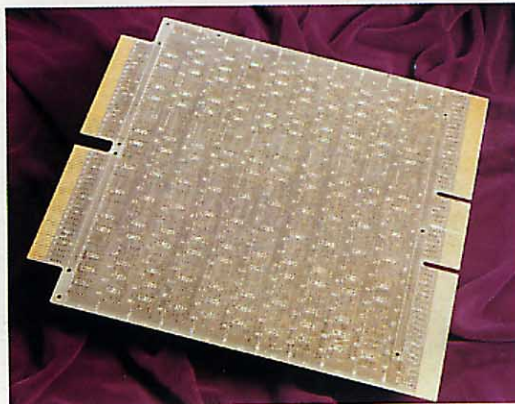


Figura 3
Circuito impreso de 10 capas de 0,062 pulgadas (1,57 mm) de grueso, con vías de interconexión enterradas entre dos pares de planos de señal.

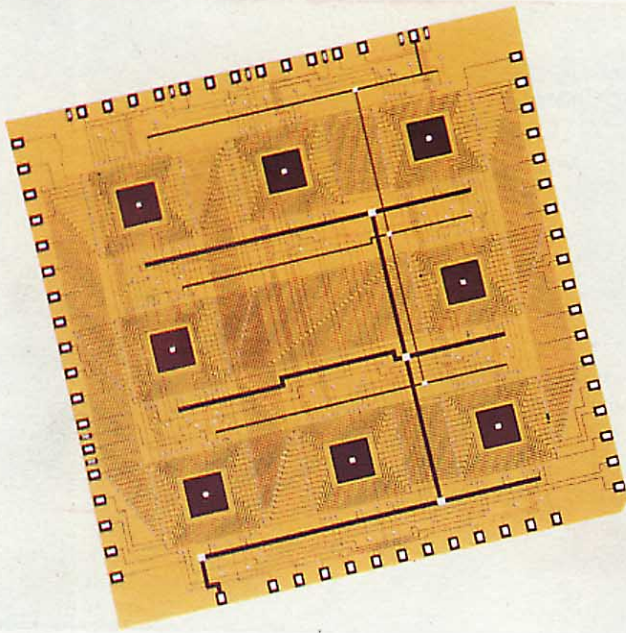


Figura 4
Circuito chipstrato de muy alta densidad de interconexión con vías de paso de sólo 0,004 pulgadas (0,10 mm); éstas pueden fabricarse con precisión mediante la tecnología láser.

plana, y se montan próximas al sustrato, dejando poco espacio al nivel de la superficie de montaje para la inclusión de un plano de conducción térmica. Sin embargo, en los últimos años, se han ideado diversas soluciones que satisfacen algunas de las exigencias funcionales.

En la tecnología chipstrato, durante la fabricación de los sustratos de alta densidad de interconexión, se incluyen planos de conducción térmica en la proximidad de las capas de montaje superficial, que conducen el calor hacia el disipador. El sustrato de interconexión y los planos internos de conducción forman así una unidad integral.

Los planos de conducción térmica se fabrican a partir de un material adecuado

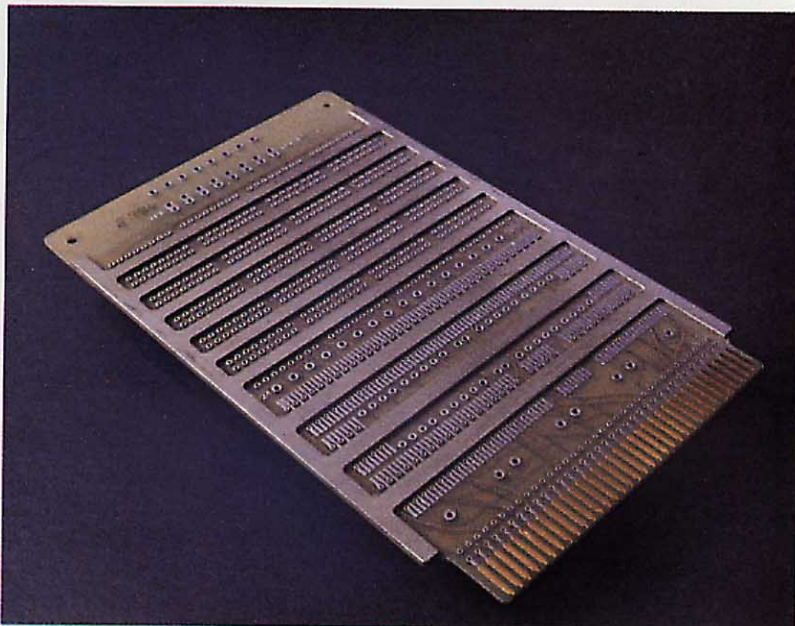
(cobre, aluminio), dejando aberturas para permitir el paso de las vías de interconexión. A continuación, los planos se oxidan o anodizan químicamente para facilitar la adhesión y se incluyen junto con otras capas en la laminación y soldadura de la estructura. La distancia entre el plano térmico integral y la capa de montaje superficial es el camino de resistencia térmica, el cual puede controlarse de acuerdo con las exigencias del diseño. Pueden conseguirse separaciones típicas de 0,004 pulgadas (0,10 mm).

También es posible fabricar el plano de conducción térmica de manera que proporcione un camino térmico directo a los componentes, minimizando así la resistencia y cualquier influencia adversa en la capacidad de interconexión del sustrato.

Un sustrato integral de interconexión reduce los problemas de disipación de potencia no uniforme (puntos calientes) y mejora el gradiente térmico a través del sustrato del mismo modo que lo hacen las placas de núcleo metálico. Se espera que la subida de temperatura sea superior a la alcanzada en los sustratos de núcleo metálico (de 3 a 5°C por vatio), debido a ser más corto el camino de resistencia de la separación dieléctrica. Actualmente se realizan pruebas para confirmar esta propiedad.

En la figura 6 se muestra un corte transversal de un sustrato de interconexión con un disipador integral; sobre él se verifican en estos momentos pruebas térmicas.

Figura 5
Escala térmica en un circuito impreso multicapa para mejorar la disipación.



Conclusiones

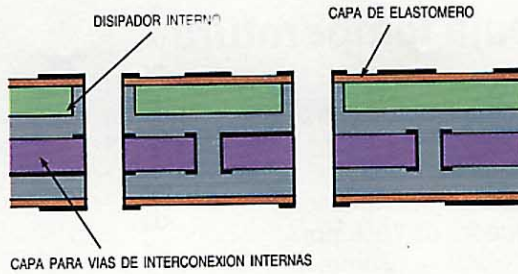
El comportamiento y coste de los sistemas electrónicos están relacionados con la densidad de empaquetado a nivel de pastilla. Los continuos avances en la industria de semiconductores, junto con las limitaciones de las actuales cápsulas DIP, son los factores que impulsan hacia las nuevas técnicas de encapsulado de portadores y de TAB. El montaje superficial de estas cápsulas sin terminales exige sustratos de interconexión con características compatibles.

El desarrollo de la tecnología chipstrato se dirigió a cubrir los requisitos de compatibilidad entre componentes y sustrato, fiabilidad, alta densidad de interconexión y buena disipación térmica.

Agradecimiento

El autor desea agradecer la ayuda de R. McQuat e I. Wylie de Exacta Circuits, así como a K. A. Matthews y sus colegas de Standard Telecommunication Laboratories

Figura 6
Sustrato recubierto de elastómero con disipador integral.



su contribución al desarrollo del sustrato recubierto de elastómero. También quiere agradecer a Marconi Avionics, Reino Unido, y a Cii Honeywell Bull, Francia, el permiso para publicar las fotografías de las figuras 2 y 3, respectivamente.

Referencias

- 1 G. A. Katronge y G. Northover: Chip Carriers for Computer Applications: *Circuits Manufacturing*, febrero 1981, volumen 21, n° 2, págs. 69-74.
- 2 P. R. Jones: Leadless Carriers, Components Increase Board Density by 6:1: *Electronics*, 25 agosto 1981, volumen 54, n° 17, págs. 137-140.
- 3 R. E. Settle, Jr.: A New Family of Microelectronic Packages for Avionics: *Solid State Technology*, junio 1978, volumen 21, n° 6, págs. 54-58.
- 4 C. L. Lassen: Use of Metal Core Substrates for Leadless Chip Carrier Interconnection: *Electronic Packaging and Production*, marzo 1981, volumen 21, n° 3, págs. 98-104.
- 5 J. E. Fennimore: Using Leadless Components Technology on Printed Wiring Boards: *Electronic Packaging and Production*, diciembre 1978, volumen 18, n° 12, págs. 128-132.

- 6 G. F. Love: The impact of Chip Carriers on Printed Wiring Board Fabrication: *Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits Technical Review*, diciembre 1981, n° 243, págs. 12-19.
- 7 D. Fishman y N. Cooper: Mounting Leadless Chip Carriers onto Printed Circuit Cards: *Proceedings of the Technical Program of the International Electronics Packaging Society Conference*, Cleveland 9-10 noviembre 1981, págs. 45-55.
- 8 S. M. Boyer y P. J. Etter: Factors Affecting the Protection of Thick Film Hybrids Using Conformal Coatings: *ITT Technical Report No STL 1339*, mayo 1981; publicado además como dos trabajos separados, The Protection of Substrates from Moisture Related Conductance Effects, y Evaluation of Bonded Connections and Conformal Coatings on Hybrid Integrated Circuits by Thermal Cycling, en *Proceedings of the Third European Hybrid Microelectronics Conference*, Avignon, 20-22 mayo 1981, págs. 345-354 y 466-473.
- 9 G. Messner y C. Lassen: Substrates for Surface Mounted Components: *Circuit World*, 1981, volumen 8, n° 1, págs. 10-14.
- 10 C. L. Lassen: Wanted a New Interconnection Technology: *Electronics*, 27 septiembre 1979, volumen 52, n° 20, págs. 113-121.
- 11 B. T. Patterson: The Challenge of Interconnection: *Circuits Manufacturing*, febrero 1981, volumen 21, n° 2, págs. 22-31.
- 12 M. Hinoul, W. Vermeirsch y R. Vlaeminck: Tintas de metales no nobles para circuitos híbridos de película gruesa: *Comunicaciones Eléctricas*, 1982, volumen 57, n° 2, págs. 137-141 (en este número).

Mah El Refaie nació en Egipto en 1942. Se graduó en la Universidad de El Cairo en 1963 y obtuvo el PhD en la Universidad de Liverpool, Inglaterra, en 1969. El Dr. El Refaie se incorporó a la Universidad de Salford como profesor de ingeniería mecánica, llegando a ser ingeniero senior consultor en el Engineering Design Centre de Salford. En 1973 fue nombrado ingeniero senior del ICL en West Gorton, antes de incorporarse a Exacta Circuits en 1976 como responsable de desarrollo.

Soldadura a baja temperatura

Los circuitos integrados están expuestos a choque térmico durante la soldadura, lo que puede afectar a su fiabilidad a largo plazo. Las sueldas de baja temperatura, con puntos de fusión alrededor de 70°C por debajo de los de las aleaciones existentes, ofrecen excelentes características de soldadura y pueden reducir los fallos.

S. Smernos

R. Strauss

Standard Elektrik Lorenz AG, Stuttgart,
República Federal de Alemania

Introducción

La soldadura es un proceso de unión de piezas metálicas utilizando una aleación para soldar en fusión y un fundente. Obviamente, el punto de fusión de la suelda o metal de aportación debe ser inferior al de las piezas metálicas a unir. Durante la soldadura las piezas se mojan sin fundirse, siendo necesario que entre la suelda y las piezas haya contacto metálico sin óxido. El fundente elimina los óxidos metálicos de la superficie de las piezas, asegurando una aleación adecuada entre la suelda líquida y el metal. Además, el fundente mejora el mojado de las piezas y las protege contra la oxidación durante la soldadura¹.

La reacción entre el fundente y los óxidos metálicos depende mucho de la temperatura. Las sueldas convencionales se emplean entre 240 y 250°C, a cuyas temperaturas los fundentes resínicos normales son suficientemente agresivos para eliminar los óxidos metálicos. Sin embargo, para soldar a temperaturas más bajas (de 170 a 190°C) hay que utilizar fundentes más agresivos. Para evitar la corrosión después de soldar, hay que eliminar esos fundentes limpiando la soldadura. En Standard Elektrik Lorenz se han investigado y probado varias sueldas de bajo punto de fusión y fundentes apropiados, en cooperación con ERSA de Wertheim (fabricantes de sueldas y equipos de soldadura).

Soldadura a baja temperatura

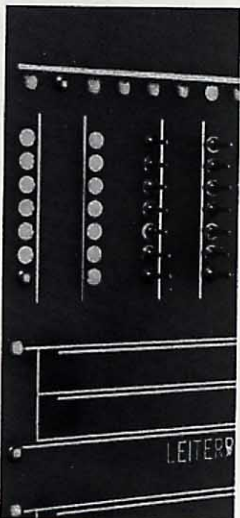
La soldadura convencional a máquina con sueldas normales de estaño y plomo (generalmente con el 63% de Sn) requiere temperaturas de 245 a 260°C. Aunque esto haya sido satisfactorio hasta ahora, el creciente uso de la integración en gran escala y de componentes sin terminales (conecta-

dos mediante electrodos metálicos en su superficie), que entran en contacto directo con la suelda fundida durante la soldadura a máquina, está exigiendo nuevas sueldas para temperaturas más bajas. Las temperaturas de soldadura elevadas pueden afectar a los semiconductores y a los circuitos integrados, que ahora suelen tener más de 40 terminales en lugar de los 16 a 22 tradicionales. En particular, las cápsulas cerámicas con terminales en doble fila pueden sufrir daños por choque térmico a causa del desequilibrio de dilataciones dentro del paquete vidrio-cerámica-metal (Fig. 1). El riesgo de que se produzcan daños térmicos es aún mayor al desoldar y al volver a soldar.

Reducción del riesgo térmico

Los métodos más simples de minimización del riesgo térmico se basan en impedir la aplicación de calor directo durante o después de la soldadura. Se han empleado con éxito en el pasado shunts térmicos, pero sólo son aplicables con encapsulado en doble fila y no en las placas actuales de alta densidad de componentes. Otra técnica convencional, la refrigeración por aire de las placas después de la soldadura, ya no es muy eficaz con los componentes más pequeños y las densidades de implantación más altas que se utilizan en los equipos modernos. La refrigeración por aire también puede perjudicar la calidad de las uniones: el aire frío disperso puede enfriar las conexiones soldadas mientras se están formando, impidiendo la penetración completa de la suelda (soldaduras frías); la solidificación acelerada de la suelda en el secado hace que quede demasiada en la placa (exceso de soldadura). Ninguno de estos métodos resuelve los problemas que se presentan al desoldar y volver a soldar.

Parte de una placa de prueba soldada con BiSn a 170°C.



Búsqueda de aleaciones apropiadas

Las principales aleaciones de SnPb son del 60/40 con una gama de fusión entre 183 y 190°C; y del 63/37 con el punto de fusión a 183°C. Las dos tienen una temperatura de soldadura de 250°C.

Se buscaron nuevas aleaciones que permitieran rebajar la temperatura de soldadura hasta 180 a 200°C sin aumentar los tiempos necesarios (es decir, 2 s para la soldadura por ola y de 5 a 7 s para la soldadura por arrastre). Además, la capacidad de mojado, la robustez de la unión y las propiedades de fluencia debían ser al menos iguales a las de las sueldas existentes, para garantizar que la calidad de la unión no iba a disminuir. La suelda que quedara en la unión no debía fundirse por debajo de 110 a 120°C, con el fin de que la unión tuviera una adecuada robustez a temperaturas realistas de funcionamiento del equipo. Finalmente, tanto los nuevos materiales como las nuevas técnicas de soldar no podían ser prohibitivamente caros (por ejemplo, aleaciones exóticas, soldadura en atmósferas protectoras).

Sueldas con contenido de cadmio

La aleación eutéctica de PbSnCd (32/50/18) funde a 145°C². Aunque los ensayos iniciales de factibilidad dieron buenos resultados de soldadura a 200°C, la toxicidad de las sueldas que contienen cadmio las hace inadecuadas para el uso industrial y se abandonó su desarrollo.

Sueldas con contenido de indio

Después se estudió una suelda de SnPbIn (54/26/20). No hay aleación eutéctica ternaria del sistema SnPbIn³, pero la combinación elegida corresponde a un canal eutectoide (Fig. 2). Su gama de fusión va de 136 a 145°C. Esta aleación se emplea ocasionalmente en la industria para la soldadura a mano o soldaduras de reparación. Tiene el contenido de indio más bajo dentro de su gama de fusión. El indio no es tóxico y mejora el comportamiento de la soldadura y la robustez de la unión.

Las pruebas de soldadura a máquina indicaron tendencia a la formación de una película de óxido, similar al efecto del cadmio, provocando problemas de secado (por ej., carámbanos y puentes); los problemas se eliminaron modificando el perfil de la ola y los parámetros de la máquina.

Sueldas con contenido de bismuto

Se estudió una aleación eutéctica⁴ con 58% de Bi y 42% de Sn, que funde a los 138°C. Dos aparentes inconvenientes eran que no había noticias de su empleo como suelda y que el bismuto no moja al cobre. Eran

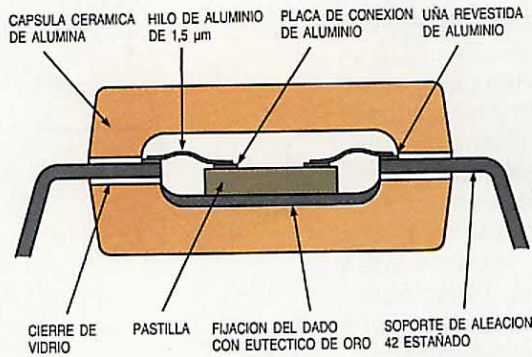


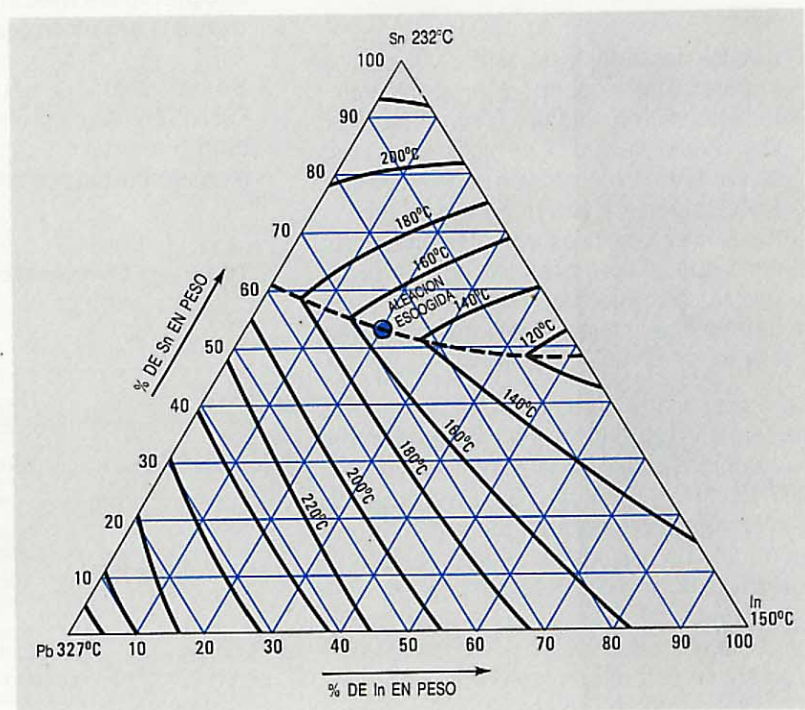
Figura 1 Sección transversal de una cápsula cerámica con terminales en doble fila indicando los focos de choque térmico durante la soldadura.

ventajas su amplio uso industrial como aleación para fundir y modelar, con buenas propiedades mecánicas, baja contracción solidificacional, buenas propiedades de fluencia en estado de fusión, escasa formación de espuma e inexistencia de película de óxido⁵. Además, la suelda de BiSn es más barata que las de SnPb.

Con esta aleación se llevaron a cabo amplias pruebas de soldadura a máquina, igual que con las sueldas de SnPbCd y SnPbIn antes indicadas. Se diseñó para este fin una placa de pruebas normalizada, con taladros metalizados y un circuito impreso estañado por reflujo de complejidad y densidad representativas de las aplicaciones industriales actuales. Cada placa de prueba tenía varias cápsulas metalocerámicas de 14 terminales en doble fila.

Se soldaron por lo menos 10 placas, con un conjunto dado de parámetros. Con la aleación de BiSn las placas podían soldarse a 170°C, con una velocidad del transportador de 20 mm s⁻¹, estando el tiempo de

Figura 2 Diagrama de punto de fusión ternario para aleaciones de SnPbIn.



contacto entre suelda y placa dentro de los usos industriales normales. Se utilizó un fundente de nueva creación que se describe más adelante. Las placas soldadas no presentaron puentes ni carámbanos, y todas las uniones tenían forma correcta y estaban bien rellenas. Se intentó reducir la temperatura de soldadura aún más, hasta los 160°C, pero se obtenían uniones de mal aspecto y no bien rellenas. Todavía se están efectuando pruebas de aislamiento de cápsulas metalocerámicas soldadas hasta 50 veces con BiSn a 180°C y con SnPb a 250°C.

Desarrollo de fundentes

Un fundente eficaz es esencial para el éxito de todos los procesos de soldadura. Tiene dos misiones; primero, debe eliminar las capas de óxido del sustrato a soldar y de la superficie de la suelda fundida, permitiendo la libre actuación de las fuerzas superficiales entre la suelda y el sustrato, dejando que la acción capilar ayude a la penetración en la unión y facilitando el secado después de soldar; segundo, el fundente debe impedir la oxidación durante la soldadura¹.

Estaba claro desde el principio que, aun cuando una suelda de nueva creación moje el sustrato tanto como una convencional, las propiedades de un fundente convencional pueden no ser adecuadas por dos motivos principales:

- A temperaturas más bajas la acción química es más débil y más lenta, y uno de los objetivos del proyecto era mantener las actuales velocidades de soldadura.
- Los fundentes resínicos en particular se vuelven más viscosos a temperaturas más bajas, dificultando la penetración de la suelda en las uniones y el secado. Esto se confirmó por ensayos experimentales. Podrían haber dado mejor resultado fundentes resínicos con plastificantes añadidos, si bien presentando otros problemas. Además, se hubieran tenido que buscar activadores nuevos y más eficaces.

Como resultado de estas consideraciones se decidió concentrarse en los fundentes no resínicos conformes a las normas DIN 8511, F-SW 23, 24 ó 25. En el curso de la investigación se creó y patentó un nuevo fundente, sin resinas ni halógenos, que cumple la norma F-SW 23. El componente activo de este fundente es un ácido orgánico que pertenece a la clase de los ácidos aromáticos oxigenados, y puede contener uno, dos o más grupos sulfónicos. Tiene

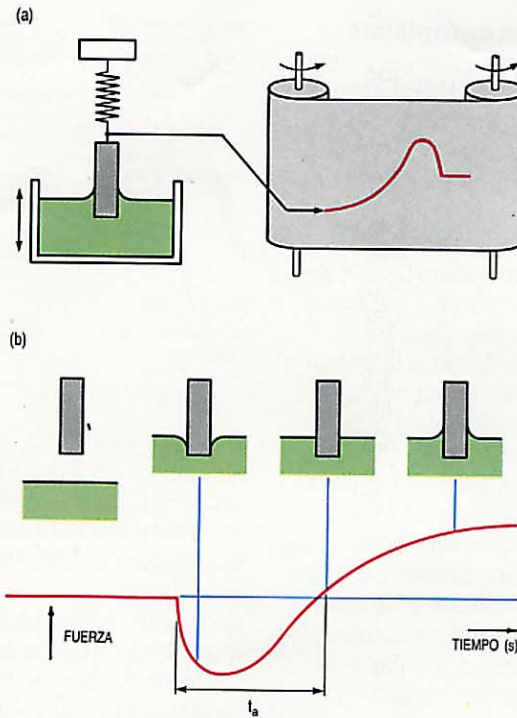


Figura 3
Medida de velocidad de soldadura por equilibrio de inmersión: a) técnica y b) significado de t_s , tiempo de soldadura.

isopropanol como disolvente y su residuo es soluble en agua. Se demostró (Fig. 3), mediante pruebas de equilibrio de mojado, que su poder y velocidad de mojado a 200°C igualan a los de los fundentes halogenados no resínicos a 250°C, y son muy superiores a los de los fundentes resínicos a cualquier temperatura.

El nuevo fundente permite soldar con BiSn a temperaturas tan bajas como 170°C y a velocidades normales de soldadura con máquina (tabla 1).

Propiedades mecánicas de las soldaduras a baja temperatura

Se determinó, de acuerdo con la norma DIN 8526, la resistencia a la cizalladura a temperatura ambiente de las uniones obtenidas entre piezas de cobre mediante

Tabla 1 - Características de soldadura de diversas aleaciones y fundentes

Suelda	Fundente	Temperatura (°C)	t_s^* (segundos)
L-Sn63Pb	Resínico, F-SW 32	250	0,73
PbSnIn	Resínico, F-SW 32	250 200	2,5 3,8
BiSn	Fundente comercial activado con halógeno	200	0,55
		170	1,31
	Nuevo fundente sin halógenos	200	0,95
		170	1,56

* t_s es el tiempo que media entre la inmersión de la probeta con fundente en un baño de metal de aportación y la obtención de un ángulo de mojado de 90°, que indica la iniciación del mojado positivo. Para soldadura a máquina a velocidades normales t_s no debe exceder de 1,5 s.

sueldas de baja temperatura. En la tabla 2 se dan los resultados. Causó cierta sorpresa la relativamente elevada resistencia a la cizalladura de las uniones realizadas con la suelda de BiSn. Falta por averiguar las resistencias a largo plazo, las cargas máximas sin deformación aparente y las resistencias a altas temperaturas (por ej., 50 y 100°C), pero los resultados hasta la fecha son alentadores.

Queda por comprobar si pequeñas cantidades de plomo en las soldaduras hechas entre piezas recubiertas de suelda de SnPb pueden provocar la formación de la mezcla eutéctica de BiSnPb, que funde a 94°C, lo que daría lugar al fallo de la unión a elevadas temperaturas de funcionamiento. Se están realizando pruebas para analizar este problema. El diagrama de equilibrio de BiSnPb publicado⁶ indica que no debiera haber peligro, a menos que se haya introducido en la unión más de un 0,5% de plomo.

Tabla 2 — Resistencia de la unión a la cizalladura

Suelda	Resistencia a la cizalladura (N mm ⁻²)
63Sn/37Pb	48 ± 4
54Sn/26Pb/20In	14 ± 2
58Bi/42Sn	67 ± 6

Conclusiones

Se ha comprobado que la soldadura a baja temperatura es una técnica viable, utilizando como metal de aportación una mezcla eutéctica de BiSn. En el curso del trabajo se ha desarrollado un nuevo fundente generalmente eficaz, así como una máquina de soldadura por ola con una configuración

mejorada. Las lecciones aprendidas pueden también aplicarse con provecho a los trabajos derivados del uso creciente de componentes sin terminales y de soldadura en fase de vapor.

Referencias

- 1 C. A. Mackay: Aspects of Soldering: Greenford, International Tin Research Institute, 1977; C. J. Thwaites: Soft-Soldering Handbook: Greenford, International Tin Research Institute, 1977.
- 2 W. Hofmann: Blei und Bleilegerungen, 2a. Edición, en Springer-Verlag, Berlin, 1962.
- 3 A. N. Campbell, R. M. Scream, T. P. Schaefer y C. M. Hoveg: Alloys of Indium: The System Indium-Lead-Tin: *Canadian Journal of Chemistry*, 1955, volumen 33, págs. 511–526.
- 4 W. v. Lepowski: Influence of Rate of Cooling on the Composition of Saturated Solid Solutions: *Zeitschrift für Anorganische Chemie*, agosto 1908, volumen 59, n°3, págs. 285–292.
- 5 Fusible Alloys Containing Tin: Greenford, Tin Research Institute, septiembre 1949, pág. 13.
- 6 T.-H. Ho, W. Hofmann y H. Hannemann: The Ternary Systems Lead-Cadmium-Bismuth and Lead-Tin-Bismuth: *Zeitschrift für Metallkunde*, 1953, volumen 44, págs. 127–129.

Stauros Smernos nació en Naoussa, Grecia, en 1945. Estudió química en la Universidad de Stuttgart, donde se graduó en 1970. En 1973 se doctoró por la misma universidad en ciencias naturales. En diciembre de 1973 ingresó en SEL, donde ha sido jefe de un grupo dedicado a tecnología de fabricación durante unos 8 años. El Dr. Smernos es miembro de la DVS (Asociación Alemana de Soldadura) y de la VDI (Asociación Alemana de Ingenieros).

Rudolf Strauss nació en Augsburg, Alemania, en 1913. Estudió física aplicada en las universidades de Munich y Leipzig, y en las universidades técnicas de Munich y Dresde de 1933 a 1938. En 1939 ingresó en Fry's Metals en Inglaterra, donde fue responsable de la invención y el desarrollo del principio de la soldadura por ola. Cuando se jubiló en 1977 era miembro del consejo de dirección y responsable de investigación y desarrollo dentro del grupo de compañías. Desde entonces ha actuado como consultor independiente en el campo de la tecnología de la soldadura. Pertenece al Institution of Metallurgists y al Institute of Printed Circuit Technology.

Componentes semiconductores con encapsulado plástico para sistemas de telecomunicación

Los fallos debidos a la condensación se reducen drásticamente en los equipos que operan en permanencia. El exceso de temperatura de los componentes o del equipo reduce la humedad relativa, combatiendo así el mecanismo causante del fallo.

D. Stroehle

Standard Elektrik Lorenz AG, Stuttgart, República Federal de Alemania

Introducción

La industria de telecomunicación, en el pasado, ha sido conservadora en la aplicación de nuevas tecnologías por ser la fiabilidad un requisito prioritario. En los sistemas electrónicos modernos, la fiabilidad está ante todo determinada por la tasa de fallo de los componentes semiconductores. En particular, en los sistemas digitales, se utiliza un número considerable de dispositivos de alta y muy alta escala de integración.

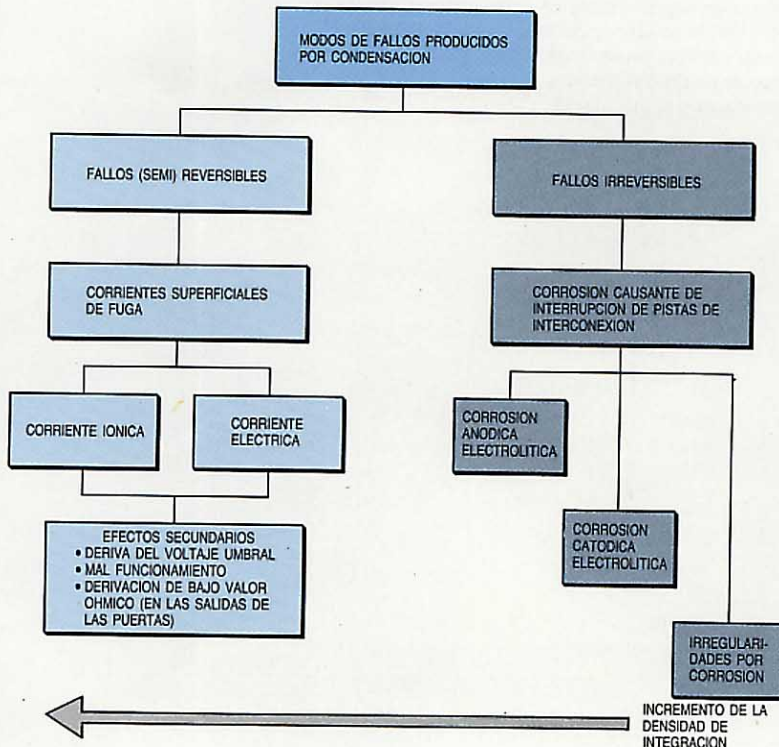
El análisis de los componentes afectados demuestra que los defectos en el sustrato de silicio causan menos del 5% de los fallos. Son más críticas las uniones entre el silicio y las pistas metálicas de interconexión, y las propias metalizaciones (cerca del 50%), y en el caso de transistores MOS las

partes cercanas a la superficie de silicio, sensibles a los iones, como las delgadas puertas de óxido y la unión de la película de óxido y el sustrato de silicio. No es sorprendente, pues, que la causa primordial del fallo de los componentes sea una delgada película de agua (algunas capas moleculares simples) que cubre todas las superficies libres. El fallo puede tener orígenes diversos pero el factor más importante son los intensos campos eléctricos necesarios para el correcto funcionamiento del dispositivo (exceptuando los ataques de la corrosión). Cuando el agua se disocia en los iones H^+ y OH^- , causa una corrosión electrolytica de las pistas metálicas de interconexión, un incremento de la corriente superficial de fuga, y una deriva del voltaje umbral como consecuencia de la atracción de los iones H^+ (protones) en la región de óxido de la puerta. El dipolo formado por las moléculas de agua, en su forma no disociada, tiene un fuerte momento, que produce unos centros de atracción de las cargas móviles (electrones y huecos) en la delgada capa de óxido de los transistores MOS y genera capacidades parásitas por efecto de la polarización.

Además, es interesante resaltar que la presencia de una película de agua incrementa considerablemente la movilidad de los iones contaminantes (K^+ , Na^+ , Ca^{++} , Cl^- , etc.) en la superficie del semiconductor. En la figura 1 se resumen los modos de fallo debidos a la condensación.

Hasta la fecha han sido inútiles todos los intentos de sellar la superficie sensible del semiconductor con una capa protectora impenetrable (por ejemplo, nitruro de silicio). Por consiguiente, el encapsulado de los semiconductores, además de servir de protección mecánica y para disipar el calor, debe de evitar la entrada de agua. Esto es cierto, sobre todo, para componentes utilizados en sistemas de telecomunicación, cuya vida media se espera que supere los 25 años.

Figura 1
Modos de fallos inducidos por condensación.



Comparación de los tipos de encapsulado
Generalmente se hace una distinción entre los encapsulados con una cavidad (cerámicos y metálicos), y los que no la tienen (plástico).

Los encapsulados cerámicos pueden parecer los ideales, por no tener el material de la cápsula contacto directo con la pastilla (es decir, con el pasivado vítreo que recubre elementos activos sensibles), y también por ser impenetrable a los gases y fluidos, y no descomponerse ni desprender vapores aun a temperaturas elevadas. No obstante, pueden surgir problemas debidos a fallos de fabricación o a inevitables compromisos de la tecnología: vapor producido en la atmósfera del horno que se queda encerrado en la cápsula; vapor deadsorbido a la cavidad interna durante el sellado con vidrio de los encapsulados cerámicos "en doble fila" por el propio vidrio sellante; vapor adsorbido en la superficie que pasa a dicha cavidad interna; penetración de vapor de agua en la cavidad a través de grietas.

El principal inconveniente de la encapsulación en plástico es que todavía no ha sido posible el desarrollo de un material plástico lo bastante impermeable. Esto hace que, en general, estos componentes sean menos aceptables en cuanto a fiabilidad que los de encapsulado cerámico, ya que la incidencia de los fallos producidos por la condensación no se ha explicado con claridad.

Temperatura, humedad relativa y presión parcial de vapor de agua

La presión parcial de vapor p depende exponencialmente de la temperatura (Fig. 2). Sin embargo, existe una correlación lineal entre la presión parcial del vapor de agua y la humedad relativa, viniendo dada esta última por la presión parcial p dividida por la presión parcial de saturación p_s a una

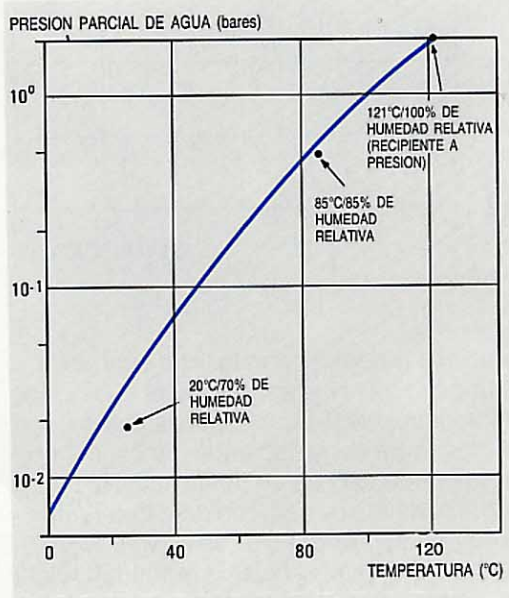


Figura 2
Presión parcial del agua p_s en saturación, en función de la temperatura.

Objetivos

El objetivo de las investigaciones sobre fiabilidad de dispositivos encapsulados en plástico es determinar el periodo de vida útil mediante pruebas de vida aceleradas, con contenidos de vapor incrementados, así como los estudios sobre materiales.

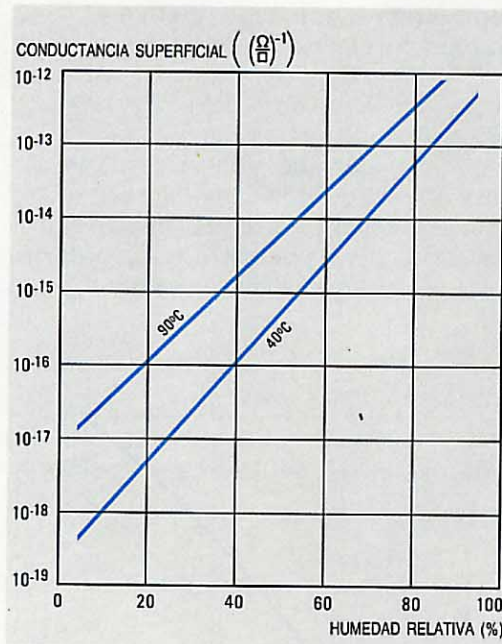
El punto de partida de estas investigaciones fue la observación de los dispositivos encapsulados en plástico, utilizados en grandes sistemas en funcionamiento permanente, que presentaban una reducción significativa de los fallos producidos por condensación, sobre los fallos esperados al extrapolar los resultados de las pruebas aceleradas de vida a las condiciones reales de funcionamiento. Esto indica que la subida de temperatura en el bastidor del sistema y en los componentes, debida a la disipación interna de potencia, es una protección activa contra la condensación. Así, pues, la clave para el uso de componentes encapsulados en plástico en sistemas de telecomunicación, está en el conocimiento detallado de este efecto de la temperatura y en el desarrollo de un modelo de extrapolación útil para convertir las condiciones de las pruebas a las condiciones reales.

temperatura determinada. Así, pues, la humedad relativa puede reducirse considerablemente, a presión p constante, incrementando la temperatura ambiente. Por ello es fundamental conocer si la tasa de fallos producida por condensación en los componentes encapsulados en plástico depende de la presión parcial del agua o de la humedad relativa.

Resultados experimentales

Se han publicado varios trabajos sobre la determinación experimental de la correlación entre la tasa acumulada de fallos o la corriente superficial de fuga y la presión parcial del agua, en función de la temperatura y de la humedad relativa. Estos análisis revelan que dichas tasa de fallos o corriente de fuga dependen exponencialmente de la humedad relativa, mientras que el efecto de la temperatura es bastante menos pronunciado de lo que cabía esperarse, dada la variación de la presión parcial de agua con la temperatura. La figura 3 muestra cómo varía la conductancia superficial con la humedad relativa a diferentes temperaturas. La conductancia superficial específica varía

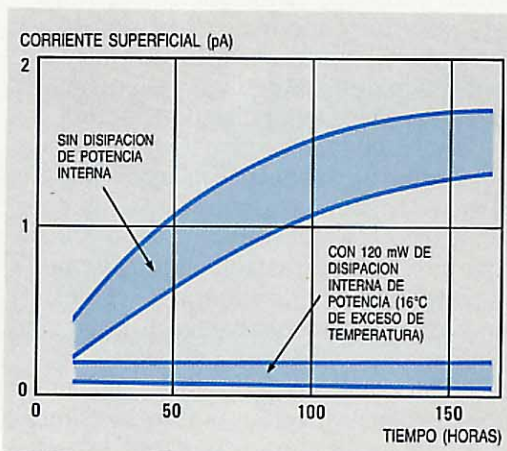
Figura 3
Conductancia superficial en función de la humedad relativa, a 40 y 90 °C, en componentes encapsulados en plástico.



en cinco órdenes de magnitud cuando la humedad relativa pasa del 20 al 100%. La influencia, relativamente escasa, de la temperatura sobre la conductancia superficial puede explicarse por la activación térmica de los portadores de carga (iones y electrones). Las gráficas de 40 y 90 °C en la figura 3 divergen al bajar la humedad relativa, indicando que la energía de activación cambia (en este caso, aumenta) de 0,4 eV a 0,65 eV, desde altas hacia bajas humedades relativas. Como referencia, la energía de activación para la conducción electrolítica del agua pura es de 0,34 eV.

Se investigó el efecto del autocalentamiento del componente sobre la sensibilidad a la condensación, utilizando estructuras de ensayo especiales, sometidas a pruebas aceleradas de vida a 121 °C y 100% de humedad relativa, en un recipiente a presión. Estas estructuras consistían en dispositivos de semiconductor con resistencias de gran área difundidas, sobre las

Figura 4
Variación de la corriente superficial de fuga con el tiempo a 121 °C y 100% de humedad relativa, con disipación interna de potencia y sin ella, en la estructura de prueba. La disipación de potencia fue despreciable durante las pruebas a 85 °C y 85% de humedad relativa.



que se metalizaron dos pistas de interconexión en forma de peine entrelazadas, de aluminio, con una relación de longitud a separación de 2.200. El circuito semiconductor se pegó y se encapsuló en la forma usual en un encapsulado plástico en doble fila.

Durante el ensayo se realizaron 10 ciclos de prueba sin disipación interna de potencia y 10 con ella, ajustando ésta a través de las resistencias difundidas. Los resultados se muestran en la figura 4. Sin disipación interna, la corriente superficial de fuga aumentó rápidamente; por el contrario, los dispositivos con disipación de potencia de unos 120 mW no acusaron ningún cambio en la corriente superficial de fuga, aun después de 160 horas, lo que indica una superficie seca del semiconductor. Adviértase que 40 horas de pruebas aceleradas equivalen a unos 15 años de funcionamiento en la norma climática DIN R12.

Discusión de los resultados

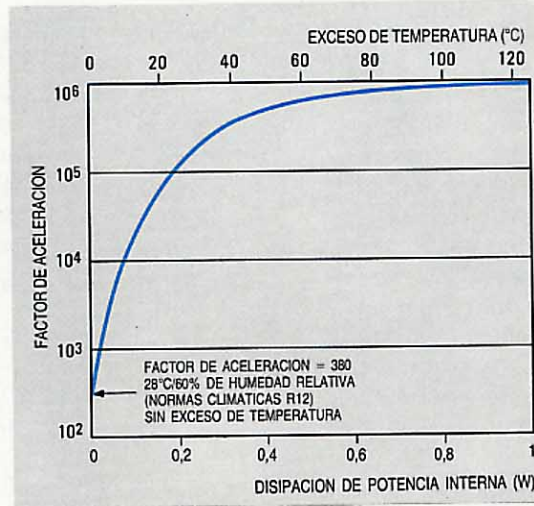
Los resultados experimentales demuestran que el parámetro que más influye en la sensibilidad a la condensación, en los componentes encapsulados en plástico, es la humedad relativa y no la presión parcial de agua. Se observa este resultado sólo si el calor de adsorción molar es aproximadamente igual al calor de vaporización. La cantidad de agua adsorbida y el contenido en agua del material plástico sólo depende entonces de la humedad relativa en un margen amplio de temperaturas. El resultado indica claramente que el mecanismo primario del comportamiento ante la humedad de los componentes encapsulados en plástico es la condensación de agua en la superficie de la cápsula. La temperatura sólo afecta a la velocidad de difusión de las moléculas de agua a través del material plástico, y a la movilidad de los iones implicados en la conducción superficial.

Las medidas realizadas con las estructuras de prueba confirman los descubrimientos señalados. El incremento en 15 °C de la temperatura superficial de la cápsula y de la pastilla misma, modifica tanto las características de condensación, que aun después de 160 horas no se observó ningún incremento apreciable en la corriente superficial de fuga. Aumentar la temperatura en la superficie equivale a disminuir la humedad relativa en las proximidades de la cápsula. En las condiciones de la prueba, por ejemplo, la humedad relativa se reduce desde el 100% a 121 °C al 65% a 136 °C, a una presión parcial de agua constante de dos bares; así se explican fácilmente los resultados experimentales.

También puede hacerse descender la humedad relativa elevando la temperatura del bastidor. En una sala con temperatura ambiente de 20°C, al 70% de humedad relativa, y una temperatura del bastidor superior en 10°C, más un incremento similar como consecuencia de la disipación interna de potencia, la humedad efectiva se reduce al 22%.

Según la figura 3, la variación del 70 al 22% de la humedad relativa reduce la conductancia superficial específica, ocasionando un incremento de más de tres órde-

Figura 5
Factor de aceleración en función de la disipación interna de potencia del componente y del exceso de temperatura de la pastilla (o bastidor). (Para extrapolación desde 85°C y 85% de humedad relativa a la norma climática R12.)



nes de magnitud en el factor de aceleración*. Por otra parte, una elevación de temperatura en 20°C sólo disminuye la aceleración en un factor de cinco, debido a la baja energía de activación de la conductancia superficial específica.

Extrapolación al funcionamiento permanente

Se ha desarrollado un modelo de extrapolación basado en anteriores investigaciones y en los resultados de SEL. La principal característica de este modelo de extrapolación es que, de acuerdo con los resultados experimentales, la energía de activación depende de la humedad relativa, mientras que la propia humedad relativa afecta exponencialmente a la vida de los componentes con encapsulamiento plástico.

La extrapolación, calculada por ordenador, tiene en cuenta el voltaje de alimentación de los componentes, la disipación

* Multiplicador que permite extrapolar los resultados experimentales de las pruebas aceleradas de vida a las condiciones reales de funcionamiento. La conversión es: tiempo de vida en las pruebas × factor de aceleración = tiempo de vida en funcionamiento real.

interna de potencia (convertida en un exceso de temperatura del dispositivo por la resistencia térmica), y el exceso de temperatura del bastidor. También es posible simular las normas climáticas DIN R12 y R14.

En la figura 5 se muestran los factores de extrapolación para la conversión de las condiciones de prueba (85°C y 85% de humedad relativa) a las de las normas climáticas DIN R12, en función de la disipación interna de potencia en un circuito de 16 terminales, y también del exceso de temperatura de un componente en el bastidor. Se ha supuesto que la disipación de potencia durante las pruebas fue menor que 1 mW, mientras que en el estado de funcionamiento se observan la disipación de potencia y el exceso de temperatura indicados en la figura 5. Estas condiciones son aplicables a:

- dispositivos CMOS en funcionamiento estático (caso peor), con despreciable disipación de potencia durante las pruebas, pero que en condiciones reales de operación se calientan debido a la disipación dinámica de potencia
- investigaciones realizadas sobre componentes de pequeña escala de integración con pocas puertas (es decir, con baja disipación de potencia), pero cuando los componentes utilizados en la realidad tengan una escala de integración mayor, y en consecuencia una mayor disipación de potencia.

La figura 5 también es válida para componentes con escasa disipación de potencia, situados en un bastidor con temperatura interna suficientemente alta.

Es enorme la influencia de la temperatura en las expectativas de vida ante fallos debidos a la condensación. Por ejemplo, con exceso de temperatura de 10°C, el factor de aceleración se incrementa de 380 a 10.000 (30 veces), para pasar de 85°C y 85% de humedad relativa a las condiciones de la norma R12. Como indica la tabla 1, de nuevo para las normas climáticas R12, la expectativa de vida extrapolada de componentes encapsulados en plástico es lo bastante larga para poder utilizarse en sistemas con tiempo de vida de 25 años, suponiendo que el sistema esté en funcionamiento permanente, condición válida sobre todo para los grandes sistemas.

Extrapolación al funcionamiento intermitente y al almacenamiento

Durante el almacenamiento, o cuando el sistema está desactivado, no hay exceso de temperatura y por lo tanto los componentes

Tabla 1 — Tiempos de vida de componentes encapsulados en plástico (años)

Dispositivo/Tecnología	Norma climática R12		Norma climática R12 con 10°C de exceso de temperatura del bastidor	
	100 fits	1000 fits	100 fits	1000 fits
CMOS	15	18	760	2000
	12	14	480	2000
	13	15	620	2000
	24	33	1000	2000
TTL Schottky de bajo consumo	100	145	2000	2000
	144	220	2000	2000
	179	315	2000	2000
	230	580	2000	2000
Memoria RAM dinámica de 16 K	3,8	4,0	80	390
	4,1	5,3	120	480
	15	29	1280	2000

encapsulados en plástico están sujetos a una alta humedad relativa. Sin embargo, no existen los campos eléctricos necesarios para provocar los fallos inducidos por condensación. El periodo más peligroso para un componente es justamente después de activar el equipo, si el material plástico ha tenido tiempo suficiente para absorber humedad. Las modernas resinas epoxídicas rellenas de SiO_2 absorben agua con bastante rapidez, por lo que su contenido en humedad es notablemente mayor que el del entorno inmediato. La constante de tiempo de absorción de humedad T_F (tiempo necesario para alcanzar 1/2 del contenido de humedad en saturación) depende no sólo de la relación entre la superficie activa y el volumen, sino también de la permeabilidad a la humedad. Así, pues, T_F decrece con el aumento de temperatura.

Por debajo de unos 30°C, T_F es del orden de 75 días. Esto significa que, en un ciclo de funcionamiento de dos semanas, el contenido de humedad en el material plástico cercano a la superficie del semiconductor, no sigue las variaciones de la humedad relativa del entorno causadas por sucesivas activaciones y desactivaciones del sistema, sino que alcanza un cierto valor medio. El caso peor es un tiempo largo con el equipo desactivado (14 a 75 días), seguido de un periodo de funcionamiento muy breve, durante el cual las moléculas de agua cercanas a la superficie del semiconductor estén sometidas a los campos eléctricos. Este modo de funcionamiento puede ciertamente atribuirse a los terminales.

Las simulaciones de funcionamiento intermitente con ordenador han demostrado que si el tiempo operativo es 1/3 del tiempo inactivo, el tiempo de vida se reduce a la mitad, comparado con un funcionamiento permanente en las mismas condiciones ambientales. Aunque los dispositivos encapsulados en plástico no estén sometidos a campos eléctricos durante el almacenamiento, deben controlarse las condiciones ambientales en tal estado.

Conclusiones

Con el aumento de la densidad de integración, los fallos de componentes debidos a la condensación no provendrán de la corrosión de las pistas de interconexión, sino del incremento de las corrientes superficiales de fuga, o derivas del voltaje umbral, causados por los protones y electrones atrapados. Sin embargo, un pequeño exceso de temperatura de la pastilla o de la superficie de la cápsula ofrece una protección eficaz contra tales fallos. Los componentes de gran escala de integración, con baja disipación interna de potencia, tienen un mayor riesgo, sobre todo cuando se utilizan en sistemas pequeños y de baja potencia, que funcionan intermitentemente.

Un resultado importante para sistemas grandes en funcionamiento permanente es que los fallos producidos por condensación en componentes modernos de encapsulado plástico son tan infrecuentes como en los encapsulados cerámicos con cavidades, siempre que se mantenga un exceso de temperatura en el bastidor de 20°C. Además, a los dispositivos encapsulados en plástico no les afecta la humedad atrapada en su interior, que puede condensarse en la superficie de la pastilla a temperaturas inferiores al punto de rocío.

Dieter Stroehle nació en Tuttlingen, Alemania, en 1943. Estudió física en la Universidad de Stuttgart, donde obtuvo el grado de físico diplomado en 1970, doctorándose en 1974 en Ciencias Nat. El mismo año ingresó en SEL, donde en la actualidad dirige un grupo de trabajo de normalización de componentes avanzados LSI. El Dr. Stroehle es miembro del NTG, donde participa en el grupo de calidad y fiabilidad de la comisión de integración a muy gran escala.

Extracción en seco de encapsulantes plásticos mediante quemado en plasma

El análisis de los dispositivos de estado sólido a veces requiere el poder extraer el encapsulante, de tal modo que pueda examinarse el circuito. El quemado en plasma constituye una técnica eficaz, rápida y no destructiva para la extracción de encapsulantes plásticos modernos.

M. E. Holycross

E. J. Saccocio

ITT North, Columbus, Ohio,
Estados Unidos de América

Introducción

A veces se necesita extraer el material encapsulante en un dispositivo de estado sólido afectado por un fallo, con objeto de realizar el diagnóstico y el análisis del circuito; sin embargo, los encapsulantes plásticos modernos resultan difíciles de quitar sin dañar el componente. Un medio potencialmente no destructivo consiste en una descarga eléctrica en oxígeno a baja presión, que se denomina plasma. En un plasma de oxígeno, los materiales orgánicos se queman sin llama, a temperaturas bajas, quedando reducidos a ceniza. Sin embargo, un gran inconveniente de esta incineración es la baja velocidad de extracción de material.

Uno de los objetivos principales de un programa de desarrollo llevado a cabo en los laboratorios de ITT North fue la rápida extracción del material encapsulante en los circuitos híbridos de impresión serigráfica. El desprendimiento mediante plasma tenía

las ventajas mencionadas y se estaba usando industrialmente tiempo atrás para extraer materiales poliméricos, aunque en depósitos muy delgados. Acceder a un circuito híbrido encapsulado requiere la extracción de una capa de alrededor de 1 mm de grosor. Utilizando equipo de plasma comercial para reactores del tipo tonel¹, podrían necesitarse tiempos de exposición del orden de semanas con plasma de oxígeno (13,5 MHz, 100 W). Los resultados son inconsistentes, y muy a menudo desastrosos para los circuitos híbridos. El equipo comercial carece además de flexibilidad operativa.

Se desarrolló por lo tanto un sistema de plasma versátil, en el cual quedó demostrada la necesidad de controlar la presión y la temperatura para un acceso rápido y eficiente a los circuitos. La mayoría de los resultados señalados en este artículo se obtuvieron con el nuevo diseño de reactor de electrodo planar. El acceso a los circuitos puede realizarse en ocho horas con este equipo, en condiciones óptimas. El equipo ha sido asimismo utilizado para incinerar los encapsulantes plásticos de otros dispositivos y como un medio de preformar materiales laminados.

Trabajo y resultados

En la figura 1 se expone el concepto de flujo radial de gas, usado en el reactor nuevo, así como el electrodo disipador de calor (electrodo inferior)². En el quemado de los circuitos híbridos, es importante el control de la temperatura para impedir que el estaño se funda. Un método sencillo y barato de conseguir este control necesario se basa en el flujo radial de gas conjuntamente con un electrodo disipador. La descarga del plasma se confina al espacio existente entre los electrodos, para las

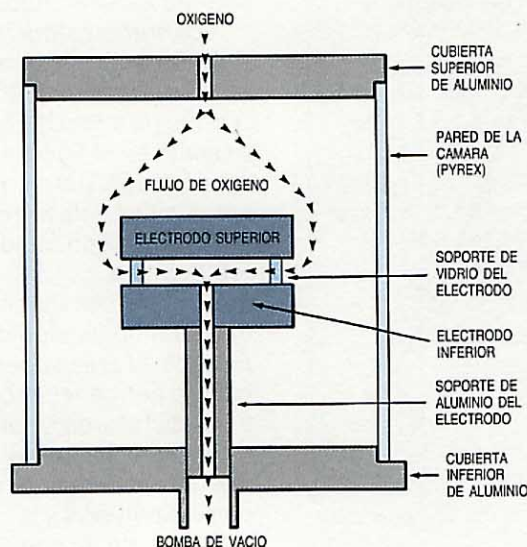


Figura 1
Reactor planar de flujo radial.

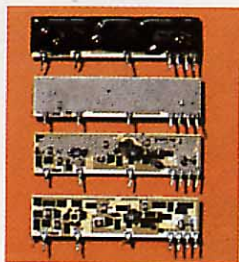
Detalle de la cámara de reacción. Las muestras se posicionan en el hueco entre electrodos. La bobina horizontal permite un ajuste de la impedancia en radiofrecuencia. La entrada de oxígeno se encuentra en la parte superior.

presiones y dimensiones escogidas. Los modelos se sitúan convenientemente en el electrodo inferior, el cual se conecta a la tierra de radiofrecuencia. Un aspecto importante de este diseño, que lo caracteriza frente a los equipos comerciales en general, es el ajuste independiente de la presión y del flujo de gas. Cuando se varía la presión, el flujo permanece constante.

Se utilizaron modelos de dos clases: muestras de encapsulantes (sin circuito interior) y circuitos encapsulados. Las caras posteriores de los circuitos se recubrieron con goma de silicio vulcanizada, a temperatura ambiente, que no reaccionase con el plasma. Las muestras, aunque de mayor masa que los circuitos en sí, fueron preparadas sobre una sola cara de una lámina de cristal de 25 x 75 mm.

Las velocidades de quemado o de extracción de material aquí señaladas se miden en pérdida de peso (miligramos) por hora de exposición al plasma. Por definición, la velocidad de quemado depende de la masa del encapsulante y del área de la superficie, ninguna de las cuales es una constante. En consecuencia, la interpretación de los datos no es inmediata.

Se observó que la velocidad de quemado de las muestras variaba linealmente con el tiempo de exposición al plasma, dependiendo asimismo de la temperatura. Es claro que las altas temperaturas en los modelos conducen a velocidades de quemado elevadas, pero en el caso de los circuitos híbridos la temperatura debe mantenerse por debajo de los 183°C si queremos conservar intactas las terminaciones soldadas.



Progresión del quemado en un circuito híbrido encapsulado en plástico.



Otros datos indican que la temperatura del electrodo superior influye muy débilmente en la velocidad de quemado. Podemos observar el incremento casi lineal de dicha velocidad con el tiempo, analizando el incremento en el área de la superficie del modelo. Inicialmente dicha superficie es uniforme, aunque, con la exposición, se vuelve rugosa, con cráteres y concavidades, y llega a acribillarse de agujeros.

En la figura 2 se indica la característica de quemado de un circuito híbrido encapsulado. A diferencia con las muestras, la velocidad de quemado crece, alcanza un pico agudo y a partir de entonces cae de modo continuo. Estas distintas velocidades corresponden a un aumento inicial del área de la superficie, seguido por una disminución de la masa del material restante. Debido a que esta característica se midió con el aparato anterior, hubo que enfriar los electrodos sumergiéndolos en agua a cada hora para impedir la fusión del estaño en los terminales del circuito, que de otro modo se produciría a las dos horas. El diseño ya descrito en la figura 1, con electrodos modificados, permite que el calor sea conducido hasta el gas y la placa soporte de la cámara, controlándose de este modo la temperatura.

Si queremos medir la velocidad de quemado como función de la potencia de entrada, el área superficial y la temperatura han de permanecer constantes. Para controlar dicha área se introdujo una nueva muestra en cada nivel de potencia. Los resultados revelaron una relación lineal entre la potencia y la velocidad de quemado, indicativa de un comportamiento químico

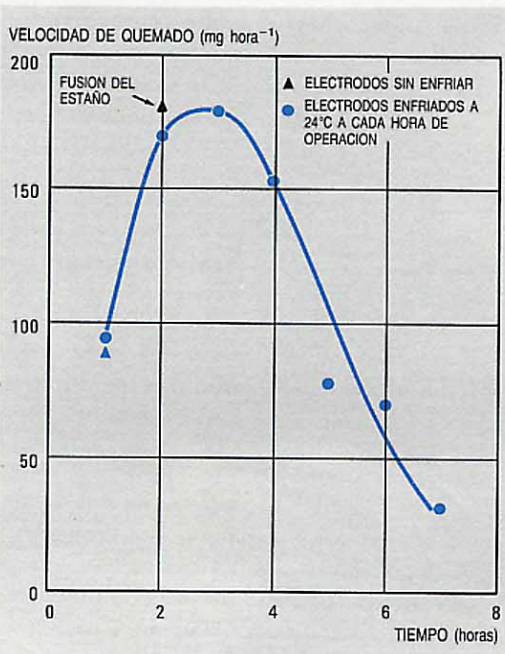


Figura 2 Características de quemado de un híbrido encapsulado, medidas con el aparato primitivo que no posee control de temperatura.

de primer orden. En las figuras 3 y 4 se presentan dos resultados significativos de este trabajo.

La figura 3 muestra la velocidad de quemado de los modelos en un plasma de oxígeno puro, y en un plasma de oxígeno ante PVC (cloruro de polivinilo) y PTFE (politetrafluoretileno). La velocidad de quemado es constante en el oxígeno puro y permanece así aun después de 16 horas de exposición. La velocidad de quemado en presencia de PVC o PTFE mejora notablemente con el tiempo. El PTFE es el mejor de los dos polímeros intensificadores, y conviene colocarlo alrededor de los electrodos aisladores en forma de cinta. La intensificación no parece ser sensible a la cantidad de cinta introducida, por encima de un cierto nivel mínimo.

Al principio del trabajo, se escogieron presiones fuera del margen de los militorr, típico para extracción por plasma, desprendimiento y corrosión de materiales. Tal y como se indica en la figura 4, la velocidad de quemado mejora con la presión.

Generalización del trabajo y aplicaciones

El dispositivo planar ha sido usado recientemente para quemar circuitos integrados y condensadores cerámicos encapsulados en plástico, así como para preformar superficies de fibra de vidrio previamente a la laminación de circuitos impresos multicapa.

Se han obtenido diferentes niveles de éxito en el quemado de materiales asociados, con resultados que dependen del plástico y del relleno, si lo hay. Los tiempos empleados para realizar el quemado pueden ser superiores a un día en alguno de los casos, pero son aceptables teniendo en cuenta el grado de protección de los circuitos alcanzado. Si, por ejemplo, quieren localizarse fisuras locales en la superficie de un dispositivo cerámico, procedimientos más severos de extracción pueden ocultar tales defectos. Las pastillas de los circuitos integrados no sufren apenas modificación durante el quemado por plasma, quedando en particular intactos los terminales de conexión de aluminio. Se requiere cuidado al manejar los residuos resultantes de la extracción de ciertos encapsulantes con relleno. Una técnica adecuada ayuda a proteger la integridad de los hilos conductores de unión, mientras que el quemado por plasma deja al circuito virtualmente intacto.

El conexionado de circuitos impresos multicapa requiere una limpieza total en las diferentes superficies, evitando grasas, películas, etc. Los quemados orgánicos en

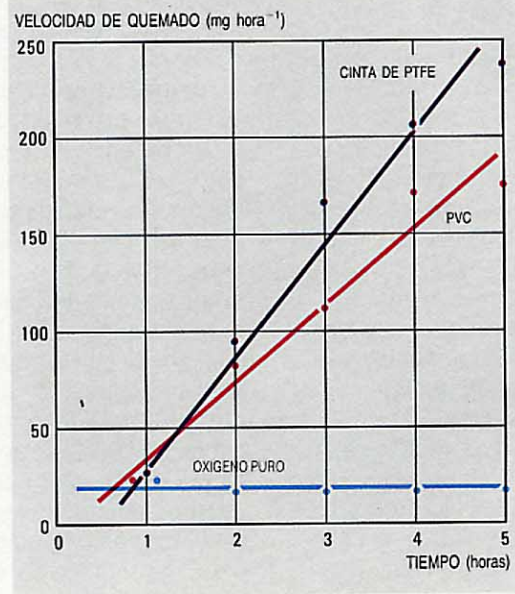


Figura 3
Velocidades de quemado en plasmas de oxígeno puro, clorados y fluorados.

o sobre la superficie, preparan los laminados de fibra de vidrio para que el conexionado sea una tarea consistente y reproducible. El presente trabajo se ha limitado a pruebas en pequeños circuitos impresos multicapa, con el fin de determinar si puede mejorarse la resistencia mecánica del conexionado perforando el plano de masa de cobre interior. Si no se realiza limpieza mediante plasma, las pruebas de tracción o de rotura no son concluyentes, quizás debido a unas malas conexiones causadas por la contaminación. La limpieza por plasma asegura una conexión consistente, pese a que las pruebas de tracción no son todavía reproducibles.

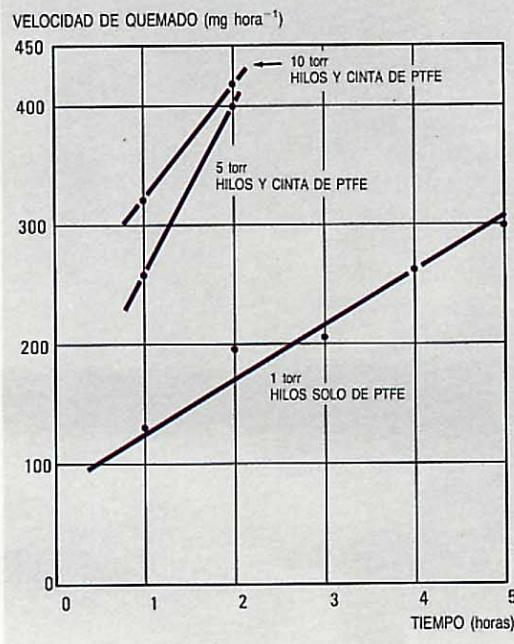


Figura 4
Influencia de la presión del gas en la velocidad de quemado.

Conclusiones

El principal objetivo del trabajo fue el acceder a los circuitos híbridos de forma no destructiva, en un tiempo razonable. Un quemado completo de un encapsulante de híbrido en el reactor de flujo radial a 75 W puede realizarse en un día, permaneciendo intactas tanto las terminaciones estañadas como el circuito. No se requiere trituración ni extracción parcial del encapsulante. En menor grado se investigaron otros materiales encapsulantes. Se ha demostrado la superioridad del reactor de flujo radial con electrodo disipador frente a los reactores del tipo "tonel". La uniformidad de la reacción, aun cuando no sea un factor esencial para la extracción, minimiza la exposición al plasma del material del dispositivo. En el caso de circuitos integrados de vidrio pasivado, el vidrio no se altera apreciablemente a pesar de la presencia de flúor en el plasma. Tampoco resultan afectadas las conexiones de aluminio, en contraste con otras técnicas.

Hay dos factores que aceleran la extracción: la introducción de un catalizador sólido (PTFE o PVC) y el aumento de presión. Aunque algún trabajo haya demostrado que mejoran las reacciones al aumentar la presión³, no se conoce ninguno que haya intentado medidas a valores tan elevados como 5 torr. La intensificación catalítica en presencia de flúor⁴ no es de extrañar, puesto que se sabe bien que los radicales del flúor favorecen las reacciones de corrosión y desprendimiento. Sin embargo, las sustancias intensificadoras normalmente se introducen en forma de gas, como el CF₄. En el caso que nos ocupa, las sustancias reactivas aparecen indirectamente como consecuencia de la reacción del oxígeno del plasma con el polímero. Esta técnica es ciertamente nueva y presenta varias ventajas: no es preciso mezclar gases, ni tampoco se necesita una distribución plural de gases con múltiples reguladores, siendo la introducción en el reactor sencilla y de mínimo coste. Además, parece ser que la reacción intensificada es autorregulada: se apreció, en efecto, que su magnitud no dependía de la cantidad de PTFE. No se pudo disponer de observaciones espectrográficas, desgraciadamente.

El incremento de la velocidad de quemado, ya sea con el PTFE o con el PVC, se

acompaña de un aumento del área real de la superficie, hasta que lo compensa la pérdida de masa. Esto no sucede en un plasma de oxígeno puro. De hecho, cuando el oxígeno puro se reutiliza después de haberse empleado en un plasma intensificado, la velocidad de quemado cae hasta la tasa constante indicada en la figura 3. Ello sugiere una vuelta del modelo a su primitiva área superficial, que es exactamente lo que se observa a niveles de aumento bajos. Solamente son atacadas las extremidades de la superficie, indicando que el oxígeno por sí solo es incapaz de alcanzar las cavidades profundas del material. Es digna de destacarse la similitud que existe con el pulido electroquímico, en donde el concepto de campos eléctricos locales se apunta como una explicación posible. El fenómeno del plasma catalítico parece implicar otros efectos eléctricos, tales como la transferencia de carga.

El quemado por plasma constituye una técnica barata, eficaz y relativamente rápida para la extracción de material.

Referencias

- 1 D. D. Wilson y J. R. Beall: Decapsulation of Epoxy Devices Using Oxygen Plasma: *15th Annual Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers Reliability Physics Symposium*, Las Vegas, 12-14 abril 1977, págs. 82-84.
- 2 A. R. Reinberg: Radial Flow Reactor: *US Patent n° 3.757.733*, 11 septiembre 1973, 7 págs.
- 3 Dry vs. Wet - Plasma Etching/Stripping Comes of Age: *Circuits Manufacturing*, abril 1976, volumen 16, n° 4, págs. 42-46.
- 4 G. N. Taylor y T. M. Wolf: Oxygen Plasma Removal of Thin Polymer Films: *Polymer Engineering and Science*, noviembre 1980, volumen 20, n° 16, págs. 1087-1092.

M. E. Holycross nació en Kenton, Ohio, en 1952. Obtuvo el BS en física y matemáticas en 1975 por el Findlay College (Ohio), y el MSc en física en 1978 por la Universidad de Toledo (Ohio). A continuación ingresó en el ITT North Telecommunications Technology Center, donde trabaja actualmente como ingeniero científico en el laboratorio de diseño físico.

Edward J. Saccocio nació en Brooklyn, Nueva York, en 1932. Estudió física en el Instituto Politécnico de Nueva York, obteniendo el BS en 1954. Después de realizar tareas de postgraduado en el Instituto, recibió el PhD en 1964. Después de dos años como profesor en la Universidad de San Juan, entró en los laboratorios Battelle, dedicándose a investigación y desarrollo. Más tarde, el Dr. Saccocio ingresó en ITT North, siendo actualmente el director del laboratorio de ciencias físicas, departamento encargado de las tareas de diseño físico del sistema de conmutación ITT 1210.

Técnicas de aislamiento para integración a muy gran escala

Las técnicas de aislamiento para VLSI están dilatando los límites de la tecnología de materiales para aplicaciones de gran velocidad, alta densidad y alto voltaje.

D. Beernaert

G. Schols

P. Van Iseghem

Bell Telephone Manufacturing Company,
Gante, Bélgica

Introducción

Cuando se fabrican circuitos MOS LSI, uno de los factores que limitan la densidad de implantación es la tecnología usada para aislamiento. Se han propuesto varios tipos de aislamiento, actualmente empleados en la industria. Sin embargo, la mayoría de ellos se han descartado durante el desarrollo de la tecnología de circuitos integrados, y sólo se utiliza actualmente un número limitado de técnicas de aislamiento. Se pueden clasificar estos métodos de aislamiento en dos grupos; uno basado en óxidos aislantes y otro en uniones *pn*. Son también posibles las técnicas mixtas con combinación de ambos métodos, que se utilizan a menudo en tecnología bipolar. La técnica de aislamiento por óxido se usa principalmente en circuitos MOS LSI, excepto para CMOS, donde en general se aplica la técnica de aislamiento por unión, combinada con la de aislamiento por óxido para separar transistores MOSFET individuales.

El aislamiento por óxido se puede dividir en dos grupos: uno consistente en aislamiento por un dieléctrico (como dióxido de silicio o silicio policristalino), con el que se llenan los surcos en el sustrato semiconductor, y otro en aislamiento por oxidación en zonas no activas (field oxide), cuyo principal objetivo es proporcionar una capa de óxido de grosor suficiente para que exista una tensión de umbral mayor que en las regiones activas.

Aislamiento por óxido en zonas no activas (field oxide)

Se ha trabajado mucho en los últimos años para mejorar el aislamiento en los circuitos integrados, y se han desarrollado técnicas tales como el aislamiento por óxido remitido, la bien conocida técnica LOCOS (oxida-

ción local de silicio)¹ y las técnicas isoplanares, para superar las limitaciones que el aislamiento por unión impone a la densidad de los dispositivos.

En un proceso normal de aislamiento por óxido remitido, la superficie de silicio se oxida térmicamente y se deposita nitruro de silicio. La doble capa de $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ se elimina en zonas externas a los dispositivos activos, continuando con una oxidación general. Para que la oxidación remitida sea completa, las áreas de silicio descubiertas al eliminar la doble capa de dieléctrico, se atacan primero, antes del crecimiento de óxido en zonas no activas. El hecho de que el óxido crecido térmicamente debajo del nitruro de silicio esté expuesto en la periferia, y que no evite la difusión del oxígeno durante el crecimiento del óxido remitido, originará la formación de los fenómenos denominados "cabeza de ave" y "pico de ave". El primero de ellos afecta a la topología de la superficie, y el segundo limita la densidad de dispositivos por el lento crecimiento del espesor del óxido en su propio borde. Por lo tanto ambos fenómenos limitan el uso de las técnicas LOCOS e isoplanar en el proceso VLSI.

Otro inconveniente de la tecnología LOCOS es el efecto llamado "banda blanca"², adelgazamiento del óxido de puerta crecido tras el proceso LOCOS a lo largo del borde del óxido. Este fenómeno puede evitarse mediante el crecimiento de un óxido previo que se elimina antes de la auténtica oxidación de puerta u oxidación activa. Los iones de boro implantados en la zona no activa para impedir la formación de canales parásitos, se difunden lateralmente durante subsiguientes oxidaciones no activas. Este perfil de boro difundido reduce el área activa del dispositivo y origina una degradación en el funcionamiento de éste, como es la polarización no deseable del sustrato. Para minimizar estos efectos se hace necesario un proceso a baja temperatura.

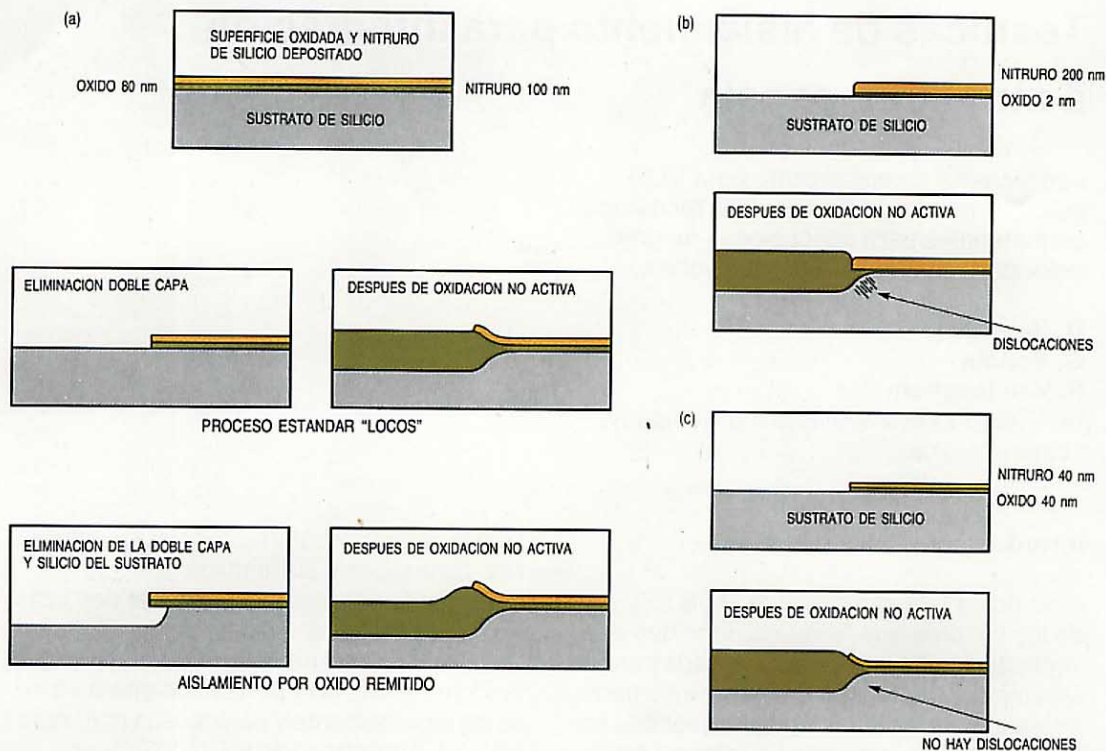


Figura 1
Formación de "cabeza y pico de ave" mostrando (a) formaciones normales, (b) formación mínima, y (c) formación óptima.

BTM ha optimizado el proceso LOCOS en tecnología MOS de $3\ \mu\text{m}$ para reducir al mínimo las limitaciones impuestas por los "pico de ave", "cabeza de ave" y perfil de boro difundido, sobre la densidad de empaquetamiento y altas prestaciones de los circuitos VLSI de telecomunicación. Así se ha conseguido que la técnica LOCOS sea adecuada para la fabricación de dispositivos con longitudes de puerta de silicio policristalino hasta de $1,5\ \mu\text{m}$, con proceso a baja temperatura.

Al comenzar el crecimiento de óxido no activo, el oxígeno se difunde lateralmente a través del óxido (pad oxide) bajo la capa de nitruro. Esto origina la formación de un "pico de ave" (Fig. 1). Una película de óxido más delgada da lugar a un "pico de ave" más corto; éste también puede reducirse abreviando, mediante temperaturas más altas, la reacción de oxidación controlada de la superficie. Sin embargo, esta solución no es favorable para procesos VLSI.

Se ha evaluado ya la influencia del óxido nativo como integrante de esta película: con 2 nm de espesor de óxido nativo, la longitud del "pico de ave" depende del grosor de la película de nitruro de silicio. Para una capa de nitruro de 200 nm de grosor, ésta no se levanta por la fuerza de oxidación, y en consecuencia la región de transición viene a ser un 65% más corta que en el proceso LOCOS convencional.

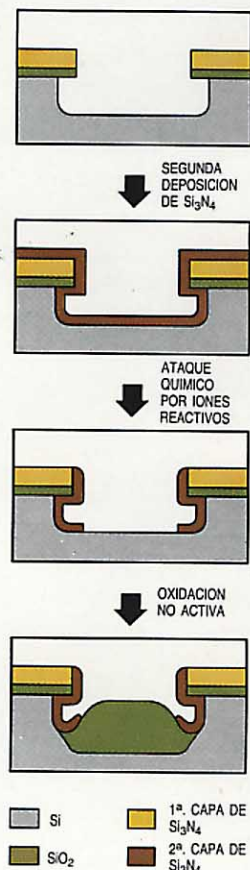
Sin embargo, la forma del "pico de ave" puede causar problemas en el recubrimiento de escalones (Fig. 1b); también una capa gruesa de Si_3N_4 introducirá defectos cristali-

nos en el silicio debido a altas tensiones intrínsecas en el nitruro de silicio.

A medida que se reduce el espesor de la capa de nitruro, el "pico de ave" se alarga y desciende el número de defectos cristalinos. Para espesores de nitruro entre los 30 y 90 nm, el "pico de ave" se acorta de nuevo y el silicio queda libre de dislocaciones. La longitud del "pico de ave" alcanza un mínimo para una capa de nitruro de 30 nm. En este punto, dicha longitud se ha reducido en más del 65% comparando con el caso convencional, y la pendiente en la región de transición ya no dificulta el posterior recubrimiento de escalones, dada la menor rigidez de la capa delgada de nitruro (Fig. 1c). El espesor de la película de nitruro correspondiente al mínimo de longitud del "pico de ave", depende muy poco de la temperatura de oxidación de zonas no activas, y cuando es inferior a los 20 nm ya no llega a proteger las áreas activas del crecimiento de óxido no activo a temperaturas de $900\ ^\circ\text{C}$.

Con esta técnica LOCOS optimizada, un crecimiento de óxido de 700 nm a $900\ ^\circ\text{C}$ produce un "pico de ave" de $0,3\ \mu\text{m}$, lo que ya permite procesar tecnologías de $1,5\ \mu\text{m}$, siguiendo las reglas de diseño normales para este caso. Incluso en ausencia total de película de óxido, lo cual elimina completamente la difusión lateral del oxígeno en dicha película, queda todavía un pequeño "pico de ave"; esto se debe a una oxidación intensificada en la interfase silicio-nitruro. Actualmente se están investigando algunas estructuras con la interfase totalmente sellada.

Figura 2
Proceso de aislamiento con enmascaramiento de pared lateral.



Procesar a temperaturas bajas, tal como ocurre en la oxidación a alta presión³, no favorece el proceso LOCOS normal. En el proceso optimizado, sin película de óxido, puede tenerse en cuenta la temperatura de la oxidación no activa cuando se elija un grosor de la película de nitruro que minimice el "pico de ave". La oxidación a alta presión y temperaturas superiores no afecta a la longitud de dicho "pico".

Se ha desarrollado una estructura de óxido de aislamiento enterrado con topografía casi perfecta, usando un enmascaramiento por pared lateral con una segunda capa de nitruro de silicio⁴, para evitar la intrusión del oxígeno en la delgada película de óxido. El enmascaramiento se realiza en una única operación, atacando con iones reactivos, con lo que se obtiene una estructura exenta del "pico de ave" (Fig. 2).

La implantación de iones de nitrógeno en el silicio, o la nitrificación intensificada por plasma pueden formar una película sellante sobre la superficie de silicio y eliminar totalmente el óxido nativo, pudiéndose conseguir una región de transición del 40 al 50% del espesor del óxido no activo; sin embargo, esto no aporta mejoras sobre la técnica LOCOS optimizada.

Se puede emplear una oxidación selectiva de silicio policristalino para producir un aislamiento no activo, libre de defectos, en procesos VLSI. Se forma selectivamente una capa gruesa de óxido térmico a partir de la oxidación del polisilicio mediante una máscara de Si_3N_4 y sin película de óxido⁵. El silicio no oxidado se elimina mediante un ataque con iones reactivos; y el residuo que permanece bajo el saliente de óxido, se oxida, proporcionando la configuración deseada en el perfil del borde del óxido no activo.

Se ha logrado reducir la longitud de "pico de ave" al 25% del grosor del óxido no activo, y sin ningún defecto en la superficie del silicio. Esta tecnología parece muy prometedora para dispositivos MOS LSI de alta densidad, pero no consigue una estructura isoplanar.

Se ha desarrollado una tecnología de aislamiento por óxido para estructuras MOS LSI de canal n , en las que se usa la eliminación del óxido con FH por proceso complementario⁶. La región con dispositivos activos se cubre con una capa de fotorresina negativa, que actúa como máscara para la implantación en zonas no activas y también activa la superficie de dióxido de silicio que tiene debajo para el ataque, por permeabilidad, con gas FH; en este proceso, llamado de oxidación seca (Dry Ox), sólo se elimina el óxido que está debajo mismo de la fotorresina. En esta tecnología, el óxido no activo está autoalineado con la región

implantada de boro, sin formar ningún "pico de ave" y con una difusión lateral de boro mucho menor, pero todavía no se logra una estructura isoplanar (Fig. 3).

Los óxidos depositados en fase vapor se usan también para aislamiento entre dos regiones activas. Se ha desarrollado una técnica de aislamiento que incluye un proceso de enterramiento de óxido en dos etapas, una eliminación del óxido depositado primeramente por fase vapor, y el biselado de superficie mediante fotorresina extendida por centrifugación⁷. Esta tecnología no presenta "pico de ave" y se realiza a bajas temperaturas. De esta forma se obtiene una estructura superficial casi perfectamente planar, pero se necesita un óxido depositado en fase vapor de alta calidad (Fig. 4).

Para realizar estructuras con "pico de ave" muy reducido se puede usar también una oxidación selectiva de silicio en un plasma de oxígeno generado por RF⁸. Los materiales Si_3N_4 , MgO y Al_2O_3 pueden actuar como máscaras contra la oxidación por plasma. El SiO_2 crecido por plasma a 500°C es comparable al SiO_2 térmico, crecido a 1100°C. Este proceso es muy adecuado para VLSI por su baja temperatura, la gran calidad del óxido y la ausencia del fenómeno "pico de ave".

La mejor forma de conseguir dispositivos CMOS de alta velocidad y densidad es disponer una sola capa delgada de silicio cristalino sobre una estructura gruesa de aislante. Por lo tanto, se ha desarrollado un aislamiento por óxido enterrado que aísla no sólo la pared lateral sino también el fondo de la difusión de drenador y fuente.

El aislamiento por óxido enterrado puede realizarse depositando simultáneamente capas de silicio poli y monocristalino sobre una oblea de silicio oxidada selectivamente⁹. Esto hace posible el funcionamiento a gran velocidad por reducir las capacidades de unión del drenador, y también una alta densidad de empaquetado al extenderse el aislamiento por dieléctrico entre las regiones activas. También los dispositivos de alta densidad fabricados con una capa enterrada de óxido poseen elevada inmunidad frente a fenómenos parásitos de autoenclavamiento (latch-up). La tecnología CMOS con óxido enterrado ofrece las mismas buenas características que el proceso CMOS de silicio sobre zafiro.

Otras técnicas todavía en fase experimental, son la implantación de oxígeno y el templado de polisilicio por láser para crear capas de óxido. En otra modalidad de aislamiento, el silicio ya preatacado y poroso se oxida para formar una gruesa capa aislante¹⁰. Los dispositivos activos se

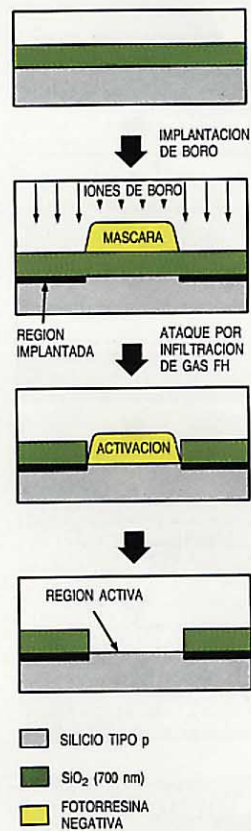


Figura 3
Proceso de aislamiento por gas FH.

Figura 4
Proceso de fabricación de óxido enterrado.



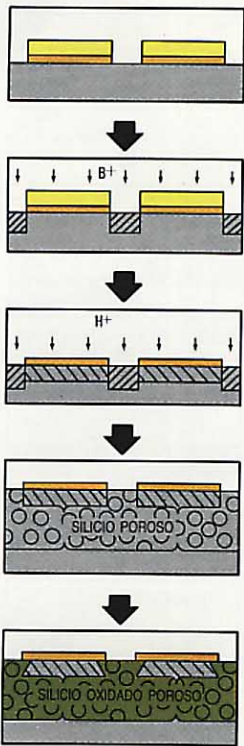


Figura 5
Proceso de aislamiento por oxidación de silicio poroso previamente atacado.

separan mediante un dieléctrico grueso; las bañeras de silicio son de alta calidad, por estar hechas del silicio de partida. Esta tecnología es adecuada para circuitos CMOS de alta densidad y alta velocidad (Fig. 5).

Aislamiento por dieléctrico

Hasta muy recientemente, en los circuitos integrados monolíticos, el aislamiento por unión *pn* ha sido, con mucho, el método más utilizado para aislar entre sí regiones con dispositivos activos. Por ejemplo: se usan normalmente difusiones tipo *p* activas para aislar transistores de efecto campo convencionales de los dispositivos lineales, y a todos ellos de elementos tales como resistencias y condensadores.

Aunque el aislamiento por unión *pn* (Fig. 6a) haya resultado eléctricamente muy eficaz en circuitos integrados, existe ahora en el campo de los circuitos digitales una creciente demanda de conmutación más rápida, en la que el efecto capacitivo del aislamiento por unión llega a ser un problema. Además, dicho modo de aislamiento requiere separación entre dispositivos relativamente grande, lo que va en contra de las densidades de empaquetado requeridas en LSI y VLSI. También el aislamiento por unión tiende a originar transistores parásitos entre la región aislada y las zonas adyacentes.

En el programa de BTM para reemplazar relés electromecánicos en los interfaces de línea de abonado de las centrales telefónicas digitales, se usan interruptores de estado sólido con capacidades de conmutar voltajes de 400 V¹¹. La integración completa de estos conmutadores con su lógica de decodificación y de control hace que el aislamiento por unión profunda sea prácticamente imposible. Para el total aislamiento entre las entradas de control a baja tensión y los terminales de salida de alto voltaje, la

mejor solución ha sido el uso de aislamiento por dieléctrico. En estos circuitos (Fig. 6b) se ha descartado del todo el concepto de aislamiento por diodo. En su lugar, tanto el aislamiento eléctrico como el físico se consigue mediante una capa continua de dieléctrico que rodea enteramente a los componentes y los aísla entre sí a la vez que del sustrato común.

El aislamiento por dieléctrico suele realizarse mediante un rectificado, aplanado y pulido de precisión, a veces denominado proceso de polisilicio sencillo, presentado en la figura 7¹². Se crece térmicamente óxido sobre el sustrato de silicio de orientación {100} cuya resistividad queda determinada por la resistividad de colector deseada, y se abren ventanas por técnicas fotolitográficas convencionales (Fig. 7b). Estas ventanas permiten que los pozos sean atacados, función que se realiza normalmente con un agente anisótropo (cuya acción depende de la orientación), tal que elimine silicio en la dirección {100} a una velocidad cien veces mayor que en la dirección {111}¹³.

Así, la sección transversal de un surco obtenido será triangular (Fig. 7c), si la máscara se alinea sobre la oblea de modo que los surcos sean paralelos a las trazas de los planos {111}. Como los planos {111} cortan a la superficie {100} con un ángulo fijo de 54° 74', la anchura de la apertura de óxido determina la profundidad del surco en V.

Después del proceso de ataque a los pozos de aislamiento, se puede depositar una difusión *n*⁺ o una película epitaxial fuertemente dopada en toda la superficie para reducir la resistencia de saturación de colector (Fig. 7d), y entonces se crece un óxido térmico sobre la oblea. Este óxido se convierte en el aislamiento entre el monocristal y la película de silicio policristalino que se deposita a continuación (Fig. 7e). El grosor de esta película es aproximadamente igual al de la oblea original. Tras la deposición de polisilicio, esta superficie es rectificada con el fin de restablecer el paralelismo entre la cara superior (silicio policristalino) y la cara inferior de la oblea (sustrato original de silicio monocristalino). La oblea se invierte entonces, y el sustrato original se rectifica hasta descubrir tanto el óxido de aislamiento al fondo de los surcos como las islas de silicio monocristalino (Fig. 7e). Después de pulir la oblea, ésta queda dispuesta para el proceso convencional.

El proceso de rectificado y pulido de precisión es bastante sencillo comparado con otros procesos de aislamiento por dieléctrico, pero la superficie final debe ser pulida mecánicamente, lo que puede producir una pérdida de rendimiento, debido a

Figura 6
Comparación entre el aislamiento por unión (a) y el aislamiento por dieléctrico (b).

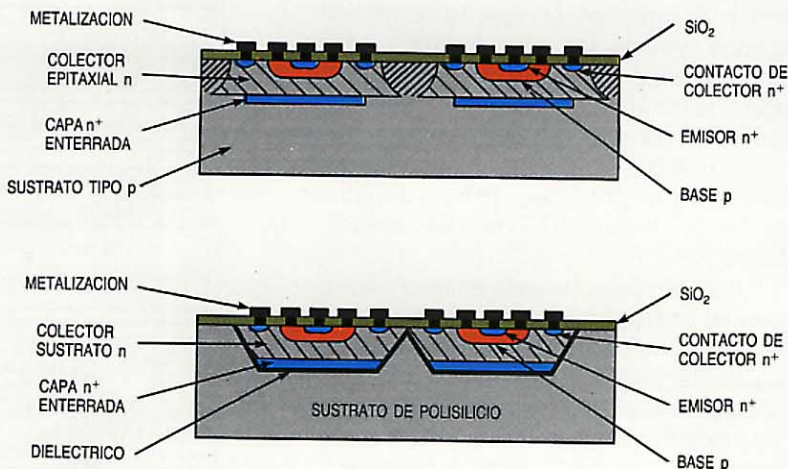
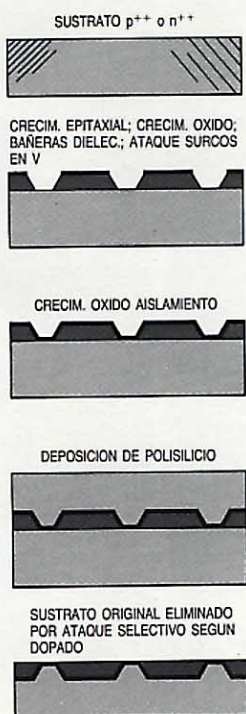




Figura 7
Proceso estándar de aislamiento por dieléctrico obteniendo una capa n^+ enterrada.

Figura 8
Proceso químico de aislamiento por dieléctrico.



roturas y/o superficies rayadas o dañadas en las bolsas ya aisladas. También se determina la uniformidad del grosor de la película tipo n a lo largo de la oblea, en función del grado de paralelismo de la superficie final con la original después de las operaciones de aplanado y pulido. Este paralelismo puede verse afectado por pandeo de la oblea como resultado de la deposición de silicio policristalino, normalmente realizada en un reactor epitaxial convencional mediante un proceso de reducción silicio-haluro-hidrógeno. Al enfriarse, la oblea se puede pandear debido a los diferentes coeficientes de dilatación del polisilicio, dióxido de silicio y silicio.

Existen ciertas variantes de este proceso básico de aislamiento por dieléctrico, tales como el método selectivo de ataque y deposición y el proceso de doble polisilicio. Cada uno de estos métodos tiene sus propias ventajas y desventajas, relativas a prestaciones de los dispositivos y al grado de dificultad en la fabricación del sustrato. Todos ellos padecen sin embargo, problemas de rendimiento en el proceso de fabricación básico, debidos a roturas, pandeo, etc., de la oblea.

La experiencia nos enseña que todavía se necesita una mayor evolución en las técnicas de fabricación de aislamiento por dieléctrico para conseguir dispositivos LSI de alto voltaje y alta calidad, con rendimiento aceptable y coste moderado. A fin de mejorar el rendimiento de los procesos convencionales, se desarrollan en varios laboratorios nuevas técnicas de fabricación que utilizan ataque selectivo dependiente del tipo de dopado. En el ejemplo de la figura 8 se emplea sustrato de silicio $\{100\}$ dopado p^{++} ó n^{++} con una película epitaxial. El grosor y la resistividad de esta película se determinan por los parámetros de los dispositivos a procesar sobre los sustratos. Después de la definición de las zonas de aislamiento, se procede al grabado de los surcos en V de modo que atraviesen la película epitaxial pero no alcancen el sustrato p^{++} ó n^{++} . Luego la oblea se oxida térmicamente y se deposita el silicio policristalino. A continuación, el polisilicio se protege mediante un óxido o algún otro medio, y la oblea es atacada con una solución que elimina el material del sustrato original p^{++} ó n^{++} pero no afecta a la capa epitaxial n ó p de mayor resistividad. Este proceso de fabricación presenta las siguientes ventajas:

- Elimina el deterioro inherente a los procesos mecánicos convencionales de aplanado y pulido, proporcionando una superficie químicamente pulida de alta calidad para la fabricación de dispositivos muy superficiales.

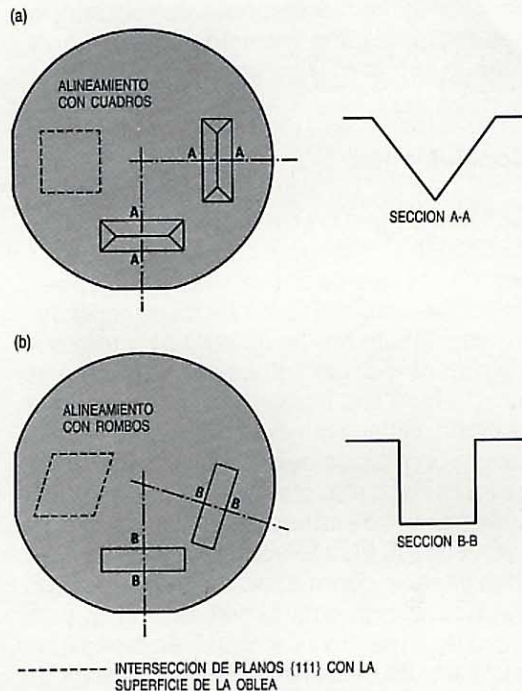


Figura 9
Alineamiento y sección transversal de (a) surcos en V sobre silicio $\{100\}$, y (b) surcos en U sobre silicio $\{110\}$.

- Reduce el crítico paralelismo necesario en las actuales operaciones mecánicas de rectificado, aplanado y pulido.
- Ofrece una mayor densidad de empaquetado.

Otra nueva tecnología utilizable para aislamiento por dieléctrico, de alta densidad de empaquetado, hace uso de las conocidas técnicas de grabado de surcos en V, aplicadas a material de silicio $\{110\}$, para obtener surcos con sección transversal en forma de U como resultado del proceso de ataque. Los surcos en U quedan delimitados por 6 planos $\{111\}$ y el plano de la base $\{110\}$. La intersección de los cuatro planos verticales $\{111\}$ en el cristal $\{110\}$, forma, sin embargo, un rombo con ángulos de 109° y 71° , en vez de un rectángulo como en el caso del grabado de surco en V. Por lo tanto, los diseños de circuitos deberían ser trazados en filas de rombos, y no de rectángulos o cuadrados. Los surcos en U largos y estrechos ($1 \mu\text{m}$) pueden ser grabados a cualquier profundidad deseada, con una mínima reducción de anchura. En los casos en que los surcos en U sean muy estrechos, el óxido de aislamiento rellenará completamente los huecos y el polisilicio será eliminado, o solamente irá por la superficie. Esto proporcionará un sustrato de aislamiento dieléctrico planar con un grosor arbitrario de la película epitaxial tipo n , y con capacidad de densidad de empaquetado mayor que los procesos que utilizan grabado de surco

en V. En la figura 9 se presentan las secciones en planta y transversal de un surco en V y de un surco en U.

Conclusiones

Con el continuo crecimiento de la demanda de circuitos integrados digitales de alta densidad y que operen a altas velocidades, ya no son suficientes las técnicas clásicas de aislamiento por unión *pn*. La técnica de aislamiento por dieléctrico da una respuesta que permite una mayor densidad de empaquetado, elimina la indeseada acción rectificadora controlada del silicio con el sustrato, y proporciona mayores voltajes de ruptura. Los circuitos de interfaz de alto voltaje en la conmutación para telecomunicación, necesitan integrar conmutadores de alto voltaje con circuitos de control de bajo voltaje y elevadas prestaciones, requisito cumplido por la técnica de aislamiento por dieléctrico. Los últimos avances de esta tecnología de aislamiento hacen uso de la implantación iónica del oxígeno, de técnicas de curado por láser, y oxidación porosa del silicio.

Referencias

- 1 J. A. Appels, E. Kooi, M. M. Paffen, J. J. H. Schatorje, y W. H. C. G. Verkuylen: Local Oxidation of Silicon and its Application in Semiconductor-Device Technology: *Phillips Research Reports*, abril 1970, volumen 25, n°2, págs. 118–132.
- 2 O. Nakjima, N. Shiono, S. Muramoto, y C. Hashimoto: Defects in a Gate Oxide Grown after the LOCOS Process: *Japanese Journal of Applied Physics*, mayo 1979, volumen 18, n°5, págs. 943–951.
- 3 E. Bussmann: High-Pressure Oxidation in n-channel MOS Technology: *Siemens Forschungs- und Entwicklungsberichte*, 1981, volumen 10, n°6, págs. 357–361.
- 4 D. Kahng, T. A. Shankoff, T. T. Sheng, y S. E. Haszko: A Method for Area Saving Planar Isolation Oxides Using Oxidation Protected Sidewalls: *Journal of the Electrochemical Society*, noviembre 1980, volumen 127, n°11, págs. 2468–2471.
- 5 J. Matsunaga, N. Matsukawa, H. Nozawa, y S. Kohyama: Selective Polysilicon Oxidation Technology for Defect Free Isolation: *Technical Digest of the 1980 International Electron Devices Meeting*, Washington DC, 8–10 diciembre 1980, págs. 565–568.
- 6 T. Shibata, S. Kohyama, y H. Lizuka: A New Field Isolation Technology for High Density MOS LSI: *Proceedings of the Tenth Conference on Solid State Devices*, Tokyo, 29–30 agosto 1978, *Japanese Journal of Applied Physics*, 1979, volumen 18, suplemento 18-1, págs. 263–267.

- 7 K. Kurosawa, T. Shibata, y H. Lizuka: A New Bird's-Beak Free Field Isolation Technology for VLSI Devices: *Technical Digest of the International Electron Devices Meeting*, Washington DC, 7–9 diciembre 1981, págs. 384–387.
- 8 A. K. Ray y A. Reisman: The Formation of SiO₂ in an RF Generated Oxygen Plasma: *Journal of the Electrochemical Society*, noviembre 1981, volumen 128, n°11, págs. 2466–2472.
- 9 J. Sakurai: A New Buried-Oxide Isolation for High-Speed High-Density MOS Integrated Circuits: *Institute of Electrical and Electronics Engineers Journal of Solid State Circuits*, agosto 1978, volumen SC-13, n°4, págs. 468–471.
- 10 K. Imai, S. Nakajima: Full Isolation Technology by Porous Oxidized Silicon and its Application to LSI: *Technical Digest of the International Electron Devices Meeting*, Washington DC, 7–9 diciembre 1981, págs. 376–379.
- 11 W. H. A. Mattheus: 400 V Switches for Subscriber Line Interface: *Digest of Technical Papers of the 1981 Institute of Electrical and Electronics Engineers International Solid-State Circuits Conference*, Nueva York, 18–20 febrero 1981, págs. 238–239.
- 12 D. McWilliams, C. Fa, G. Larchian, y O. Maxwell, Jr.: A New Dielectric Isolation Technique for High Quality Silicon Integrated Circuits: *Journal of the Electrochemical Society*, julio 1964, volumen 111, n°7, pág. 153C.
- 13 H. A. Waggner, R. C. Kragness, y A. L. Tyler: Anisotropic Etching for Forming Isolation Slots in Silicon Beam Leaded Integrated Circuits: *Abstracts of the 13th Annual International Electron Devices Meeting*, Washington DC, 18–20 octubre 1967, pág. 68.

Dirk Beernaert nació en 1953 en Zwijnaarde, Bélgica. En 1976 se graduó en la Universidad de Gante en ingeniería física. Después de trabajar dos años en física técnica y estadística en dicha universidad, se incorporó a BTM en 1979, donde ha trabajado en el desarrollo de procesos MOS nuevos para productos de telecomunicación. Actualmente dirige un grupo dedicado a proceso MOS VLSI.

Gust Schols nació en 1949 en Buta, Zaire. Se graduó en ingeniería electromecánica en la Universidad Católica de Lovaina, Bélgica, en 1971, y recibió el grado PhD en ciencias aplicadas en la misma universidad, en 1981. Trabajó en GTE Sylvania, en 1979, dedicándose al desarrollo de filtros de frecuencias intermedias de ondas acústicas de superficie. En 1980 se incorporó al laboratorio de microelectrónica de BTM, en Gante, Bélgica, donde actualmente se dedica a la investigación y desarrollo de conmutadores de estado sólido de alto voltaje y a tecnología de aislamiento por dieléctrico.

Paul Van Iseghem nació en 1946 en Ostende, Bélgica. En 1969 se graduó en ingeniería metalúrgica en la Universidad Católica de Lovaina, y recibió el grado PhD en ingeniería de ciencia de materiales en la Universidad de California, en 1972. A continuación se incorporó al grupo de dispositivos semiconductores del centro de investigación y desarrollo de Brown Boveri, donde trabajó en la integración y nuevos conceptos de dispositivos de potencia. En 1978 ingresó en BTM y ahora dirige las actividades sobre tecnología de procesos LSI en Gante.

Examen con microscopio electrónico de las secciones transversales por fractura de circuitos LSI y VLSI

El examen por microscopio electrónico de las secciones transversales de circuitos fracturados nos permite comprobar los circuitos LSI y VLSI con una resolución de $0,005 \mu\text{m}$. Se aplica sobre todo a la comprobación de circuitos de suministradores, evaluación de nuevas tecnologías y evaluación de diseños.

J. Knecht
M. Macari

ITT Advanced Technology Center, Shelton, Connecticut, Estados Unidos de América

Introducción

La tecnología de integración a muy gran escala (VLSI) permite construir dispositivos multifuncionales complejos que incorporen decenas de miles de transistores en un circuito único. Esto se ha conseguido ante todo por una considerable reducción en el tamaño de los transistores. Las grandes innovaciones en el proceso de obleas han permitido a los fabricantes producir dispositivos con dimensiones características inferiores a $2 \mu\text{m}$, y son inevitables reducciones de tamaño aún mayores.

Esta progresiva miniaturización ha acentuado la importancia de una medición exacta de las dimensiones geométricas de los dispositivos: en particular, la caracterización de la profundidad de difusión, perfiles y dimensiones de la película delgada, a fin de determinar la calidad de la misma. No basta con examinar las características superficiales para evaluar los parámetros críticos del proceso. A fin de asegurar altos rendimientos y una buena reproducibilidad, es esencial que todas las difusiones y películas tengan sus dimensiones controladas con precisión (longitud, anchura y profundidad) (Fig. 1). Se puede comprobar tal precisión

por medio de análisis de alta resolución superficial y transversal.

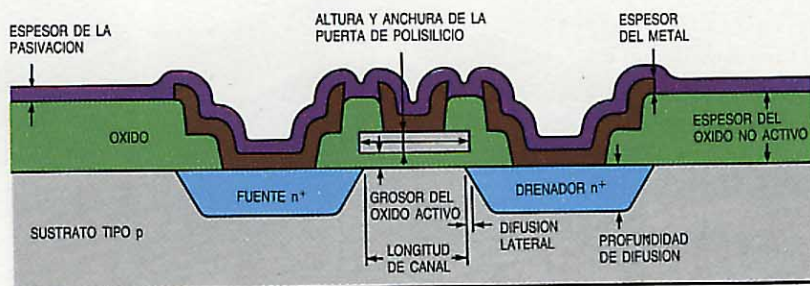
El departamento de calidad del Advanced Technology Center utiliza un microscopio electrónico de alta resolución para analizar secciones transversales por fractura; esta técnica permite un examen detallado de la disposición geométrica de los circuitos integrados.

Métodos tradicionales

En el pasado, se han examinado las superficies de semiconductores con microscopios ópticos para evaluar problemas tales como errores de alineación, defectos en el óxido e imperfecciones en la metalización. Además, la caracterización eléctrica de los dispositivos de prueba ha dado una información limitada sobre los parámetros bajo la superficie. Estos procedimientos fueron superados por el microscopio electrónico, especialmente en el campo de la integridad de la metalización, donde dicho microscopio permite la fácil observación de parámetros tales como el recubrimiento de escalón por metalización y su grosor.

Cuando se requiere un análisis tridimensional, se realizan cortes transversales metalográficos. Se monta el semiconductor sobre una base biselada cuyo ángulo se conoce con gran precisión, y se pule hasta que aparezca el área deseada, la cual se tiñe para destacarla y se examina con un microscopio metalúrgico, de ampliación máxima 2000 aumentos. Este método se puede usar para analizar circuitos (pastillas) individuales y localizar áreas específicas de análisis de fallos, pero queda limitado por su baja resolución de unos $0,3 \mu\text{m}$, fijada por el microscopio metalúrgico. Esto es insufi-

Figura 1
Mediciones estándar obtenidas de una sección transversal MOS.



cienta para muchos análisis de secciones transversales de circuitos LSI. Esta técnica consume tiempo, exigiendo una considerable destreza para pulir materiales tan dispares como silicio y aluminio. Durante la etapa de pulido se pueden introducir elementos que enmascaren zonas de interés.

El método trigonométrico "arcuic" es una técnica recientemente desarrollada para la observación bajo superficies, que supera algunas de las dificultades del pulido. Se practica una curva de radio muy preciso sobre la oblea, la cual se tiñe y se observa con un microscopio metalúrgico. A pesar de ser más rápida y precisa que el corte transversal metalográfico, esta técnica sólo puede usarse para observar difusiones o películas epitaxiales sobre muestras de obleas. No pueden analizarse películas delgadas.

Otras técnicas, como la interferometría, son capaces de determinar el grosor de la película, pero no así los contornos o perfiles de la misma.

Corte transversal por fractura

El corte transversal por fractura implica partir la oblea a lo largo de un eje cristalográfico y observar la sección con un microscopio electrónico. Su ventaja esencial es emplear la alta resolución (típicamente bajo los $0,005 \mu\text{m}$) de este microscopio para producir la imagen del corte transversal. Rutinariamente se consiguen 50.000 aumentos, y puede llegarse hasta los 300.000. Al no necesitarse el pulido de la muestra, se eliminan los problemas de los materiales dispares y otros inconvenientes de las técnicas metalográficas. El resultado es un perfil sin imperfecciones para análisis y medidas.

El Advanced Technology Center de ITT utiliza microfotografías de secciones transversales por fractura para revelar valiosa información sobre los parámetros críticos de proceso en la fabricación de circuitos LSI y VLSI. Se puede determinar fácilmente el grosor del óxido, del polisilicio y de la metalización, junto con la profundidad de

unión (Fig. 1). Los perfiles de la película quedan claramente definidos — un paso importante para el control del proceso de la oblea. También se pueden apreciar problemas de fiabilidad de proceso, tales como el recubrimiento del escalón por metalización, profundidad de las irregularidades de la aleación de aluminio y socavamientos. Una observación continua de estos parámetros contribuye a la reproducibilidad del proceso y a la fiabilidad de los dispositivos.

Una desventaja de fracturar es que resulta difícil de practicar sobre circuitos aislados (a menos que existan modelos repetitivos). Se dispone de obleas para estos análisis, ya que esta técnica se usa sobre todo para verificación del proceso.

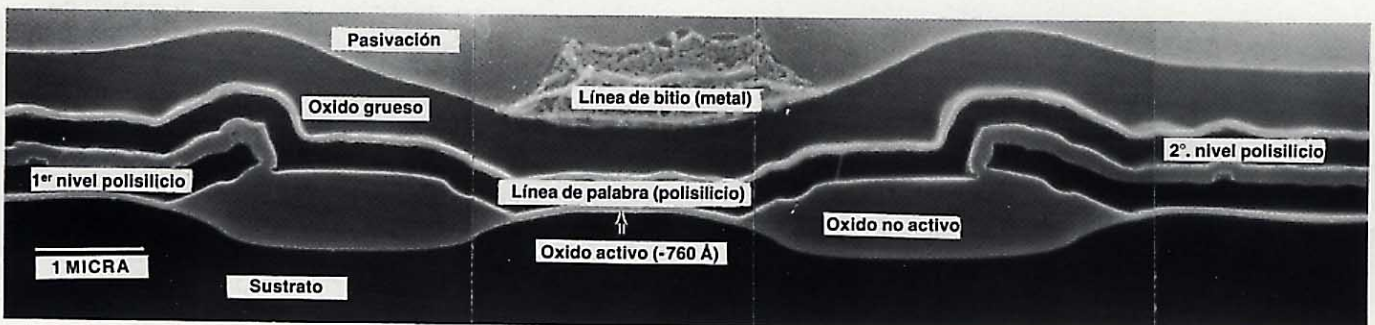
Técnica de fractura para cortes transversales

Para analizar muestras de oblea, debe determinarse ante todo la orientación cristalográfica. Se somete a la muestra (circuito u oblea) a tensión mecánica con una punta de diamante, de modo que la fractura se propague a través de la zona en estudio. Esta etapa se repite normalmente cierto número de veces hasta obtener una muestra con la posición de fractura deseada. Otro método consiste en sumergir la muestra en nitrógeno líquido (-195°C) antes de cortar, para extender una fractura quebradiza. Esto es especialmente útil cuando se fractura una muestra que contenga materiales dispares.

Después de seleccionar un corte practicado con limpieza, se ataca químicamente la superficie de la fractura. Se puede acelerar este ataque exponiendo la muestra a una luz intensa. Normalmente se usan mezclas de ácidos fluorhídrico, nítrico y acético, variando las mezclas a lo largo del proceso, según el material de la película o el nivel del dopante en la difusión. El procedimiento de ataque crea variaciones en la altura, las cuales, combinadas con diferencias en los elementos, configuran las diversas capas.

La muestra preparada se monta en el microscopio electrónico, de modo que el

Figura 2
Célula típica de almacenamiento de una DRAM de 64 K.



plano que contenga los elementos geométricos a analizar sea perpendicular al rayo de electrones incidente. Si no se aprecian con claridad las características seleccionadas, se repite el ataque hasta que aparezcan las configuraciones geométricas deseadas. Se deposita entonces, en vacío, una película de oro de espesor inferior a $0,1 \mu\text{m}$ sobre la superficie de la fractura, a fin de mejorar la resolución. A continuación se fotografían las zonas escogidas y se toman las medidas de las distintas capas sobre la misma fotografía.

Aplicaciones

Esta técnica de corte y fractura es aplicable a una diversidad de tecnologías LSI y VLSI, y se pueden examinar dispositivos bipolares y MOS (semiconductor metal-óxido) a fin de obtener valiosa información sobre el diseño y proceso de circuitos integrados.

Evaluación de dispositivos de suministradores

Pueden aplicarse como rutina las técnicas de corte transversal y fractura, junto con los análisis de construcción, a fin de evaluar al suministrador en calidad, manufactura, soluciones a los diseños y otros aspectos relacionados con los circuitos. En una ocasión se sometió un tipo de DRAM de 64 K (RAM dinámica), de cuatro suministradores diferentes, a caracterización de diseño, eléctrica y de construcción. La figura 2 muestra una sección transversal a lo largo de una célula de almacenamiento, en la región de memoria de una DRAM de 64 K. La sección transversal se produjo mediante la técnica de fractura por congelación (nitrógeno líquido), que asegura un corte limpio a través de materiales tan dispares como el silicio y una capa de poliimida sobre el circuito, utilizada para evitar la penetración de partículas alfa. Este circuito se fabricó siguiendo un proceso de canal *n* y puerta de silicio, con doble nivel de polisilicio; las pistas de bitio son metálicas y las pistas de palabra, de polisilicio. La célula de almacenamiento de transistor único ($19 \times 19 \mu\text{m}$) tiene un grosor aproximado de óxido activo de 760 angstroms ($0,076 \mu\text{m}$). El análisis de muestras de circuitos individuales fue posible por el trazado repetitivo de la DRAM de 64 K.

Evaluación de tecnologías de punta

Otra aplicación del corte con fractura es la evaluación de nuevas tecnologías. Así, pues, pudo analizarse una memoria programable de sólo lectura y eléctricamente borrable, de $2 \text{K} \times 8$ bits; para ello se seccionó una pastilla en una parte de una

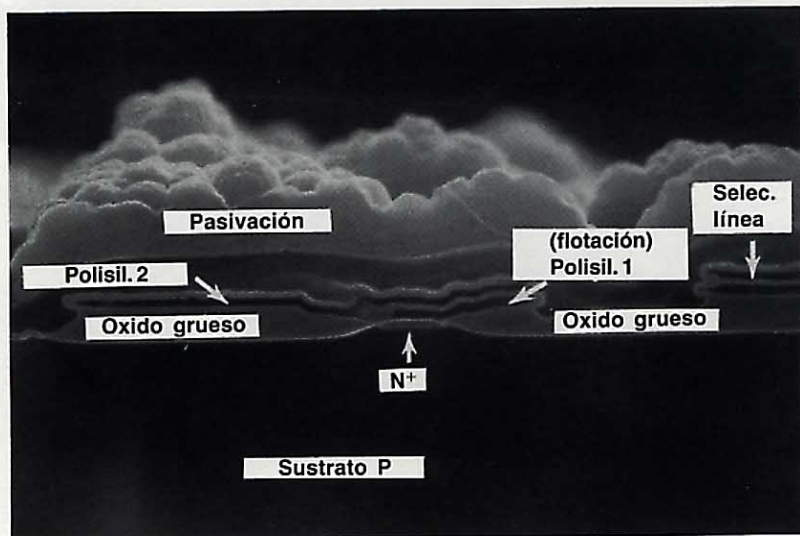


Figura 3 Sección transversal de una célula de almacenamiento de una memoria de sólo lectura, programable y eléctricamente borrable.

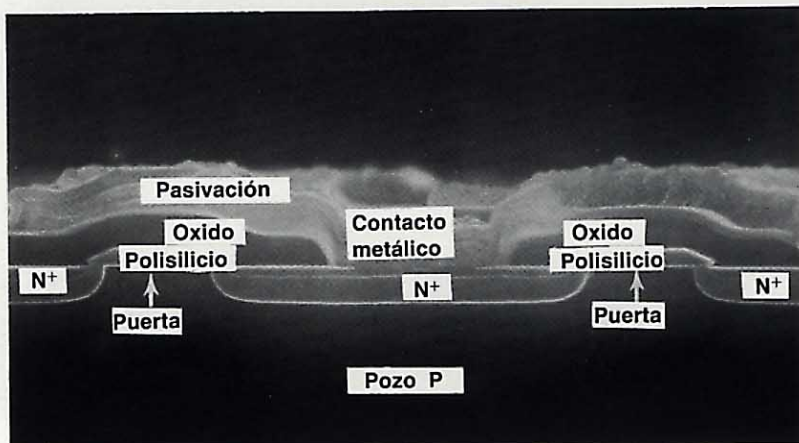
célula de almacenamiento ($26,3 \times 20 \mu\text{m}$) de la región de memoria del circuito (Fig. 3), identificándose los elementos clave del mismo y obteniéndose las dimensiones del diseño crítico y los parámetros del proceso. El circuito utiliza tecnología de canal *n* y puerta de polisilicio a dos niveles, con la primera capa de polisilicio ($0,2 \mu\text{m}$) como puerta flotante y un óxido para efecto túnel de $0,02 \mu\text{m}$ de espesor. El dispositivo se basa en el efecto túnel de Fowler-Nordheim para transportar la carga a almacenar desde el sustrato, a través del óxido túnel, hasta la primera capa de polisilicio que está a nivel eléctrico flotante.

Evaluación de tecnologías CMOS

Las estructuras complementarias MOS son las más difíciles de evaluar por la técnica de fractura, debido a la realización de dispositivos de canal *n* y *p* en el mismo circuito. Las diferencias en concentración de dopante entre los de tipo *n* y tipo *p* exigen varios procesos de ataque y varias etapas fotográficas para obtener resultados significativos.

Cuando se analizan estructuras CMOS, primeramente se ataca la sección cortada

Figura 4 Sección transversal de un CMOS cortado después del ataque para destacar las difusiones n^+ .



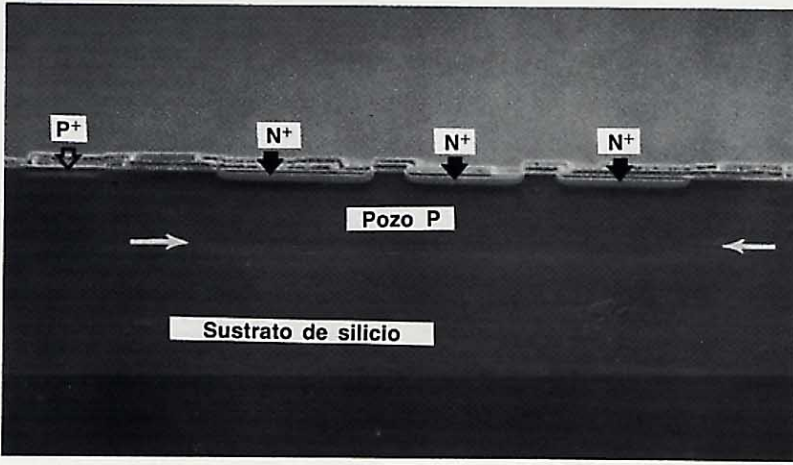


Figura 5
Sección transversal CMOS tras el ataque final para destacar el pozo *p* ligeramente dopado.

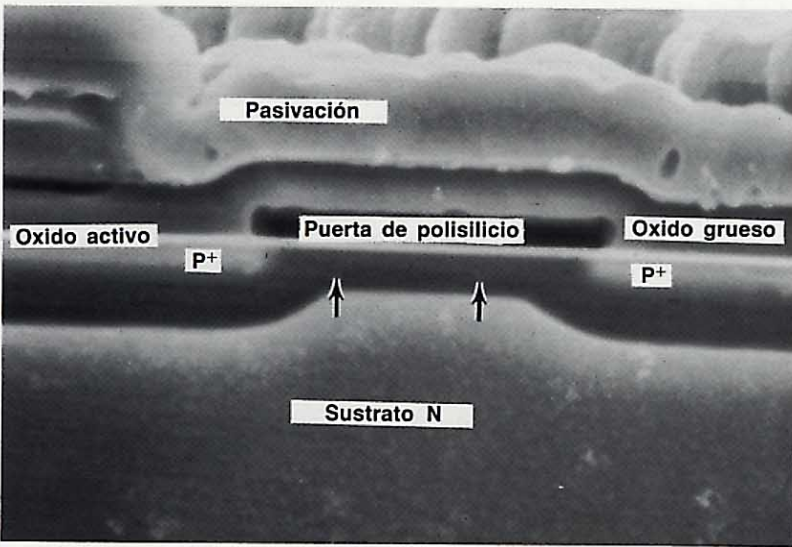


Figura 6
Cortocircuito en un dispositivo de canal *p* originado por penetración de un dopante iónico implantado a través de la puerta del dispositivo.

para destacar los dispositivos *n*⁺ (Fig. 4). Se pueden obtener medidas de profundidad de difusión, difusión lateral y longitud de canal. Además de estas medidas, se delinean las diferentes capas de óxido de silicio y polisilicio. Al polisilicio se le ve disminuir gradualmente con un ligero socavamiento por los lados. Después se ataca la sección para descubrir los dispositivos *p*⁺ y final-

mente el pozo *p*, ligeramente dopado (Fig. 5).

Evaluación del diseño

También se usa la técnica de fractura para ayudar a los ingenieros de diseño en el Advanced Technology Center. Un circuito CMOS, diseñado de encargo y sin funcionar, se sometió al análisis por fractura. La sección de un transistor de canal *p* reveló que el ion dopante implantado había penetrado a través de la puerta del transistor, cortocircuitando el drenador y la fuente (Fig. 6), lo que queda reflejado en la zona oscura debajo de la puerta. Una energía excesiva durante la implantación originó el problema.

Conclusiones

A pesar de existir otros bancos de prueba para comprobar la integridad del proceso y su calidad, el análisis por secciones transversales debe de considerarse como una aportación esencial. Las secciones transversales, resultado de fracturas, al ser observadas con microscopio electrónico proporcionan una resolución excelente de las capas subsuperficiales. Se están investigando nuevos perfeccionamientos de esta técnica, como el rayado por láser para cortar áreas precisas. A medida que se reduzcan las dimensiones características, crecerá la importancia de esta técnica, que será indispensable para circuitos VLSI avanzados.

John Knecht nació en 1938 en New Haven, Connecticut. Antes de incorporarse a ITT estuvo empleado en el United Technologies Research Center como analista de materiales, trabajando en la caracterización de cambios estructurales y de composición en materiales. Desde su entrada en el ATC de ITT en 1979, se ha encargado del laboratorio de microscopía electrónica en el departamento de control de calidad.

Michael Macari nació en 1951 en Yonkers, Nueva York. Estudió en la Universidad de Fairleigh Dickenson, donde en 1973 obtuvo el grado BS en tecnología de ingeniería eléctrica. Desde entonces ha trabajado en fiabilidad de circuitos integrados. En 1979 se incorporó al departamento de control de calidad del ATC de ITT, donde sus responsabilidades incluyen la evaluación de componentes y análisis de fallos de dispositivos LSI.

Cerámicas transparentes para aplicaciones electroópticas

Una cerámica transparente denominada BLTN presenta una velocidad de conmutación mayor que la del material existente PLZT. Se utilizará en una impresora sin impacto, ofreciendo una gama de otras posibles aplicaciones.

A. Gutu-Nelle

H. Schichl

J. Springer

Centro de Investigación de Standard Elektrik Lorenz, Stuttgart, República Federal de Alemania

Introducción

En comunicación óptica y en automatización de oficinas hay una creciente necesidad de componentes controlados eléctricamente, capaces de modular y conmutar la luz. Esta función puede realizarse mediante efectos magnetoópticos (Faraday o Cotton-Mouton) y efectos electroópticos (Kerr) que se observan en gases, líquidos y ciertos cristales ferroeléctricos. El resultado de tales efectos es un cambio en la birrefringencia o una rotación óptica en un medio sometido a un campo eléctrico o magnético. Las sustancias ferroeléctricas electroópticamente activas tienen una buena transparencia en el espectro visible e infrarrojo cercano, y la ventaja de ser dispositivos de estado sólido.

Materiales electroópticos

Los materiales típicos con fuerte efecto electroóptico son monocristales de perovskita (LiNbO_3) y el compuesto de tungsteno-bronce ($(\text{Sr}, \text{Ba})\text{Nb}_2\text{O}_6$). Su fabricación como cristales perfectos y de suficiente tamaño ha demostrado ser complicada y costosa. Al final de los 60, Haertling y Land¹ acertaron a producir cerámicas ferroeléctricas transparentes y policristalinas que presentan varios efectos electroópticos: son soluciones sólidas del tipo de la perovskita de PbTiO_3 y PbZrO_3 con determinada adición de óxido de lantano, y hoy se denominan PLZT.

La tecnología de estos materiales permite una fabricación relativamente económica de componentes electroópticos de gran superficie (hasta 100 mm de diámetro), buena transparencia y buena isotropía óptica. La mejor calidad óptica se consigue cuando los constituyentes del material (PbO , La_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2) se mezclan por un proceso de coprecipitación química, a

continuación se les hace reaccionar en una atmósfera de oxígeno (calcinación), y finalmente se sinterizan por presión con calor¹ o en un proceso de vacío².

Aplicaciones

Las cerámicas transparentes PLZT aparecen en diversas aplicaciones de los efectos electroópticos. Es posible ajustar las características de las cerámicas a las exigencias de la aplicación individual, modificando la composición de los cristales. El efecto transversal electroóptico puede utilizarse en conmutadores (puertas de luz) y moduladores ópticos. En esta aplicación, un campo eléctrico perpendicular a la dirección del haz de luz que atraviesa la cerámica induce birrefringencia y por consiguiente influye en la luz polarizada, como muestra la figura 1.

Una aplicación de tal puerta de luz es el oscurecimiento automático de máscaras de soldar. También se desarrollan componentes basados en cerámicas electroópticas, como almacenadores de imagen y pantallas. Asimismo SEL ha creado una impresora óptica de alta velocidad³, la cual consiste en puertas de luz, alineadas a lo largo de 210 mm y formadas por varias piezas de cerámica electroóptica. Mediante foto-litografía se realizó una configuración de electrodos con 1700 puertas de luz dispuestas en dos filas. El principio de la impresora se integra con el de la fotocopia, con la ventaja de que la información pueda ser presentada al tambor de selenio a través de la fila de puertas de luz controladas electrónicamente. Puede así transmitirse la imagen, obteniendo una alta calidad de impresión. La luz procedente de una lámpara de halógeno incide en la alineación de puertas de luz, pasa a través de ellas cuando están activadas, e imprime un diagrama de puntos en el tambor giratorio de selenio del duplicador (Fig. 2). Las cargas liberadas

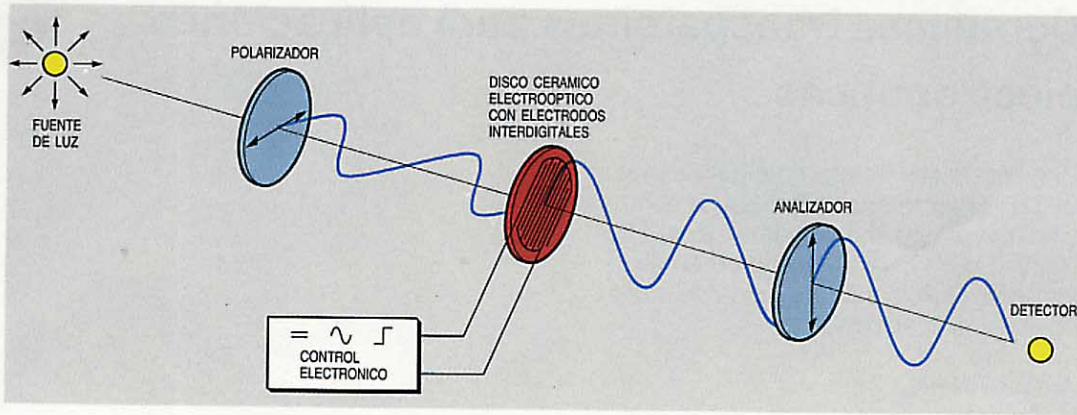


Figura 1 Principio de un dispositivo electro-óptico basado en la birrefringencia de una cerámica ferroeléctrica.

durante la exposición se transfieren al papel donde, de la forma usual, se genera la imagen mediante un tonificador (toner).

Limitaciones del PLZT

Todas estas aplicaciones requieren un campo eléctrico relativamente alto para el control de las puertas de luz; en un PLZT con recorrido de la luz (espesor) de 1 mm, se precisa un campo de aproximadamente 450 V mm^{-1} . Como resultado de la elevada constante dieléctrica relativa del PLZT (alrededor de 4000 a temperatura ambiente), deben moverse cargas muy altas para generar un campo tal. Esto significa un considerable esfuerzo en las estructuras de los electrodos y dificulta el dimensionado del control electrónico. El tiempo de conmutación también está limitado por las grandes cargas que hay que desplazar, ya que unas corrientes altas no pueden circular indefinidamente por los conductores. Una desventaja adicional del PLZT es su alta dispersión (es decir, la fuerte variación del índice de refracción con la longitud de onda).

Por estas razones un nuevo material cerámico había de ser transparente, electro-ópticamente activo y con una constante dieléctrica y dispersión menores que las del PLZT. Publicaciones sobre monocristales de $\text{Ba}_6\text{Ti}_2\text{Nb}_8\text{O}_{30}$, compuesto con una estructura de tungsteno-bronce³, han indicado que las cerámicas de esta composición u otra similar podrían presentar las características deseadas. Se han encontrado valores de 200 para la constante dieléctrica a temperatura ambiente, y de $1,1 \times 10^{-10} \text{ mV}^{-1}$ para el coeficiente electro-óptico r_c de los monocristales. El valor de r_c es algo superior al del PLZT. Como cristal tetragonal, el $\text{Ba}_6\text{Ti}_2\text{Nb}_8\text{O}_{30}$ (BTN) es birrefringente, mientras que el PLZT pseudo-cúbico es casi ópticamente isótropo.

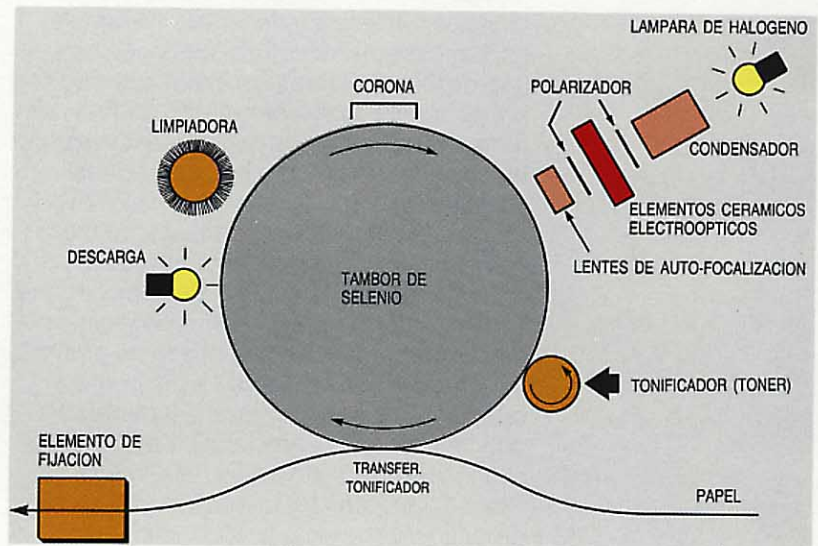
Por consiguiente, los objetivos en el desarrollo de una cerámica BTN adecuada fueron reducir la birrefringencia y ajustar los parámetros del proceso de fabricación para conseguir una cerámica transparente, sin

aumentar apreciablemente la constante dieléctrica ni reducir los efectos electro-ópticos. El enriquecimiento de la composición con lantano demostró ser el camino correcto para solucionar el problema.

Fabricación de cerámica transparente de BTN dopado con lantano

Los factores más importantes a observar en la fabricación de cerámicas transparentes son la extrema homogeneidad y limpieza. La reactividad alta es condición previa para la densa sinterización de la cerámica. El procedimiento más adecuado para producir tales polvos cerámicos homogéneos y reactivos es la precipitación común de los componentes procedentes de compuestos líquidos o solubles (coprecipitación). El problema es encontrar el compuesto soluble adecuado para cada componente y desarrollar un proceso por el cual todos ellos puedan precipitar cuantitativamente. El mejor método para el BLTN (BTN dopado con lantano) resultó ser un proceso de carbonatado en el que los cationes Ba^{2+} ,

Figura 2 Principio de una impresora sin impacto que utiliza componentes cerámicos electro-ópticos.



La^{3+} , Ti^{4+} y Nb^{5+} están presentes en la mezcla de carbonatos e hidróxidos después de la precipitación. Se parte de una solución de cloruro de niobio en metanol, mezclado con butilato de titanio. Posteriormente se añaden soluciones acuosas de acetato de bario, acetato de lantano y carbonato de amonio. Si se mezclan cuidadosamente las tres soluciones, tiene lugar una reacción química cuyo precipitado contiene todos los cationes: Ba^{2+} , La^{3+} , Ti^{4+} y Nb^{5+} , que pueden luego filtrarse. Después de sucesivos lavados y triturados, se lleva a cabo la calcinación para eliminar de los materiales los iones carbonatos e hidróxidos e inducir una reacción de los componentes que forme el compuesto mixto $\text{Ba}_{6-\frac{3}{2}x}\text{La}_x\text{Ti}_2\text{Nb}_8\text{O}_{30}$. El resultado es un reactivo granular, de tamaño excepcionalmente pequeño, que es el material inicial para la sinterización de la cerámica.

Se pueden sinterizar cerámicas transparentes por varios métodos diferentes. El PLZT, por ejemplo, suele fabricarse mediante un proceso de prensado al calor. Menos complicada es la sinterización al vacío, utilizada para las piezocerámicas de la mejor calidad⁴. Este método se desarrolló con éxito para PLZT en el Centro de Investigación de SEL y ahora ha sido utilizado para BLTN. El granulado calcinado se prensa isostáticamente en bloques adecuados, que después se tratan en un proceso sinterizador de tres fases. El material se calienta en vacío y después se pre-sinteriza. Después de un nuevo aumento de temperatura realizado en dos fases, se hace pasar oxígeno a presión por el horno durante 24 horas. La presión reducida no solamente evita la formación de micro-cavidades sino que también da lugar a una reducción parcial de titanio y niobio, produciendo un color gris que desaparece durante la fase de oxigenación. Este método produce una cerámica transparente, con un 99,9% de su densidad teórica.

Características de la cerámica BLTN

Características ópticas

La adición de lantano al BTN reduce su birrefringencia, por lo cual disminuye la refracción de la luz en los bordes de los cristales del material cerámico y mejora la transparencia. El proceso especializado de fabricación produce una cerámica homogénea y virtualmente libre de poros, asegurando mínima dispersión de la luz. Se ha determinado una composición con la cual se podría fabricar una cerámica con isotropía óptica y de máxima transparencia. La figura 3 muestra discos triturados y pulidos del material $\text{Ba}_{5,78}\text{La}_{0,15}\text{Ti}_2\text{Nb}_8\text{O}_{30}$

(BLTN 20). Esta cerámica es transparente en longitudes de onda desde 380 nm (límite con el ultravioleta de la luz visible) hasta 6000 nm (infrarrojo cercano). La transparencia de un disco de 200 μm de espesor es del 60%. La mayor parte de las pérdidas se debe a la reflexión en las superficies, que se puede reducir por deslustración.

Características eléctricas

La cerámica BTN sin lantano, al igual que los monocristales, tiene una baja constante dieléctrica, aproximadamente de 200, que depende de la temperatura y la frecuencia. A 240°C, temperatura de Curie, dicha

Figura 3
Discos triturados y pulidos de cerámicas BLTN 20; el de la izquierda ha tenido electrodos evaporados en la superficie.



constante alcanza un máximo. La incorporación de lantano desvía este máximo a temperaturas inferiores, aumentando así la constante dieléctrica a temperatura ambiente. En tales temperaturas se midieron para el BLTN 20 valores de 690 a 100 kHz, 790 a 10 kHz y 980 a 1 kHz, que están entre la cuarta y la sexta parte de la constante dieléctrica del PLZT; esto significa que el transporte de carga necesario para crear un campo eléctrico en la cerámica es también sólo la cuarta o la sexta parte del requerido para el PLZT. En el PLZT y BLTN, ambas sustancias ferroeléctricas, un aumento en el contenido de lantano reduce la temperatura de Curie y disminuye la intensidad de campo y la polarización espontánea.

Comportamiento electroóptico

El comportamiento de conmutación electroóptico del BLTN se determinó experimentalmente mediante el principio mostrado en la figura 1. La luz polarizada pasa a través del disco pulido con sus electrodos. El plano de polarización de la luz se inclina 45° respecto a la dirección de los electrodos. En el otro lado hay un analizador, cuya dirección de vibración se ajusta a la de máxima extinción (a 90° con relación al polarizador).

Si la cerámica es ópticamente isótropa, como en el caso del BLTN 20, toda la luz se extingue en el analizador. Al aplicar un campo eléctrico entre los electrodos, se inducirá una birrefringencia que depende de dicho campo y hace girar el plano de polarización de la luz, permitiendo que ésta pase a través del analizador. Las intensidades se miden en el detector y la relación de la intensidad máxima a la intensidad mínima en el estado no conmutado, se denomina razón de contraste. En el estado actual de desarrollo, su valor para la cerámica BLTN es cercano a 250. El voltaje necesario para conseguir este contraste es aproximadamente el mismo para muestras de PLZT y de BLTN con idéntica forma geométrica. Como ya se indicó, la corriente que ha de ser conmutada en el caso del PLZT es cuatro a seis veces la necesaria con BLTN. La razón de contraste inferior del BLTN con respecto al PLZT es una consecuencia de la falta de homogeneidad remanente en el material, que al dispersarla despolariza parcialmente la luz procedente del polarizador, aumentando por consiguiente el valor de oscuridad.

Conclusiones

El desarrollo de las cerámicas transparentes BLTN ha ofrecido una alternativa al PLZT, con varias ventajas. Ambos materiales son similares en estructura; la perovskita y las estructuras de tungsteno-bronce tienen los mismos elementos de la red cristalina (octaedro de perovskita), pero difieren en su simetría cristalina. El dopado del BLTN con lantano reduce la birrefringencia a un mínimo sin sacrificar las propiedades ferroeléctricas, permitiendo la fabricación de una cerámica transparente a partir de este material.

Se han confirmado totalmente las expectativas de que las cerámicas BLTN puedan ser conmutadas a mayor velocidad que las PLZT, debido a su constante dieléctrica relativamente baja y al menor esfuerzo de corriente en los electrodos. Se han conseguido ya tiempos de conmutación por debajo de 10 μ s. Por consiguiente, este

material tendría ventajas en dispositivos electroópticos, en particular donde se requieran altas frecuencias de conmutación (moduladores láser, puertas de luz para impresoras electroópticas y gafas protectoras).

La razón de contraste de 250 a 1, ya conseguida, se puede aumentar reduciendo los puntos de dispersión en el material. Habrá que mejorar aún más las técnicas de fabricación, y en consecuencia la homogeneidad del material, para hacer que el BLTN sea atractivo en una extensa gama de aplicaciones.

Referencias

- 1 G. H. Haerling y C. E. Land: Hot-Pressed (Pb, La) (Zr, Ti)O₃ Ferroelectric Ceramics for Electrooptic Application: *Journal of the American Ceramic Society*, enero 1971, volumen 54, n° 1, págs. 1-11.
- 2 K. Diekstatt, A. Gutu-Nelle, J. Lauckner, F. Lutz, S. Muller, G. Seibold, H. Schichl, y H. Volz: *BMFT-Forschungsbericht T80-166*, 1980.
- 3 Y. Itoh y H. Iwasaki: Ferroelectric and Optical Properties of Ba₆Ti₂Nb₈O₃₀ Single Crystals: *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, octubre 1973, volumen 34, n° 10, págs. 1639-1645.
- 4 K. Mohring y H. Schichl: Method of Producing Pore-Free PZT Ceramics: *Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft*, julio 1976, volumen 53, n° 7, págs. 200-202.

Anca Gutu-Nelle nació en Bucarest, Rumania, en 1938. Estudió metalurgia en la Universidad de Bucarest y realizó trabajos en los centros de investigación nuclear en Bucarest y Karlsruhe. En 1973 ingresó en el Centro de Investigación de SEL, donde principalmente se dedica a materiales ferroeléctricos y electroópticos.

Hermann Schichl nació en Helfenberg, Austria, en 1939. Estudió química técnica en la Universidad de Viena, donde obtuvo el grado de doctor con su trabajo en química del cristal y estructuras cristalinas de los minerales. Después estuvo trabajando en investigación industrial sobre ferroeléctricos. En 1973 ingresó en el Centro de Investigación de SEL, siendo ahora jefe de proyecto para desarrollo de materiales.

Johann Springer nació en Kaufbeuren, Alemania, en 1946. Estudió mineralogía en las Universidades de Munich y Erlangen y obtuvo el grado de doctor con una tesis sobre rocas minerales y fases del cemento hidratado. Después trabajó durante cuatro años en el campo de la investigación industrial, en el almacenamiento de hidrógeno para usarlo como combustible alternativo en automóviles. En 1981 el Dr. Springer ingresó en el Centro de Investigación de SEL, donde trabaja en investigación y desarrollo de materiales ferroeléctricos y otros materiales electrónicos.

En este número

Bury, J. R.; Cranfield, B. A.; Simpson, W. E.

Desarrollo de cables no propagadores de llama y de baja agresividad

Comunicaciones Eléctricas (1982), volumen 57, nº 2, págs. 83-86

Durante los últimos años se ha hecho evidente la necesidad de una nueva generación de polímeros que no propaguen la llama para utilizarlos en el aislamiento y en las cubiertas de cables eléctricos. Los autores describen las últimas investigaciones que han permitido identificar varios nuevos y prometedoros materiales para una amplia gama de aplicaciones. Las pruebas han mostrado que los modernos compuestos tienen mejores características que los anteriores, tanto en la no propagación de llama como en la reducción de humos y gases desprendidos.

Dissado, L. A.; Fothergill, J. C.; Wolfe, S. V.

Desarrollos en aislamientos de polietileno reticulado para cables de energía

Comunicaciones Eléctricas (1982), volumen 57, nº 2, págs. 87-90

El polietileno es un polímero versátil que puede modificarse a voluntad para cumplir exigencias específicas mediante la alteración de su estructura cristalina (morfología). Este artículo destaca los principales factores implicados y describe los trabajos actuales sobre el polietileno reticulado para el aislamiento de cables de energía. Las amplias investigaciones sobre los mecanismos de degradación han avanzado mucho hacia la resolución de problemas como la formación de arborescencias por descargas eléctricas y de arborescencias debidas al agua.

Walters, D. L.

Dieléctricos para cables submarinos

Comunicaciones Eléctricas (1982), volumen 57, nº 2, págs. 91-95

A los dieléctricos utilizados en los sistemas de cables coaxiales submarinos se les imponen unas exigencias rigurosas. Cambios apenas medibles de la permitividad o del ángulo de pérdidas pueden tener un efecto importante sobre la atenuación de un sistema transoceánico. Se están llevando a cabo en STL investigaciones sobre dieléctricos poliolefinicos utilizados en los modernos cables submarinos para mejorar en lo posible sus características. También se están realizando estudios de dieléctricos para los futuros cables submarinos de fibra óptica, cuyas exigencias son radicalmente diferentes.

Ramsay, M. M.; Russell, J. N.; Titchmarsh, J. G.

Diseño de cables de fibras ópticas

Comunicaciones Eléctricas (1982), volumen 57, nº 2, págs. 96-101

Los autores describen los principales factores que pueden influir en las características de los cables de fibras ópticas, incluyendo la radiación en las curvas, el acoplamiento de modos, los recubrimientos de las fibras, las fisuras y las deformaciones por compresión. Se han realizado diseños que controlan estos factores, y se están ya utilizando cables de fibras ópticas satisfactoriamente en una amplia gama de aplicaciones con muy distintos requisitos.

Pitt, G. D.

Sensores de fibra óptica

Comunicaciones Eléctricas (1982), volumen 57, nº 2, págs. 102-106

La presión, la temperatura, la distancia, el campo magnético, la rotación y el flujo son algunas de las magnitudes que se pueden medir empleando las técnicas sobre fibras ópticas descritas en este artículo. Las ventajas de estos nuevos sensores sobre las técnicas convencionales son su pequeño tamaño, su seguridad en ambientes peligrosos, su inmunidad a las interferencias y la posibilidad de integrar procesos ópticos con los sensores.

Marchant, A. H.; Pitt, G. D.

Dispositivos de efecto Hall para relés y otras aplicaciones

Comunicaciones Eléctricas (1982), volumen 57, nº 2, págs. 107-111

Las centrales telefónicas totalmente electrónicas requieren encontrar un dispositivo de estado sólido que sustituya a los relés electromecánicos. Los dispositivos de efecto Hall basados en la tecnología bipolar de silicio han alcanzado ya un nivel de desarrollo que permite usarlos con éxito en centrales electrónicas. Los autores describen el desarrollo y la construcción de estos dispositivos, y analizan las mejoras que promete el empleo de la tecnología de GaAs.

George, W. R.

Ensayos de relajación de tensiones en materiales utilizados para conductores y resortes

Comunicaciones Eléctricas (1982), volumen 57, nº 2, págs. 112-115

La relajación de tensiones en metales y aleaciones puede afectar al comportamiento de las conexiones terminales de los conductores y a la resistencia de contacto de los relés. STL ha realizado ensayos con materiales empleados para hilos conductores, hilos de resortes y resortes de lámina, utilizando un método original de medición de la tensión para los hilos y una sencilla técnica de flexión con cuña para los resortes de lámina. Los resultados demuestran que la rapidez de relajación aumenta con la temperatura y la tensión inicial.

Smith, I. H.

Sistemas de proceso de imagen en la industria fabril

Comunicaciones Eléctricas (1982), volumen 57, nº 2, págs. 116-120

Los modernos microprocesadores y memorias han hecho posible el desarrollo de sistemas de proceso de imagen que pueden efectuar trabajos relativamente simples y repetitivos a un coste razonable. El artículo describe las características principales de estos sistemas y explica el avanzado trabajo que en este campo está realizando STL.

Ross, P. W.

Pantallas de cristal líquido

Comunicaciones Eléctricas (1982), volumen 57, nº 2, págs. 121-126

El autor describe los cristales líquidos nemáticos, colestéricos y esmécticos que, probablemente, pronto nos ofrecerán una alternativa al TRC en forma de pantalla plana. Los dispositivos que ahora se están desarrollando se destinan a pantallas alfanuméricas complejas. Con el tiempo, otros tipos de pantallas de cristal líquido, llegarán a ser importantes (p. ej., para nuevos dispositivos de memoria); el desarrollo de los materiales apropiados está ya en fase de síntesis y evaluación.

Graves, P. W.

Película gruesa: materiales y fiabilidad

Comunicaciones Eléctricas (1982), volumen 57, nº 2, págs. 127-131

En 1969, STL inició un programa de soporte a la entonces naciente tecnología de circuitos híbridos con el análisis de materiales conductores y resistivos. Desde entonces se han desarrollado gran cantidad de técnicas de evaluación y se han realizado facilidades para el procesamiento. El artículo describe muchos de los hallazgos de los pasados 13 años, que han mejorado considerablemente las prestaciones de los modernos circuitos híbridos.

Ashcroft, G. L.

Conductores polímeros: materiales y aplicaciones del proceso

Comunicaciones Eléctricas (1982), volumen 57, nº 2, págs. 132-136

Los trabajos realizados en STL con polímeros conductores con carga metálica durante los tres últimos años han hecho conocer su comportamiento físico y químico y han culminado en el desarrollo de una tecnología de conductores aditivos a baja temperatura. Por medio de extensas pruebas sobre materiales, se ha conseguido un medio de interconexión de circuitos eléctricos económico y fiable.

Hinou, M.; Vermeirsch, W.; Vlaeminck, R.

Tintas de metales no nobles para circuitos híbridos

de película gruesa

Comunicaciones Eléctricas (1982), volumen 57, nº 2, págs. 137-141

Se han utilizado tradicionalmente pastas conductoras basadas en oro para circuitos híbridos de película gruesa, pero ya han aparecido en el mercado un buen número de pastas conductoras basadas en cobre. Este artículo describe las pruebas realizadas con cuatro tipos de estas tintas y sus respectivos dieléctricos compatibles. Los resultados muestran que los mejores de estos materiales pueden utilizarse para la realización de sustratos multicapa fiables a costos económicos.

El Refaie, M.

Sustratos de interconexión tipo chipstrato para sistemas electrónicos avanzados

Comunicaciones Eléctricas (1982), volumen 57, n° 2, págs. 142–147

El coste y las prestaciones de los sistemas electrónicos están relacionados con la densidad de empaquetado a nivel de componente. El CHIPSTRATO* es una familia de sustratos de interconexión adecuada para montaje superficial de alta densidad de componentes no encapsulados o encapsulados sin terminales. Este artículo describe soluciones para los problemas de compatibilidad, alta densidad de interconexión, y disipación térmica, con referencias específicas a prototipos y vehículos de prueba que están en evaluación.

* Marca registrada del Sistema ITT

Smernos, S.; Straus, R.

Soldadura a baja temperatura

Comunicaciones Eléctricas (1982), volumen 57, n° 2, págs. 148–151

La soldadura de componentes electrónicos en placas de circuito impreso tiene lugar generalmente a temperaturas entre 240 y 250°C. Durante la soldadura, los componentes y las placas están expuestos a choque térmico, lo que puede afectar a su fiabilidad a largo plazo. Con el uso de metales de aportación de bajo punto de fusión, que reducen la temperatura de soldadura a unos 180°C, se espera disminuir el número de fallos de componentes. Los autores describen las pruebas realizadas con diversas sueldas posibles y el desarrollo de un fundente apropiado para baja temperatura.

Stroehle, D.

Componentes semiconductores con encapsulado plástico para sistemas de telecomunicación

Comunicaciones Eléctricas (1982), volumen 57, n° 2, págs. 152–156

Los fallos de los dispositivos encapsulados en plástico, debidos a condensación del vapor de agua, se han citado con frecuencia como una desventaja importante frente a los componentes, más caros, con encapsulado cerámico. No obstante, el propio calentamiento del componente o del sistema completo en el bastidor, reduce la humedad relativa, causa principal de los fallos por condensación. Los datos extrapolados de vida indican que los componentes con encapsulado plástico pueden utilizarse en sistemas que requieran larga vida, en el supuesto de que el equipo esté en funcionamiento permanente.

Holycross, M. E.; Saccocio, E. J.

Extracción en seco de encapsulantes plásticos mediante quemado en plasma

Comunicaciones Eléctricas (1982), volumen 57, n° 2, págs. 157–160

El quemado en plasma permite la extracción no destructiva de encapsulantes plásticos en los circuitos integrados, facilitando el examen del componente. La velocidad de quemado ha aumentado merced al diseño perfeccionado del reactor de plasma, al uso de presiones más elevadas y a la introducción de catalizadores en el oxígeno del plasma. Los autores describen todas estas innovaciones, de las que ha resultado una técnica efectiva, rápida, barata y, sobre todo, que no daña el circuito integrado.

Beernaert, D.; Schols, G.; Van Iseghem, P.

Técnicas de aislamiento para integración a muy gran escala

Comunicaciones Eléctricas (1982), volumen 57, n° 2, págs. 161–166

Las técnicas de aislamiento para VLSI son cada vez más importantes para aplicaciones de alta densidad y alta velocidad, y para circuitos integrados de alto voltaje. Los autores describen tecnologías optimizadas de aislamiento entre dispositivos, tales como la técnica LOCOS, y tratan problemas de aislamiento selectivo como el fenómeno "pico de ave". También se revisan y comparan, en este artículo, las tecnologías de aislamiento por dieléctrico y por unión.

Knecht, J.; Macari, M.

Examen con microscopio electrónico de las secciones transversales por fractura de circuitos LSI y VLSI

Comunicaciones Eléctricas (1982), volumen 57, n° 2, págs. 167–170

Los métodos tradicionales de examen de circuitos LSI y VLSI adolecen de limitaciones, siendo la más importante la falta de resolución. La nueva técnica de observación de secciones transversales de dispositivos fracturados, usando un microscopio electrónico, ha superado la mayor parte de estas desventajas, dando una resolución de hasta 0,005 µm. Los autores describen la técnica y su utilización en la evaluación de nuevas tecnologías, dispositivos CMOS, diseños y circuitos de suministradores.

Gutu-Nelle, A.; Schichl, H.; Springer, J.

Cerámicas transparentes para aplicaciones electroópticas

Comunicaciones Eléctricas (1982), volumen 57, n° 2, págs. 171–174

Se ha desarrollado una nueva cerámica transparente con propiedades electroópticas como una alternativa a los materiales PLZT existentes, de alta permitividad. Basado en los niobatos de bario con una estructura de tungsteno-bronce, el nuevo material tiene una permitividad relativamente baja y altas constantes electroópticas. Los autores describen la fabricación de este material cerámico y sus propiedades. Las aplicaciones incluyen una impresora sin impacto, un dispositivo automático para oscurecimiento de máscaras de soldar, y componentes tales como elementos de almacenamiento de imagen y pantallas.

Oficinas Editoriales

La correspondencia relacionada con las diferentes versiones de Electrical Communication debe dirigirse al editor correspondiente:

Michael Deason
Electrical Communication
Great Eastern House
Edinburgh Way
Harlow, Essex
England

Otto Grewe
Elektrisches Nachrichtenwesen
Hellmuth-Hirth-Strasse 42
7000 Stuttgart 40
Deutsche Bundesrepublik

Antonio Soto
Comunicaciones Eléctricas
Ramírez de Prado, 5
Madrid – 7
España