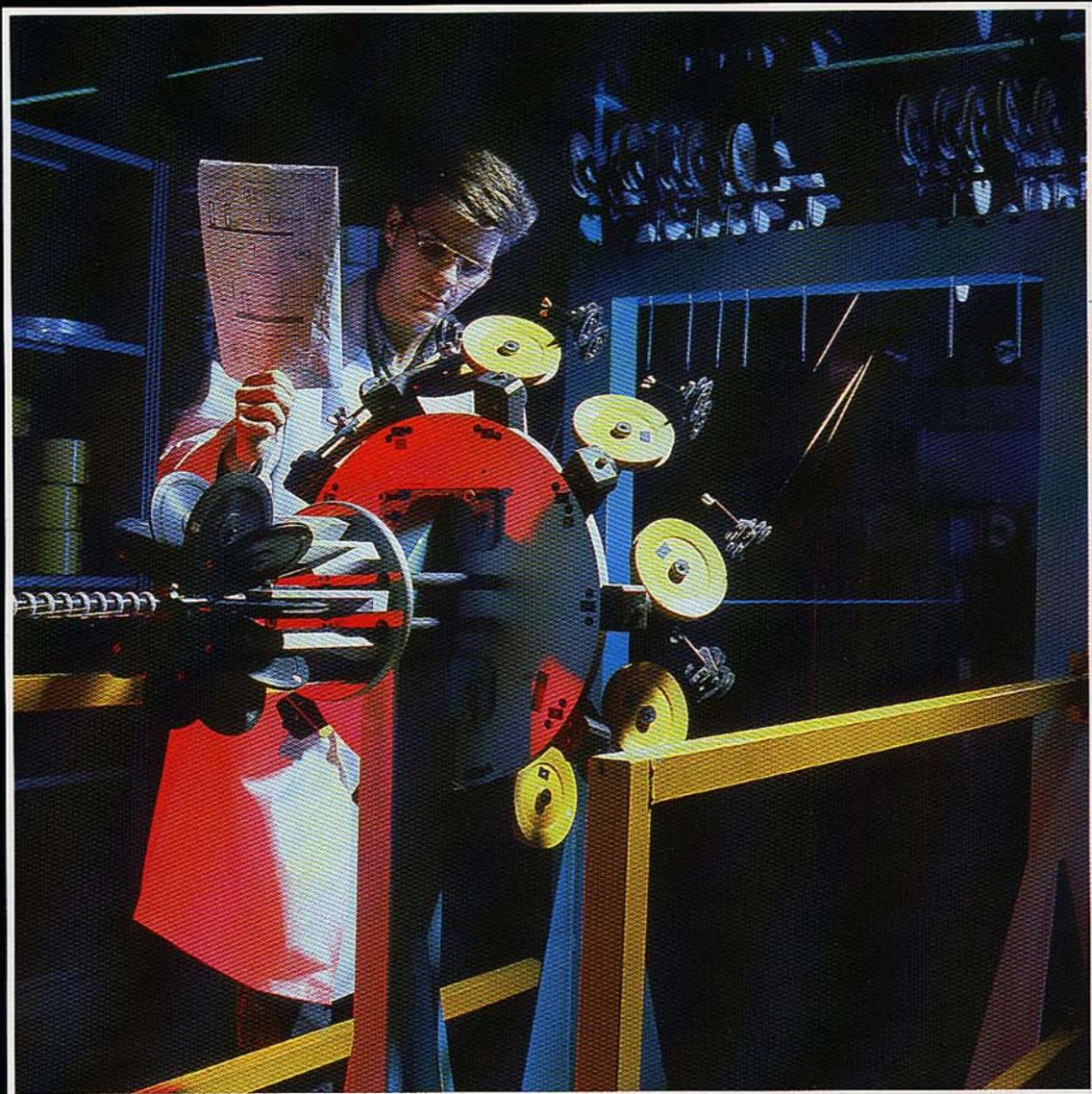


COMUNICACIONES ELÉCTRICAS



Tecnología de comunicaciones ópticas

ALC▲TEL



COMUNICACIONES ELÉCTRICAS

Información importante para nuestros lectores

Este número de *Comunicaciones Eléctricas*, revista técnica de Alcatel, es el primero de una serie que se publicará trimestralmente, siendo este número el correspondiente al Cuarto trimestre 1992.

El precio de la revista es de 1800 pts. por copia, pero nosotros le ofrecemos una suscripción gratuita.

Si ha recibido esta copia por correo, supondremos que sus datos son correctos y continuaremos enviándole gratuitamente las copias de *Comunicaciones Eléctricas*, a menos que nos indique cualquier cambio. Si desea que le incluyamos en nuestra lista de suscriptores, devuélvanos la tarjeta de abajo rellena. Alternativamente puede enviar una carta o fax al editor de la edición en el idioma deseado. Las direcciones de los editores aparecen en la última página de este número.

Comunicaciones Eléctricas se publica en cinco idiomas, llegando a la comunidad técnica, científica e industrial de todo el mundo. Agradeceríamos cualquier sugerencia o comentario, los cuales deberá dirigir a su editor local.

Los próximos números incluirán artículos de diferentes temas, en lugar de ser monográficos como hasta ahora. De esta manera seremos capaces de llevarle la información al estado del arte en telecomunicaciones. Además, al final de este número y en los sucesivos encontrará una lista seleccionada de las últimas patentes de Alcatel, lo que le dará una idea del continuo esfuerzo creativo en investigación y desarrollo realizado por Alcatel en muchos países.

Esperamos que encuentre *Comunicaciones Eléctricas* informativa, instructiva y agradable de leer.

Tarjeta de respuesta

- Por favor, corrija mi dirección
- Por favor, añada mi nombre a su lista de distribución
- Por favor, anule mi suscripción

Número de suscriptor : _____
(en la etiqueta del sobre)

Apellidos : _____

Nombre : _____

Compañía : _____

Dirección : _____

País : _____

Inglés Francés Alemán Español Italiano

Número de copias deseadas : _____

**Sello/
Stamp**

**Editor de Comunicaciones Eléctricas
Ref. 20220 (Gustavo Arroyo)
ALCATEL STANDARD ELÉCTRICA
Ramírez de Prado 5
28045 Madrid
España**

Comunicaciones Eléctricas, revista técnica trimestral de Alcatel NV, presenta las investigaciones conseguidas por las compañías Alcatel en todo el mundo. Comunicaciones Eléctricas se edita actualmente en cinco idiomas y su distribución es universal.

COMUNICACIONES ELÉCTRICAS

Cuarto trimestre 1992

Comité editorial

Peter Rodley
Presidente

Dominique Brouard
Alcatel Cable

Bernard Culot
Alcatel Radio, Space & Defense

Rossella Daverio
Relaciones Corporativas y Publicidad

Georges Paricard
Alcatel Business Systems

Renzo Ravaglia
Network Engineering & Installation

Werner Schmidt
Patentes

Renaat Van Malderen
Alcatel Network Systems

Editores

Rod Hazell
*Editor-Jefe internacional y
Editor, Electrical Communication, París*

Catherine Camus
*Adjunto al Editor-Jefe internacional y
Editor, Revue des Télécommunications, París*

Theo Wichers
Editor, Elektrisches Nachrichtenwesen, Stuttgart

Gustavo Arroyo
Editor, Comunicaciones Eléctricas, Madrid

Dino Callegari
Editor, Prospettive di Telecomunicazioni, Milán

Las direcciones de los editores se dan en la última página de este número.

Directora de la Publicación: Rossella Daverio
Revista técnica trimestral, editada por Alcatel Alsthom Publications S.A., con un capital de 250 000 Francos franceses.

Domicilio social: 12, rue de la Baume, 75008 París, Francia

Depósito Legal: RCS París B 349 910 521

Accionista principal: Samag: 99,76%

Registro legal: Septiembre 1992

ISSN: en curso

Imprime: IMB Imprimeur, 19-21, place Pierre-Renet, 70000 Vesoul, Francia

Tirada: 5 200 ejemplares

© Alcatel Alsthom Publications

Tecnología de comunicaciones ópticas

- 2 **Editorial**
- 4 **El impacto de las comunicaciones ópticas**
J.-C. Carballes
- 12 **Componentes optoelectrónicos en preparación dentro de Alcatel**
O. Hildebrand, M. Erman
- 22 **Desarrollo y fabricación de componentes optoelectrónicos activos**
J.-P. Pestie
- 29 **Diseño y fabricación de componentes pasivos de optoelectrónica**
R. Jocteur, J.-P. Dumas
- 37 **Progreso en amplificación óptica**
J. Augé, J. Chesnoy, P.-M. Gabia, A. Weygang
- 45 **Sistemas submarinos de transmisión óptica**
E. Blanc, Ch. Reinaudo, J.-L. Chabert, V. Lemaire
- 51 **Sistemas terrestres de transmisión óptica**
S. Bartsch, P.-M. Thépaut
- 58 **La optoelectrónica en el bucle del abonado**
L. Adnet, H. Mionet, W. Schmid
- 66 **Aplicación de la optoelectrónica a las radiocomunicaciones**
J. Chesnoy, R. Heidemann, J. Joseph, V. Kumar, M. Lemaire, A. De Place
- 72 **El futuro de la conmutación fotónica**
J. Dupraz, J.-M. Gabriagues, J.-B. Jacob, P. Speier
- 78 **Los sistemas y componentes optoelectrónicos del futuro**
H. Ohnsorge, P. Desombre, H. Haupt
- 85 **Patentes**
- 95 **En este número**

En esta publicación no se hace ninguna mención a derechos relativos a marcas o nombres comerciales que puedan afectar a algunos de los términos o símbolos utilizados. La ausencia de dicha mención no implica, sin embargo, la falta de protección sobre esos términos o símbolos.





Tecnología de comunicaciones ópticas

Editorial

Este número de Comunicaciones Eléctricas coincide con el International Switching Symposium (ISS'92) de Tokio. Puede parecer extraño que se dedique a la tecnología de comunicaciones ópticas y no a las nuevas tecnologías de conmutación. Sin embargo, hemos considerado que las muchas contribuciones de Alcatel a dicho simposio cubren perfectamente nuestros esfuerzos de investigación en conmutación. Además, Telecom 91 de Ginebra dio la oportunidad de mostrar nuestro liderazgo en sistemas de conmutación MTA.

La tecnología de las comunicaciones ópticas ha sido elemento esencial en el progreso de los sistemas de transmisión durante los últimos veinte años. Parte de esta historia se recuerda en los artículos de este número. Sin embargo, el principal objetivo de los artículos es mostrar el camino de las futuras mejoras en el comportamiento de los dispositivos, y el aumento en funcionalidad y campo de aplicación.

Aunque se ha hecho un enorme progreso en el pasado, el artículo *Componentes optoelectrónicos en preparación dentro de Alcatel* de O. Hilderbrand y M. Erman muestra como es posible realizar importantes nuevos avances empleando técnicas que están en evaluación en nuestros laboratorios de investigación.

Los componentes optoelectrónicos ya no son productos de laboratorio, pero se deben desarrollar para su fabricación en masa. El estado actual de las actividades de Alcatel dentro de este campo se describe en los artículos *Desarrollo y fabricación de componentes optoelectrónicos activos* de J.P. Pestie y *Diseño y fabricación de componentes pasivos de optoelectrónica* de R. Jocteur y J.P. Dumas.

Dentro de este contexto, el término "componente" debe de ser tomado en su sentido más amplio. De hecho, en estos momentos, estamos viviendo la transición desde los componentes discretos de una sola función hacia los módulos de sistemas integrados. Una clara idea de ello se da al comienzo del artículo *El impacto de las comunicaciones ópticas* de J.C. Carballes y, al final del número, en el artículo *Los sistemas y componentes optoelectrónicos del futuro* de H. Ohnsorge, P. Desombre y H. Haupt.

Al mismo tiempo se esta ampliando el campo de aplicación. La tecnología de las comunicaciones ópticas sigue siendo un elemento clave de los sistemas de transmisión terrestres y submarinos, lo cual se ilustra en dos artículos que tratan sobre ella. Sin embargo, la introducción de la fibra en el bucle del abonado conduce a nuevos desafíos y oportunidades.

La aplicación de la tecnología de comunicaciones ópticas en sistemas de radio parece a primera vista menos obvia, pero el artículo *Aplicación de la optoelectrónica a las radiocomunicaciones* de J. Chesnoy y otros, hará que muchos lectores lo piensen dos veces.

Finalmente estamos, por supuesto, investigando activamente las posibilidades de la conmutación óptica. El gran nivel de las inversiones de Alcatel en tecnologías de comunicaciones ópticas es un reflejo de nuestra disposición de mantener el liderazgo en el suministro de sistemas y redes de telecomunicaciones.

Aunque característico de Alcatel, es también un esfuerzo multinacional ya que colaboran muchas instituciones y universidades.



J. Cornu
Executive Vice President
Technical and Operations

El impacto de las comunicaciones ópticas

J.-C. Carballes

Alcatel Alsthom Recherche, Marcoussis, Francia

Con su potente cultura orientada a los servicios y a las comunicaciones, dirigida a todo el mundo, nuestra compañía consume cada vez un mayor volumen de datos y cada vez sobre mayores distancias. Estas nociones de incremento de volumen y distancia, a las cuales hay que añadir el objetivo de una constante reducción de los costes, representan los principales objetivos en los que se mueven actualmente los sistemas de transmisión.

Introducción

Las fibras ópticas han demostrado ser sustancialmente superiores a los cables de cobre como portadoras de grandes volúmenes de información, esencial para las actividades de nuestra compañía. El comportamiento de la fibra óptica incide principalmente en dos parámetros claves, el factor de atenuación que afecta a la máxima distancia de transmisión y la anchura

de banda que afecta a la máxima velocidad de transmisión. En aquellas aplicaciones que necesiten una velocidad de transmisión que pase de unos pocos Mbit/s, la transmisión por fibra óptica es la única solución.

Este artículo, comienza considerando la evolución de las distintas tecnologías ópticas y sus implicaciones en el campo de la transmisión. Se revisa la situación actual y los principales sectores de actividad que dependen de esta tecnología. Se acaba con un análisis de las principales tendencias y su impacto en las áreas de telecomunicaciones, transmisión, redes y conmutación.

La historia hasta hoy

La tecnología óptica todavía es muy nueva. Fue en 1966 cuando Kao y Hockman propusieron el uso de una fibra de silicio como portadora de transmisión. La subsiguiente evolu-

ción ha seguido unos pasos muy acelerados, con una familia de fibras sustituyendo a otra. Este esquema se muestra en la Figura 1, donde se indica, para sistemas de transmisión por fibra óptica, la distancia entre repetidores y la velocidad de transmisión para las diferentes longitudes de onda correspondientes a cada familia.

Detrás del progreso de la tecnología óptica está la evolución del rendimiento de los componentes básicos. La Tabla 1 señala las etapas de los dos componentes claves involucrados - la propia fibra óptica y el diodo láser - y los primeros sistemas de transmisión punto a punto que utilizaron estos componentes.

Muy pronto se reconoció que la fibra óptica tenía un considerable potencial y que sus características determinarían el rendimiento de los futuros sistemas de transmisión. La mejora del rendimiento de la anchura de banda y del nivel de atenuación fue el objetivo de numerosos estudios.

Para aprovechar estas potenciales ventajas, también fue necesario estudiar y desarrollar componentes capaces de adaptarse a las propiedades de la fibra óptica y de cumplir los objetivos de los sistemas, mejorando al tiempo el rendimiento.

Optica de las fibras

Aunque hay otros parámetros importantes, sólo consideraremos dos: la anchura de banda que fija la velocidad de transmisión de los datos, y el coeficiente de absorción del cual depende la máxima distancia de transmisión.

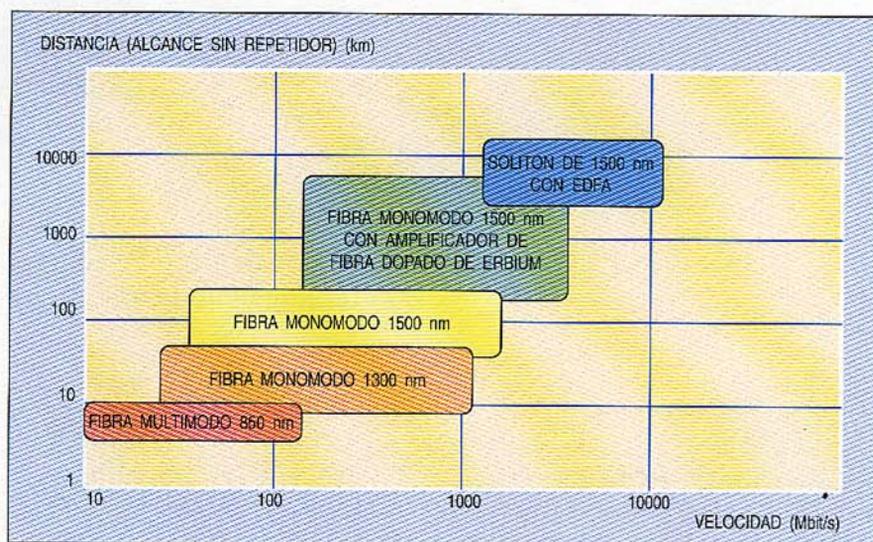


Figura 1 - Capacidad de transmisión de la fibra óptica.

Anchura de banda y velocidad de transmisión

Al principio, las fibras ópticas eran simplemente guíaondas, con un núcleo cilíndrico en el cual la luz se podía propagar, rodeado por una envoltura con un índice óptico muy bajo, que evita la fuga de luz y por tanto la guía por el núcleo. Estas sencillas fibras de *índice de escalón* eran del tipo multimodo con diámetros nucleares de una pocas decenas de μm . Las fibras de segunda generación, aún del tipo multimodo, tenían una estructura más compleja de *índice gradual*. El índice óptico variaba de acuerdo al radio del núcleo de la fibra, decreciendo desde el centro del núcleo a la periferia. Para trayectos ópticos trenzados, que cubren una gran distancia, la velocidad de propagación en una fibra de índice gradual era más alta, compensando de esta forma los diferentes tiempos de propagación. Así la anchura de banda se incrementó de 50 MHz/Km a 1 GHz/Km. Hoy, la mayoría de las fibras ópticas que se utilizan son del tipo monomodo, con diámetros del núcleo menores de 10 μm . Las anchuras de banda sobrepasan ampliamente los 10 GHz/Km.

Coefficiente de absorción y distancia de transmisión

La distancia de transmisión crece en proporción inversa al coeficiente de absorción de la luz propagada. Este coeficiente está afectado por la cantidad de impurezas residuales, principalmente metal ó iones OH, que contiene el óxido de silicio. Los avances tecnológicos han hecho lo posible para eliminar casi totalmente esta absorción adicional, que en ciertas ventanas del espectro alcanza 0,85, 1,3 y 1,55 μm . Por ello, el factor de atenuación depende únicamente de la ley de difusión de Rayleigh. El factor de atenuación es proporcional a $1/\lambda^4$, siendo λ la longitud de onda de transmisión. La utilización de una longitud de onda de 0,85 μm , después de 1,3 μm y finalmente de 1,55 μm ha llevado a una considerable reducción en la atenuación de la señal transmitida por fibra. En consecuencia, desde un coeficiente inicial

	FIBRA OPTICA (1ª PRUEBA DE LABORATORIO)	DIODO LASER (1ª PRUEBA DE LABORATORIO)	SISTEMA (1ª COMERCIAL)
1970	ATENUACION 20 dB/km A 0,85 μm	DIODO LASER 0,85 μm BASADO EN AsGa TEMPERATURA AMBIENTE	
1976	ATENUACION 0,47 dB/km A 1,3 μm	LASER InP 1,3 μm MULTIMODO BASADO EN InP	ENLACE DE EMPRESAS ENTRE CENTRALES 7 km 34/35 Mbit/s 0,85 μm
1979	ATENUACION 0,2 dB/km A 1,55 μm		
1981/82		LASER 1,5 μm MONOMODO BASADO EN InP	
1983			VIDEOCOM. DE BIARRITZ 0,85 μm
1986	ATENUACION 0,154 dB/km A 1,55 μm		SUBMARINO MARSELLA-CORCEGA 8 REPETIDORES 400 km 280 Mbit/s 1,3 μm ENLACE TERRESTRE 1,6/1,7 Gbit/s 8/10 REPETIDORES 1,3 μm
1988		LASER 1,55 μm DE POZO CUANTICO	TAT 8 280 Mbit/s ESPACIO REPETIDORES 70 km 1,3 μm
1990			SUBMARINO ALMERIA-MELILLA 200 km 140 Mbit/s 1,55 μm
1991			TAT 9 560 Mbit/s ESPACIO REPETIDORES 130 km 1,55 μm

Tabla 1 - Evolución en el pasado.

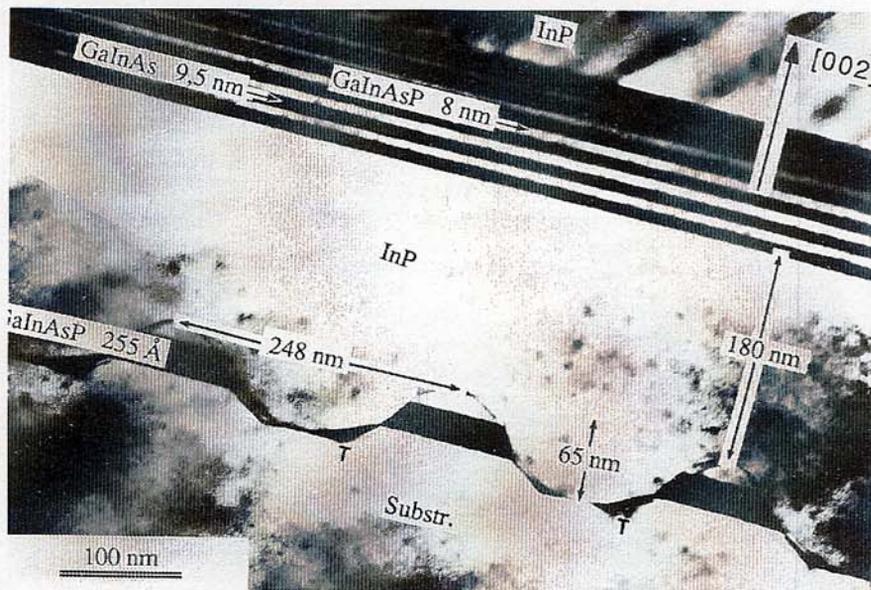
de absorción de 20 dB/Km en el año 1970 se pasó a 5 dB/Km (λ aproximada de 1,85 μm) y más tarde a 0,5 dB/Km (λ aproximada de 1,3 μm). Actualmente, se están alcanzando en el laboratorio valores equivalentes al límite teórico, 0,16 dB/Km para una λ aproximada de 1,55 μm , con una cifra comparable de 0,18 dB/Km para producción industrial (Tabla 1).

En el artículo *Diseño y fabricación de componentes pasivos de optoelectrónica*, se presentan resultados y detalles de los métodos de fabricación de estas fibras ópticas y de los componentes pasivos asociados.

Componentes optoelectrónicos

Para obtener la mayor ventaja posible de las propiedades de las fibras ópticas ha sido necesario diseñar y fabricar una gama apropiada de componentes, con referencia particular a los componentes optoelectrónicos de terminación.

Durante mucho tiempo, estos componentes se utilizaron como simples transductores electroópticos, y aún hoy es frecuente. En el extremo de transmisión, una señal eléctrica codificada (generalmente en formato digital) debe convertirse en una señal óptica equivalente, que después se aplica a la fibra óptica. Se utiliza para este propósito un LED ó un diodo láser, según el rendimiento requerido. En el otro extremo de la fibra óptica, un fotodiodo ó APD suministra la función de conversión inversa óptico-eléctrica. Las actividades de investigación en componentes optoelectrónicos, y en particular las estructuras de diodos láser, se describen en el artículo *Componentes optoelectrónicos en desarrollo en Alcatel*. Se requirió una considerable exploración tecnológica, reflejada en un rápido progreso, para alcanzar esta etapa de calidad técnica y rendimiento. Se necesitaron diferentes estructuras complejas, incluyendo el uso de tecnologías específicas como el crecimiento epitaxial, para avanzar



Sección transversal longitudinal de parte de un diodo láser resonador distribuido de $1,55 \mu\text{m}$, mostrando la estructura de pozo cuántico. Esta fotografía se tomó con un microscopio electrónico. En la parte inferior se puede ver el filtro de difracción de 248 nm . En la superior son claramente visibles las capas de 8 y $9,5 \text{ nm}$ correspondientes a los pozos cuánticos.

desde el simple LED al considerablemente más eficiente diodo láser.

El primer diodo láser capaz de una operación continua a $0,85 \mu\text{m}$ a temperatura ambiente, apareció en 1970. Se utilizaron grupos de materiales GaAlAs/AsGa derivados del AsGa (gallium arsenide) para los emisores y silicio para los detectores. El primer láser que emitió a $1,3 \mu\text{m}$ se fabricó en 1976. Para la emisión y detección a $1,3 \mu\text{m}$ ó $1,55 \mu\text{m}$, se utilizó una nueva familia de materiales cuaternarios GaInAsP/InP, derivados del InP (indium phosphide) y muy poco conocidos. Esto marcó el nacimiento de una familia tecnológica totalmente nueva (Tabla 1).

Al mismo tiempo, se mejoró el rendimiento del diodo láser disminuyendo la corriente de operación desde 100 mA hasta 20 ó 10 mA , aumentando la potencia óptica emitida, incrementando la anchura de banda desde varios MHz hasta por encima de los 10 GHz actuales, y alcanzando un nivel de fiabilidad compatible con los objetivos de duración de 25 años de servicio de los enlaces submarinos. Se ha alcanzado un espectro óptico

monomodo integrando un filtro reticular de difracción de longitud de onda selectiva. Se ha reducido un mediocre valor de pureza espectral de unas pocas decenas de MHz a menos de 100 kHz para los mejores resultados hasta hoy publicados.

Están actualmente en fase de industrialización estructuras de rendimiento muy alto y extremadamente complejas. Son los láseres de "pozo cuántico", que están compuestos de diferentes capas de semiconductores, cada una con un espesor de unas pocas capas de átomo único. Estas estructuras sólo se pueden producir utilizando las actuales tecnologías de rendimiento extremadamente alto.

Los diferentes componentes optoelectrónicos disponibles en la actualidad a nivel industrial ó en fase de desarrollo, se describen en el artículo *Desarrollo y fabricación de componentes optoelectrónicos activos*.

En paralelo con las actividades en el área de los componentes emisores y receptores, hay que poner especial atención en el último grito de la revolución tecnológica - el amplificador

óptico de fibra dopada con erbio. El impacto de este dispositivo será sustancial, tanto para los sistemas de transmisión punto-a-punto como para las redes de abonado. En un repetidor óptico convencional, la señal óptica recibida debe ser primero convertida a formato eléctrico para su amplificación, y después reconvertida a formato óptico para su transmisión hacia adelante. Por el contrario, en un amplificador óptico, la señal es amplificada directamente, sin conversión. Esto tiene una gran importancia, y se describe en el artículo *Progreso en amplificación óptica*.

Sistemas

En los programas experimentales de sistemas se emplean componentes nuevos y mejorados cuando están disponibles. La evolución en los últimos 20 años ha sido extremadamente rápida, como se ve en la Tabla 1. Durante la primera mitad de los 70 , se instalaron los primeros enlaces entre centrales, en distancias del orden de los siete kilómetros, con velocidades de 34 ó 45 Mbit/s . Se utilizó para la transmisión una fibra multimodo con una longitud de onda de $0,85 \mu\text{m}$, con un láser AsGa/GaAlAs en el extremo emisor y un APD de silicio en el extremo receptor.

El comienzo de los 80 vió los primeros experimentos de distribución de TV por cable. Uno de los primeros proyectos experimentales en Francia fue el sistema de cable óptico para la ciudad de Biarritz, que servía a 1000 abonados. Este enlace de $0,85 \mu\text{m}$, que utilizaba diodos láser y fibra óptica multimodo, proporcionó una experiencia válida para el futuro.

En el área de la transmisión punto-a-punto, la misma década vió el progresivo cambio de las fibras multimodo por las monomodo, un cambio de la longitud de onda de $0,85 \mu\text{m}$ a $1,3 \mu\text{m}$, y más tarde $1,55 \mu\text{m}$, para aplicaciones de larga distancia y de alta velocidad de transmisión. Esta aplicación está claramente ilustrada

en el sector de transmisión submarina. El enlace Marsella-Córcega, con una distancia aproximada de 400 Km, se tendió en 1986 con una velocidad de transmisión nominal de 280 Mbit/s por fibra. El enlace incorporaba ocho repetidores y adelantó la entrada en servicio del primer enlace transatlántico (TAT 8) en dos años. Trabajando a 1,3 μm , el enlace TAT 8 tenía una distancia entre repetidores de hasta 70 Km, lo que representó un gran paso adelante respecto a enlaces similares anteriores que utilizaban el cable coaxial de cobre (TAT 6), en los que la distancia entre repetidores no iba más allá de los 10 Km.

El enlace TAT 9, que trabaja en una longitud de onda de transmisión de 1,55 μm , entró en servicio en 1991. Los láseres multimodo fueron sustituidos por monomodo equivalentes y los fotodiodos PIN por APD. La máxima distancia posible entre repetidores llegó a los 130 Km, y ya era evidente que las generaciones futuras usarían la tecnología óptica de amplificación.

Lo que no muestra en la Tabla 1, aunque es altamente significativa la necesidad de encontrar soluciones de este tipo, es el extremadamente corto espacio de tiempo - aproximadamente dos años - entre las pruebas iniciales de laboratorio y la utilización real.

Sistemas de transmisión óptica

La tecnología óptica está, ó lo estará pronto, en uso a escala industrial en la mayoría de los sistemas de transmisión punto-a-punto.

Se pueden distinguir tres áreas principales de aplicación industrial de la tecnología óptica. Son la transmisión submarina, la terrestre y las redes de abonado. En este número se tratan en detalle las tres áreas, por lo que aquí se da simplemente una serie de aspectos específicos de cada una de ellas.

Sistemas de transmisión óptica submarina

La transmisión óptica ha alcanzado gran éxito en el contexto de los sistemas submarinos, al punto de alcanzar

una posición de casi de monopolio. Dos sectores están involucrados: los enlaces de transmisión a larga y muy larga distancia, que incorporan una serie de repetidores ópticos submarinos, y los enlaces de distancias mas cortas que no usan dichos repetidores.

La velocidad de evolución en el sector de la transmisión a larga distancia es aún considerable. Si se toman como ejemplo los enlaces transatlánticos, se ha pasado de 8000 circuitos telefónicos conectados ópticamente en 1988 (TAT 8) a 60000 en 1991 (TAT 9 y PTAT 1). La siguiente generación, que incluye el TAT 12 y el TAT 13 y planificada para 1995/96, verá la entrada en servicio de sistemas que incorporan amplificadores ópticos con una capacidad 2 x 5 Gbit/s. Estos enlaces transportarán un total de 370000 circuitos.

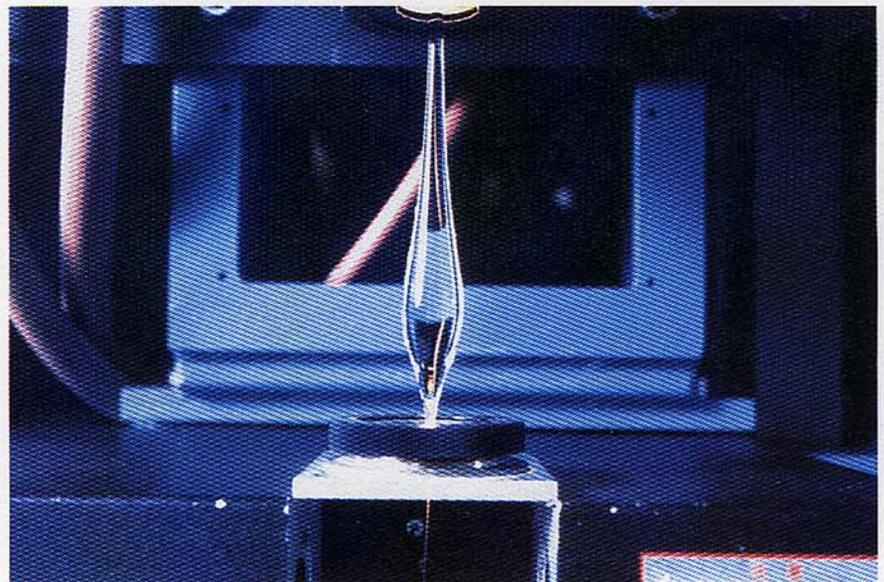
No menos significativa ha sido la evolución de los sistemas sin repetidores, que trabajan a 140 Mbit/s, 560 Mbit/s y 2,5 Gbit/s. Los sistemas se utilizan para enlaces continente/isla ó isla/isla y también para configuraciones de enlaces costeros. Son técnicamente posibles distancias que sobrepasen los 200 Km, con un máximo de 300 Km. El artículo *Sistemas de transmisión submarina optoelectrónica* está dedicado a este tema.

Sistemas de transmisión óptica terrestre

También aquí la tecnología de fibra óptica ha ocupado el liderazgo del cable coaxial en los sistemas de transmisión punto-a-punto. Durante los últimos años, los sistemas ópticos pleisícronos han hecho lo posible para superar los problemas de velocidad de transmisión, distancia y coste. Los enlaces punto-a-punto de hasta 100 Km, que trabajan con velocidades entre 2 Mbit/s y 2,4 Gbit/s se han probado técnicamente y ahora se utilizan a escala industrial.

No obstante, el mas reciente e importante suceso ha sido la introducción del nuevo estándar internacional SONET (synchronous optical network) en EE.UU. y de su equivalente europeo, el estándar JDS (jerarquía digital síncrona).

A la vista de la variedad y complejidad de las diferentes redes, tanto en gestión como en conexión, la necesidad ha llevado al establecimiento de estándares y a la definición de procedimientos de interfaz y de centrales. La utilización de los sistemas ópticos síncronos de alto rendimiento ha introducido el necesario grado de flexibilidad. El nuevo estándar JDS proporciona la gestión uniforme de esta amplia variedad de redes, interconectadas por medio de enlaces de fibra



Formación del "goteo" durante la producción de la fibra óptica.

óptica, con velocidades de transmisión altas, que pasan de 34 ó 45 Mbit/s. Una nueva jerarquía de velocidades de transmisión está ahora en uso:

155 Mbit/s, 622 Mbit/s y 2488 Mbit/s (multiplexores síncronos por división en el tiempo, STM 1, 4 y 16). Los procedimientos los determina la gestión de interconexión en los nodos de central, donde la velocidad de transmisión se concentra ó se divide (multiplexores de inserción/extracción).

Este tema se trata con detalle en el artículo *Sistemas de transmisión terrestre optoelectrónica*.

Redes de abonado de fibra óptica

Muchas redes ya están utilizando la tecnología de fibra óptica. La creación de una red multiservicio, diseñada para la distribución de un gran número de canales de TV (CATV) y para otros servicios (teléfono, fax, etc..) a los abonados ha estado en estudio durante muchos años. La cuestión es determinar si el enlace de fibra óptica debe llevarse hasta el punto de distribución (FTTC) ó hasta el abonado (FTTH). La respuesta es más económica que tecnológica. Hoy parece cierto que el objetivo FTTH está bastante lejano, pero se requerirán infraestructuras FTTC para suministrar una futura ampliación a una configuración FTTH. La solución propuesta por Alcatel se describe en el artículo *Optoelectrónica en el bucle de abonado*.

Se debe de resaltar el interés del *amplificador óptico* en este área. La parte de TV por cable del enlace trabaja en modo analógico, lo cual significa que debe utilizarse un emisor láser de muy alto rendimiento (en función de su linealidad) con un nivel de ruido muy bajo. El uso de los amplificadores ópticos hace posible la adopción de una configuración en estrella para la conexión de los diferentes puntos de división. El coste del emisor láser está compartido por un gran número de abonados (varios miles), lo que asegura la viabilidad económica de esta solución. En la práctica, solamente

están disponibles a escala industrial amplificadores ópticos de 1,55 μm , de forma que la elección de la longitud de onda de transmisión es inflexible.

Debido a la propiedades de difusión cromática de la fibra, el emisor láser debe tener características de distribución espectral muy bajas (chirp muy pequeño). Alcatel dispone de componentes de este tipo.

Impacto de la tecnologías ópticas en las futuras generaciones de sistemas

Las tecnologías ópticas no sólo afectarán al área de transmisión punto-a-punto de alto rendimiento, sino que también serán adoptadas por otras aplicaciones. Este impacto, de distinta importancia, dependerá de la futura evolución de los componentes optoelectrónicos y ópticos. Se han considerado tres formas de evolución que, en la práctica, son obviamente interdependientes. Estas son:

- mejora del rendimiento en los componentes actuales
- diseño y fabricación de componentes de muy bajo coste e introducción de las metodologías ó tecnologías adaptadas adecuadas
- creación de nuevas funciones ópticas y utilización de las propiedades ópticas intrínsecas.

Mejora del rendimiento en los componentes actuales

Amplificación óptica: ya hemos resaltado la importancia de esta técnica, pero en este punto hay que volver a dos aspectos de la amplificación óptica.

Los actuales amplificadores de fibra dopada con erbio son extremadamente eficientes, y han alcanzado prácticamente su límite de rendimiento. Estos amplificadores usan bombeo de diodo láser, trabajando a 1,48 ó 0,98 μm . Las aplicaciones en las áreas de transmisión punto-a-punto y de redes son numerosas, y relativamente

fáciles de identificar. El amplificador trabaja aproximadamente a 1,55 μm . Se espera igualmente que amplificadores de fibra de alto rendimiento, con un nivel de ruido más bajo y que trabajen aproximadamente a 1,3 μm , estén disponibles en un próximo futuro, con la introducción de materiales distintos al óxido de silicio y con otros agentes de dopado. Estos amplificadores suministrarían soluciones complementarias de considerable interés, en particular para sistemas multipunto que no necesiten trabajar a 1,55 μm , donde el objetivo es compartir la potencia óptica entre varios usuarios.

Los amplificadores de semiconductores con características de ruido menos favorables son, no obstante, todavía de gran interés. Su simplicidad y bajo consumo son ventajas importantes, en particular en aplicaciones multipunto.

Componentes optoelectrónicos en la unidad terminal: El incremento en la anchura de banda del diodo láser y del fotodetector es la mejora que ha tenido el mayor impacto en los sistemas de transmisión.

En los sistemas terrestres punto-a-punto, son ya posibles velocidades de transmisión de línea de 10 Gbit/s, mientras que en pruebas de laboratorio se están alcanzando sistemas de 40 Gbit/s. Actualmente, el potencial tecnológico ha sobrepasado las necesidades del mercado.

Además, el acceso a anchuras de banda altas hace posible mirar muy seriamente hacia aplicaciones con estos componentes en el sector SHF (ver artículo *Aplicación de la optoelectrónica en los sistemas de microondas*). Aparte de su simplicidad, la solución óptica ofrece las ventajas reconocidas de insensibilidad de la fibra óptica al EMI, bajo peso y dimensiones compactas.

No obstante, está claro que estas soluciones llegarán solamente a ser viables a escala industrial, en particular para las comunicaciones de radio

móvil, cuando se disponga de componentes optoelectrónicos de muy bajo coste.

Impacto de las reducciones de costes

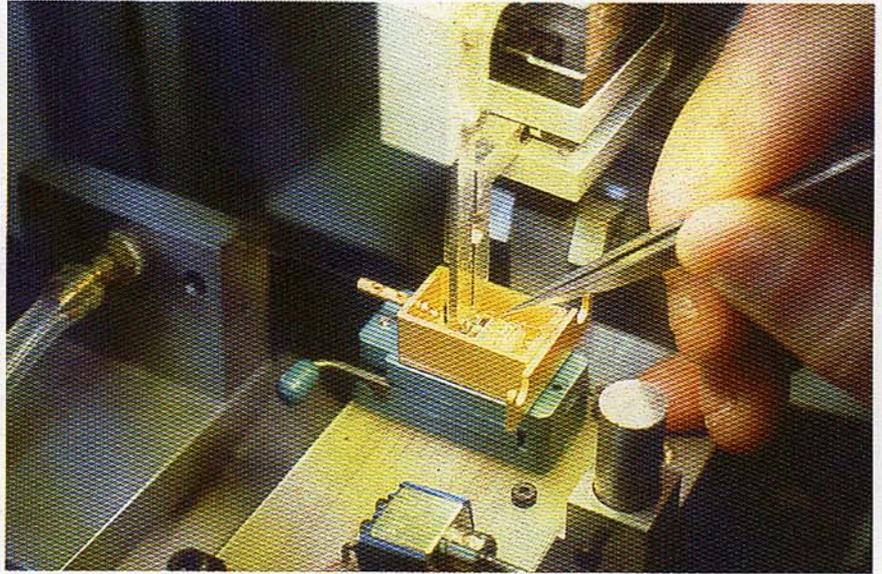
Sólo las longitudes de onda entre 1,3 μm y 1,55 μm se utilizan en la transmisión por fibra óptica. Los componentes desarrollados para este propósito se diseñan casi exclusivamente en el sector de las telecomunicaciones y, en particular, en los sistemas de transmisión. Las aplicaciones son de naturaleza profesional, escasas y los precios, consecuentemente, permanecen relativamente altos.

Como en el caso de los componentes electrónicos, estos costes se reducirán drásticamente en la transición a la producción industrial. Este será el caso si el enlace de fibra óptica se extiende hasta el abonado. La utilización de estos componentes en otras aplicaciones (en particular en ordenadores) también reducirá los costes.

Aparte de este problema general de fabricación, es interesante considerar un serie de elementos específicos relativos a los sistemas optoelectrónicos.

Las tecnologías optoelectrónicas, y aquellas que se refieren a la fabricación en particular de componentes basados en InP, están aún en la infancia. Esto se muestra por las muy considerables diferencias de una característica tan fundamental como la corriente de umbral de un diodo láser, que están reflejadas en la literatura y en las publicaciones comerciales. Los componentes electrónicos de silicio también están dando sus primeros pasos, y en el estado del arte actual la posible mejora de los componentes optoelectrónicos es considerable.

Los montajes ópticos son complejos. Por ejemplo, una unidad de terminación óptica de láser requiere el alineamiento mecánico de un diodo láser y de una fibra óptica dentro de una tolerancia de 0,1 μm . Alguna flexibilidad en las tolerancias aceptables especificadas para determinadas aplicaciones tendría un marcado impacto



Montaje y alineamiento de una fibra óptica frente a un chip de láser.

en los costes de producción. Estos aspectos se consideran en el artículo *Desarrollo y fabricación de componentes optoelectrónicos activos*.

La fibra óptica es un componente clave. La utilización de fibras monomodo se está generalizando, tanto por motivos técnicos como económicos. De nuevo aquí, los problemas de "dimensión" tienen una importancia esencial. El núcleo de una fibra monomodo tiene un diámetro menor de 10 μm . Los problemas asociados son considerables, no sólo es el desarrollo de los componentes específicos requeridos, con referencia particular a los conectores, sino que son igualmente fundamentales nuevas herramientas y métodos, así como también una planificación apropiada de los métodos adecuados de las aplicaciones. Todo esto representa un problema importante en la tecnología óptica. Este aspecto está recogido en el artículo *Diseño y fabricación de componentes pasivos de optoelectrónica*.

Impacto de las propiedades ópticas "específicas" y de las nuevas funciones ópticas

Hasta hace muy poco, las tecnologías ópticas sólo hacían uso de las propiedades "pasivas" de la fibra óptica,

como la baja atenuación y la gran anchura de banda. A pesar de que su complejidad es considerable y su rendimiento alto, los componentes terminales optoelectrónicos fueron, ó aún sólo son empleados como simples transductores electroópticos.

Con el progreso tecnológico, ahora está siendo posible - e importante - el empleo de ciertas propiedades ópticas específicas, con la llegada de nuevos tipos de componentes, en un contexto de sistemas. El ejemplo del amplificador óptico ya ha sido mencionado.

El tratamiento de los parámetros ópticos característicos tales como la longitud de onda, amplitud, fase, polarización, etc., puede proporcionar acceso a nuevas funciones de interés desde el punto de vista de sistemas. Los ejemplos siguientes se refieren a los dos primeros parámetros antes mencionados.

Amplitud de señal óptica: la amplificación óptica es el mejor ejemplo del tratamiento del parámetro de amplitud óptica. No obstante, existen otros ejemplos. Por ejemplo en un diodo láser, la corriente de inyección se modula de acuerdo a la amplitud óptica modulada. Para preservar ciertas cualidades ópticas, negativamente



Epitaxia por haces moleculares: equipo diseñado y desarrollado por Alcatel Alsthom Recherche, empleado en la actualidad por Alcatel CIT para la producción de diodos láser de pozo cuántico.

afectadas por una modulación óptica rápida, la parte del emisor de luz se puede separar de la etapa de modulación de amplitud. Esto se alcanza con un componente modulador-láser monolítico. Este tipo de componente se utilizará en los sistemas de transmisión de alta velocidad del futuro.

Longitud de onda: Los emisores de láser, cuya longitud de onda puede ser sintonizada eléctricamente en una banda de varias decenas de nm, han empezado a ser producidos en laboratorio. En términos eléctricos, un margen de sintonía de 30 nm, centrado en una longitud de onda de 1,5 μm , corresponde a una ventana del espectro de unos 4000 GHz, ó 13 veces la anchura total del espectro electromagnético desde DC a ondas milimétricas. Un gran número de canales paralelos se pueden asociar por multiplexación de longitud de onda.

Bajo estas condiciones, la longitud de onda se puede considerar como una dimensión "suplementaria" actual. Así, el dominio de la longitud de onda se añade a los dominios de espacio y tiempo. Para utilizar esta

dimensión adicional se requerirán convertidores de longitud de onda, multiplexores, filtros ópticos sintonizables e incluso puertas ópticas. Todos estos componentes están en desarrollo en laboratorio.

Para la transmisión punto-a-punto, se pueden considerar ahora numerosas aplicaciones adicionales que usen las propiedades ópticas: aumento de las distancias y velocidades de transmisión con amplificación óptica, incremento de las velocidades asociadas con el uso de moduladores-láser monolíticos, multiplexación de la longitud de onda, transmisión a muy alta velocidad/distancia utilizando soluciones del tipo solitón, etc...

Los solitones corresponden a la solución matemática de las ecuaciones de transporte de la señal de fibra óptica. Esta solución ha estado en estudio en el laboratorio durante muchos años, pero ahora existe un gran interés a nivel industrial. La posibilidad práctica de obtener emisores adecuados y de adaptar la solución a sistemas de amplificador óptico, combinada con la necesidad de una transmisión a alta velocidad/gran distancia,

hace que esta solución sea particularmente atractiva.

Aparte de las actividades de transmisión para las cuales la importancia de las tecnologías ópticas está ya demostrada, y sólo puede ser incrementada, se debe considerar el impacto de estas mismas tecnologías en los sistemas multipunto, así como en las funciones de transconexión y conmutación. De nuevo aquí, el incremento en las velocidades de transmisión resalta la atracción potencial de las soluciones ópticas. El interés de estas soluciones en aplicaciones de conmutación de sistemas de banda ancha basados en el modo de transmisión asíncrono (MTA), se analiza en el artículo *El futuro de la conmutación fotónica*.

Conclusiones

El impacto de las tecnologías ópticas de 1,3 y 1,55 μm es y continuará siendo considerable en las áreas de la transmisión punto-a-punto, y en los sistemas submarinos y terrestres. Estas tecnologías representan los ele-

mentos claves para acceder a las futuras aplicaciones de alta velocidad y se están también desarrollando actualmente para otras aplicaciones, en particular en el campo del proceso de información. En unos pocos años, estas tecnologías se volcarán sobre el sector profesional de transmisión en transmisión SHF, en comunicaciones de radio móvil y en aplicaciones espaciales, penetrando también en el mercado de consumo de masas, cuando los enlaces de fibra óptica lleguen a los consumidores. El desafío de los próximos años será la integración de estas tecnologías en los sistemas multipunto y en las funciones de transconexión y de conmutación.

Estos objetivos están condicionados - aunque sólo es cuestión de tiempo - por el desarrollo de nuevas tecnologías y componentes, y por la disponibilidad de circuitos integrados ópticos y optoelectrónicos híbridos y monolíticos que proporcionen los niveles requeridos de rendimiento y a un coste razonable.

Jean-Claude Carballes nació en París en 1942. Se doctoró en 1966 en la Universidad de Caen. Desde entonces ha participado en el estudio de componentes optoelectrónicos. El Dr. Carballes ingresó en 1983 en el laboratorio de Marcoussis, que era entonces el centro de investigación de CGE. En la actualidad es director de la división de componentes de optoelectrónica de Alcatel Alsthom Recherche.

Componentes optoelectrónicos en preparación dentro de Alcatel

O. Hildebrand
M. Erman

Alcatel SEL Research Center, Stuttgart, Alemania
Alcatel Alsihom Recherche, Marcoussis, Francia

A pesar del enorme progreso, sólo estamos al comienzo de la evolución de las tecnologías de comunicaciones ópticas. Aún así, la investigación y desarrollo actuales permiten el poder pensar ya en sistemas de comunicaciones con unas capacidades y prestaciones mucho mejores.

Introducción

Cuando en 1962 se descubrieron los láseres de semiconductores de los grupos III-V, parecía bastante evidente a todos los expertos mundiales que estos láseres nunca operarían a temperatura ambiente. Afortunadamente estaban equivocados, y hoy en día, los componentes optoelectrónicos (O/E) son los reales elementos claves de los sistemas de comunicaciones ópticas: los láseres convierten las tramas continuas de datos eléctricos al dominio óptico, y los detectores convierten las señales ópticas de nuevo en señales eléctricas. Estas funciones básicas han establecido los fundamentos para la evolución de toda clase de sistemas ópticos de transmisión y distribución basados en fibra óptica, y el coste y el comportamiento global del sistema dependen en gran medida de los componentes O/E.

Aunque los láseres y los fotodetectores se fabrican desde hace años, la evolución de los componentes O/E no ha hecho sino empezar¹. Ello no solo se debe a la demanda cada vez mayor de capacidad de transmisión y longitud del vano sin repetidores, sino que también se debe a arquitecturas de distribución cada vez más sofisticadas, las cuales van más allá de los enlaces punto a punto y pueden desembocar en el futuro en sistemas de *transconmutación* totalmente ópticos. No sola-

mente existe una continua necesidad de mejorar las prestaciones, sino que se requieren nuevas funciones que van más lejos de la función básica de la conversión optoelectrónica.

La prestación del sistema está íntimamente relacionada con el progreso tecnológico de los componentes O/E. El compuesto de semiconductores cuaternarios InGaAsP/InP es el material básico, perfectamente adecuado para las ventanas de transmisión de 1300 nm ó de 1550 nm de la fibra óptica; adicionalmente, para casos especiales, se utiliza el nuevo compuesto de semiconductores InAlGaAs/InP. Alcatel se ha especializado, al más alto nivel mundial, en las nuevas tecnologías superavanzadas de crecimiento de cristal tales como GSMBE (crecimiento epitaxial mediante haz molecular con fuente de gas) y LP-MOVPE (crecimiento epitaxial en fase de vapor a baja presión), y lo mismo sucede con la litografía de las submicras. La precisión que se requiere para la tecnología básica es extremadamente alta: por ejemplo solamente se acepta un átomo "malo" entre 100 millones de átomos del cristal semiconductor. Un reto adicional lo constituye la tecnología de pozo cuántico (QW): mediante un control preciso del crecimiento del cristal dentro de una sola capa a nivel atómico, se fuerza a los electrones a cambiar su comportamiento optoelectrónico, a voluntad del diseñador del dispositivo.

En Alcatel, el programa de investigación y desarrollo avanzado en componentes optoelectrónicos se deriva de los requerimientos impuestos por las líneas de producto, con un calendario muy variado que va desde las necesidades de los productos actuales hasta las actividades de investigación "a largo plazo". En la actualidad, el programa

de investigación incluye la fabricación de componentes avanzados para adecuarse a tiempo con los requerimientos tecnológicos de la línea de fabricación. Para las necesidades del mañana los investigadores preparan componentes O/E avanzados, y los entregan como modelos de laboratorio a los ingenieros de sistemas para que desarrollen las nuevas generaciones de sistemas. Además, conjuntamente con los centros institucionales mundiales líderes, los investigadores de componentes O/E tratan de perfilar el después del mañana, preservando de ésta forma el futuro de Alcatel: no habrá ningún sistema de fibras ópticas sin componentes O/E, y los sistemas futuros se basarán absolutamente en los componentes O/E que se encuentran en fase de preparación en la actualidad.

Dispositivos de transmisión

En su tiempo, los indios utilizaban las comunicaciones ópticas: su fuente de transmisión era el humo de un fuego, que codificaban digitalmente. Desde entonces el fuego ha sido reemplazado por láseres y se utilizan fibras como medio de transmisión. Los dispositivos

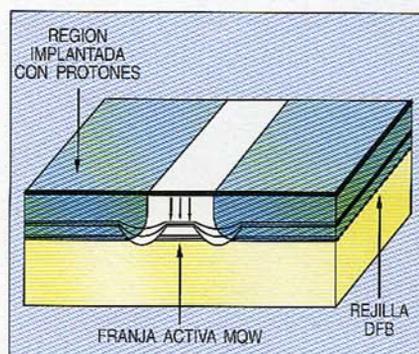


Figura 1 - Sección transversal de un láser MQW-DFB-DCPBH.

de transmisión de hoy en día permiten la transmisión de grandes cantidades de datos a gran velocidad y a grandes distancias, y están evolucionando aún más, al objeto de obtener mejores prestaciones, usando los nuevos esquemas de codificación y los convertidores O/E multifuncionales.

Láseres para sistemas IM/DD

En Alcatel, desde hace varios años, se están fabricando láseres para sistemas IM/DD (detección directa por modulación de intensidad) de hasta 2,5 Gbit/s. Sin embargo, los requerimientos crecen constantemente, no solamente en función de la fiabilidad (principalmente en aplicaciones submarinas) sino también en términos de prestaciones (sobre todo en cuanto a velocidad de transmisión), y - por último, pero no menos importante - de costes.

Láser DCPBH

El láser de heteroestructura enterrada de doble canal (DCPBH) (Figura 1) se utiliza actualmente para velocidades de transmisión de hasta 2,4 Gbit/s. La estructura vertical de éste láser se

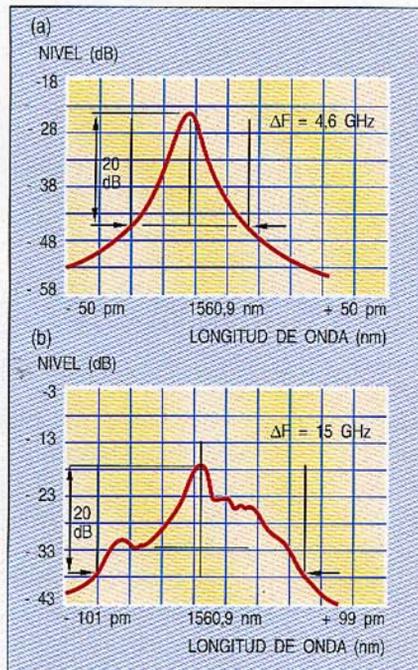


Figura 2 - Chirp correspondiente a un láser DCPBH a 2 Gbit/s. (a) sin modulación; (b) con 90% de modulación.

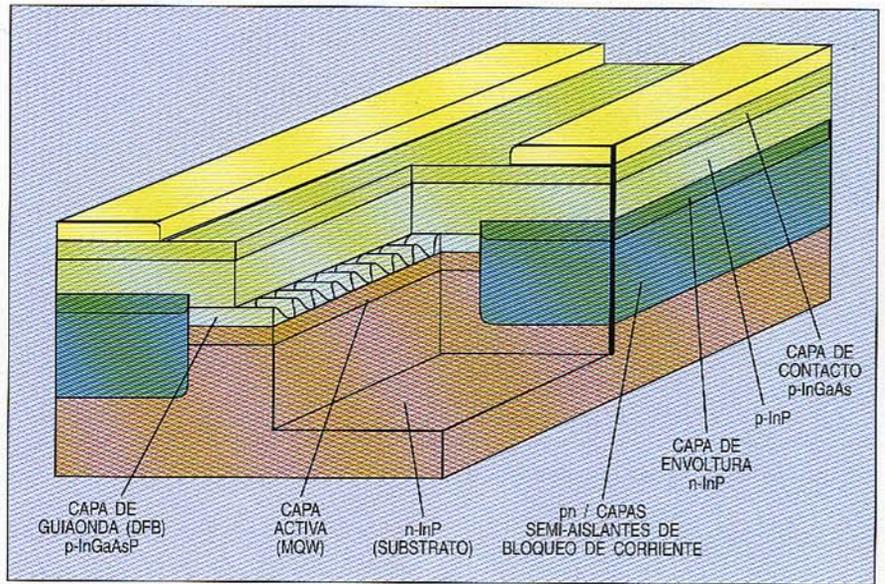


Figura 3 - Sección transversal de un láser MQW-DFB-SIBH.

crece mediante GSMBE, y las capas pnpn de bloqueo de corriente crecimiento epitaxial en fase líquida (LPE). El aislamiento eléctrico se obtiene mediante bombardeo adicional de protones. Este láser exhibe unas prestaciones bastante notables: corriente umbral de solo 20 mA, potencia de salida de hasta 50 mW y efecto chirping a -20 dB de solo 0,15 nm (bajo un índice de modulación del 90% sobre 2 Gbit/s) (Figura 2). En las aplicaciones prácticas no solo se necesitan altas prestaciones sino también alta fiabilidad y rendimiento. El láser DCPBH cumple plenamente ambos requerimientos. Después de 72 horas a 80°C con una corriente de excitación de 150 mA, la corriente umbral sufre una variación comprendida entre 0 y 4 mA, mientras que las pruebas de envejecimiento, realizadas a 10 mW/50°C durante 2000 horas, muestran un cambio prácticamente despreciable en las características. El rendimiento final (promediado sobre 8 obleas) se eleva al 57%. De hecho, este dispositivo ya ha alcanzado su etapa de madurez y está siendo transferido actualmente a producción. Aunque el dispositivo fue diseñado especialmente para 2,4 Gbit/s, de hecho muestra una anchura de banda de operación mucho más grande: se han medido más de 8 GHz, lo que hace de estos dispositivos unos candidatos adecuados para siste-

mas de velocidades mas altas. Ya hace varios años se demostró la capacidad de operar a más de 8 Gbit/s.

Láser SIBH

El láser de heteroestructura enterrada semiaislado (SIBH) mostrado en la Figura 3 necesita una técnica epitaxial



Figura 4 - Modulación del láser MQW-DFB-SIBH a 10 Gbit/s.

de estado del arte, LP-MOVPE, que es apropiada en coste para la tecnología de obleas de láseres de 2". El láser SIBH está diseñado para una operación de alta velocidad (10 Gbit/s), sin comprometer su aplicación en velocidades de trasmisión más lentas. En lugar de usar uniones pn para bloquear corriente o bombardeos de protones, se utiliza crecimiento (semi-) aislado InP mediante LP-MOVPE. Esta tecnología permite obtener capacidades de chips muy bajas, inferiores a los 2 pF,

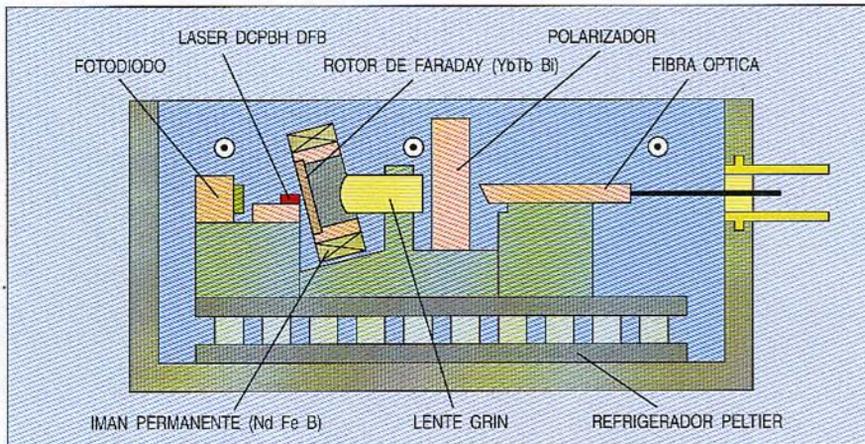


Figura 5 - Cabeza óptica con aislador para transmisión analógica.

junto a una reducción eficiente de las corrientes de fuga, aspecto clave en la operación de alta potencia.

La capa activa del láser SIBH puede ser convencional FP, de realimentación distribuida (DFB), del tipo MQW-DFB o incluso, si se requiere la mejor prestación a alta velocidad, una capa estirada MQW-DFB. Estos módulos tecnológicos permiten construir componentes hechos a la medida para cada sistema a partir del mismo núcleo tecnológico, LP-MOVE.

Los láseres de capa estirada MQW-DFB-SIBH operan incluso a 10 Gbit/s (Figura 4), con una tasa de error de bit inferior a 10^{-13} , como ya se ha demostrado en diversas pruebas a nivel de sistema. Solo por los efectos QW hay una mejora en la sensibilidad del sistema superior a 2 dB, en comparación con los láseres convencionales DFB-SIBH. Estos láseres MQW-DFB-SIBH superan en la actualidad a los mejores láseres de 10 Gbit/s disponibles hasta hoy.

Láseres para sistemas de transmisión analógica

Los láseres de semiconductores son inherentemente no lineales, lo que hizo que los ingenieros de sistemas en las primeras etapas de las comunicaciones ópticas abandonasen los "viejos" esquemas de transmisión analógica y utilizasen, en su lugar, la modulación digital. La tecnología láser ha mejorado continuamente desde aquellos tiempos y, como consecuencia, los láseres han llegado a ser los suficientemente linea-

les como para volver a "reinventar" los viejos esquemas -ahora, sin embargo, bajo un prisma óptico. La transmisión óptica de datos analógicos evita (aún) la utilización del caro equipo digital en el lado receptor - los televisores de nuestros abuelos eran ya analógicos -, lo que permite la introducción de tecnologías ópticas a un coste suficientemente bajo hasta el abonado.

Los diseñadores de componentes serían muy felices si esto fuera una tarea sencilla. La especificación del láser es complicada, con conflictos múltiples entre los diferentes parámetros de diseño y las prestaciones requeridas. Características inherentes a los láseres como la no linealidad (generación de armónicos de 2º y 3º orden), el chirp (desplazamiento de la longitud de onda en condiciones de modulación), o el ruido (originado, por ejemplo, por la naturaleza cuántica de la luz láser)

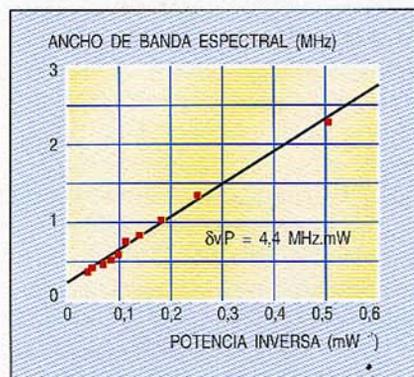


Figura 6 - Ancho espectral de los láseres MQW-DFB respecto a la potencia.

tienen que suprimirse, hacerlas inferiores a niveles extremadamente bajos.

Los investigadores en láseres de Alcatel han reunido toda la tecnología y elementos y herramientas de diseños de láseres disponibles, y han obtenido resultados de estado del arte para láseres MQW-DFB analógicos especialmente diseñados: distorsión de intermodulación muy baja (CSO < - 63 dBc, CTB < - 71 dBc para los canales en el peor caso a un índice de modulación del 5%), chirp muy bajo (solo 40 MHz/mA), y altos niveles de potencia hasta 40 mW. Estos datos demuestran que los láseres analógicos de Alcatel están actualmente mucho más cercanos a las especificaciones requeridas que cualquier otro láser disponible en el mercado.

Al objeto de garantizar las altas prestaciones de los láseres analógicos el encapsulado de los módulos láser tiene que ser como el de la Figura 5. Incorpora un aislador óptico de alto rendimiento (aislamiento de 30 dB) al objeto de impedir cualquier reflexión parásita, y un circuito adaptador de impedancias. Se obtiene un factor de acoplamiento en una fibra monomodo superior al 50% mediante optimización dinámica y posterior fijación a la fibra usando soldadura láser.

Láseres para sistemas de transmisión coherente y multicanal

La división por multiplexación en longitud de onda (WDM) abre una dimensión nueva para expandir la capacidad y flexibilidad de los sistemas. Desde los sistemas WDM con espaciado de canal de varias nm, hasta los sistemas de alta densidad WDM, y finalmente a los distintos esquemas para detección coherente incluyendo modulación FM y de fase, existe actualmente una serie de opciones que permite ajustar un sistema a cada aplicación particular. Estas aplicaciones requieren el desarrollo de láseres monomodo sintonizables en longitud de onda con una anchura espectral estrecha y gran potencia, campo en el que los investigadores de Alcatel han conseguido avances muy significativos. Utilizando la técnica GSMBE, se han conseguido

fabricar láseres DFE de pozos cuánticos y cavidades largas con triple desplazamiento de fase ($-\lambda/20, \lambda/20, -\lambda/20$) con anchuras espectrales tan estrechas como 330 kHz para una potencia óptica de salida de 30 mW (Figura 6). Ello hace que estos láseres sean adecuados para sistemas heterodinos DPSK de modulación directa. Con la misma estructura vertical, pero en una configuración de tres electrodos, se puede añadir la sintonía continua de longitud de onda (0,8 nm), a la vez que preservar la anchura espectral por debajo de 1 MHz (mínimo 240 kHz) en todo el margen espectral.

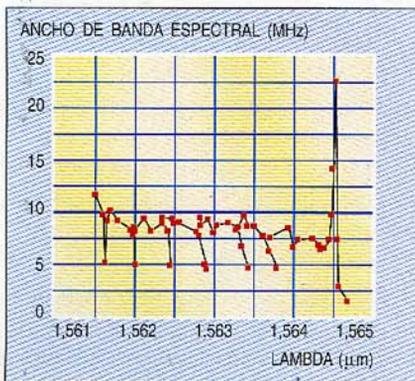


Figura 7 - Sintonía cuasi-continua de un láser DBR de tres secciones pasivas.

Cuando se necesita un margen de sintonía mayor (oscilador local, WDM de alta densidad), el láser DFB multi-sección no es satisfactorio en la mayoría de los casos. El láser DBR pasivo de tres secciones, actualmente en investigación en Alcatel, permite superar esta situación. Consta de tres regiones: región activa (láser), pasiva (control de fase para ajuste fino) y sección DBR (sintonía gruesa). El cambio de longitud de onda tiene lugar ajustando las dos corrientes inyectadas en las secciones pasiva y DBR. El principal inconveniente que se encuentra en este tipo de dispositivos es el ensanchamiento de la línea espectral durante el proceso de sintonía de la longitud de onda. Con un diseño adecuado de la cavidad y de la estructura de capas (capas de láser activo de 5 QW y de guía cuaternaria crecidas mediante un solo paso de crecimiento epitaxial) se

han obtenido resultados al estado del arte: margen cuasicontinuo de sintonía de 3 nm con una anchura espectral por debajo de 10 MHz (Figura 7). Otra fuente de luz muy prometedora para sistemas de transmisión multicanal es el láser en Y, descrito más adelante.

Láseres de bajo coste

El principal obstáculo para la introducción masiva de las tecnologías de comunicaciones ópticas es el elevado coste de los láseres. Parte del coste se debe al hecho de que los láseres (convencionales) no se pueden probar en la oblea, ya que necesitan una cavidad óptica para su operación. Así, las obleas de los láseres tienen que cortarse en dispositivos individuales (o barras), 20000 piezas por cada 2" de oblea. Cada uno de estos dispositivos individuales tiene que instalarse, montarse y probarse manualmente, tanto eléctrica como ópticamente, lo cual lleva su tiempo. Al final, los que no superan las pruebas se desechan, y los costes se aplican solo a los buenos.

Actualmente es posible realizar automáticamente las pruebas dentro de la oblea, mediante dos procesos claves. El primero se llama TEN (ruido eléctrico de terminal) y permite medir los parámetros ópticos de un láser *sin ningún medio óptico*: solamente se coloca un único contacto eléctrico de aguja en el chip láser, y un ordenador puede extraer todos los parámetros ópticos relevantes tales como la corriente umbral, el comportamiento frente a las cocas, el modo espectral, el rendimiento de conversión, etc., sin intervención manual, y sin ninguna óptica.

El segundo proceso clave es el crecimiento seco de espejos: en lugar de cortar la oblea láser en 20000 piezas individuales se logran hacer crecer espejos láser de ultra gran precisión en la oblea mediante tecnología de crecimiento seco, utilizando un haz de átomos de argón como herramienta de pulir espejos. Los investigadores de Alcatel han logrado realizar láseres que permiten ser probados en la oblea, con unos resultados idénticos a los láseres cortados convencionalmente.

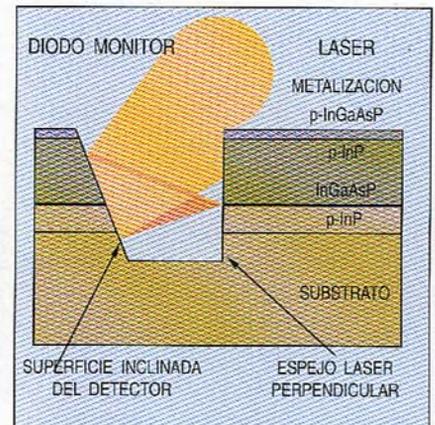


Figura 8a - Sección transversal de un OEIC láser/supervisor.

Además, con este proceso se han matado dos pájaros de un tiro ya que se utiliza la misma tecnología y la misma estructura de capas para realizar detectores de supervisión, integrados monolíticamente con los láseres.

Estos circuitos integrados optoelectrónicos láser/monitor (OEIC), mostrados en la Figura 8, no sólo reducen el número de etapas de ensamblaje de los módulos láser sino que, junto con el TEN, permiten la automatización total de la selección y documentación de los chips láser, y por lo tanto la reducción drástica del coste de los láseres.

Transmisores OEIC

Los transmisores OEIC de los futuros sistemas incorporarán bastante más de lo descrito anteriormente: los láseres son el interfaz entre electrónica y óptica, y es una cuestión fundamental el saber que funciones se pueden incorpo-



Figura 8b - Vista en planta de una oblea OEIC láser/supervisor; los "rectángulos" grandes son los láseres, los pequeños son los detectores de supervisión.

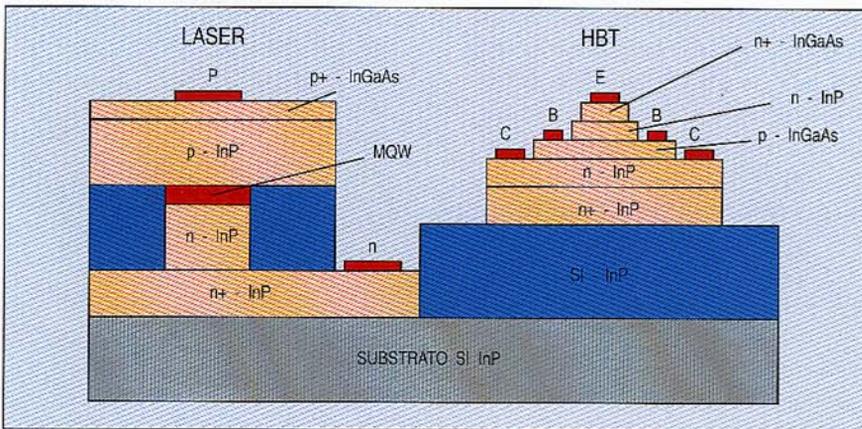


Figura 9 - Sección transversal de un OEIC láser/excitador. El OEIC propiamente dicho contiene tres transistores y un láser.

rar en lado InP o en el Si. Por supuesto, los circuitos integrados de Si se deben utilizar para las funciones electrónicas tanto como sea posible, pero ¿es esto también verdad para los circuitos excitadores de los láseres, los cuales pueden no ser compatibles con la tecnología de integración de los circuitos integrados de Si?. ¿Que se puede decir acerca de la adaptación de impedancias de los láseres de alta velocidad, de baja resistencia, frente al mundo de la electrónica de 50 ohmios?. ¿Cuál es el interfaz óptimo con respecto a los costes?.

Actualmente, se encuentran en fase de preparación dispositivos láser OEIC que incluyen no solamente la estructura láser/supervisor antes mencionada, sino también electrónica basada en InP. Al contrario que en la tecnología de silicio (en donde, esencialmente, el mismo dispositivo se reproduce varias decenas de miles de veces en un solo chip), el principal reto de los OEIC de InP es la combinación de tecnologías que no son compatibles - los láseres y los transistores son intrínsecamente diferentes en sus funciones y en sus tecnologías.

De nuevo la palabra clave es tecnología. Los "enemigos", los láseres MQW y los transistores heterobipolares basados en InP se han colocado juntos en un OEIC láser/circuito-excitador (Figura 9) utilizando exclusivamente técnica LP-MOVPE en todas las fases de crecimiento epitaxial. Este OEIC no sólo constituye una novedad

desde el punto de vista tecnológico en el mundo OEIC, sino que ya está en funcionamiento a 565 Mbit/s, con una corriente de excitación de AC de unas decenas de microamperios.

Amplificadores ópticos

Los amplificadores ópticos han iniciado una auténtica revolución en los conceptos de los sistemas durante los últimos años como se indica en el artículo *Progreso en amplificación óptica* (en este número). De nuevo, aquí hay un auténtico reto para los investigadores de componentes O/E: la realización de amplificación óptica requiere de láseres de semiconductores con nuevas funciones, especialmente una potencia óptica muy elevada. El principal problema se centra en este caso en la densidad de potencia óptica tan elevada que los espejos de estos dispositivos

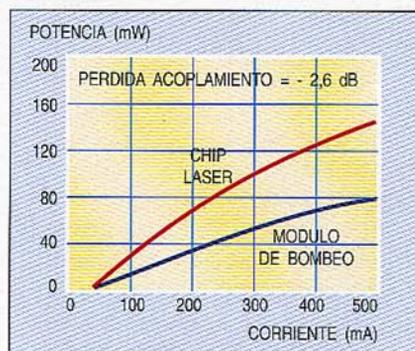


Figura 10 - Características de potencia respecto a la corriente de excitación de un módulo láser de bombeo de 1,48 μm .

láseres tienen que soportar durante 25 años. ¡Se habla de densidades de potencia del orden de diez megawattios por centímetro cuadrado!

Fuentes de bombeo de 1480 nm

Utilizan la misma tecnología ya empleada en los láseres de 1550 nm: sustrato InP, pozos cuánticos InGaAsP, la misma composición, pero con diferente grosor para acomodarse a la longitud de onda de 1480 nm. La ventaja de ésta estructura es la fiabilidad, una función de importancia capital en aplicaciones submarinas.

La estructura desarrollada en Alcatel utiliza una franja DCPBH en la cual la estructura vertical incluye pozos cuánticos múltiples en la capa activa. La supresión de la corriente de fugas se lleva a cabo mediante bombardeo de protones, mientras que se estudia como alternativa el recrecimiento de una capa semiaislante InP. Con ésta estructura, cuyos parámetros se han optimizado para alcanzar simultáneamente una potencia alta y una divergencia muy baja (maximizando de este modo la energía acoplada en una fibra monomodo, es decir la potencia óptica utilizable), se han obtenido unas altas prestaciones: se han conseguido acoplar más de 80 mW de potencia óptica en una fibra monomodo a 500 mA (Figura 10). Si además el rendimiento ha sido elevado (el 50% de los módulos ópticos dan más de 50 mW a 400 mA) y la fiabilidad buena (la corriente umbral se incrementa menos de 1,7 mA durante 72 horas a 600 mA y 100°C), está claro que las fuentes de bombeo de 1480 nm son dispositivos perfectamente utilizables.

Fuentes de bombeo de 980 nm

Se basan en una tecnología novedosa: no solo el sustrato de AsGa está lejos de los componentes O/E basados en InP, sino que también lo está la tecnología de crecimiento de cristal de pozo cuántico de capa InGaAs/GaAlAs. Estas fuentes de bombeo de 980 nm de los EDFA presentan, sin embargo, ventajas frente a las fuentes de bombeo de

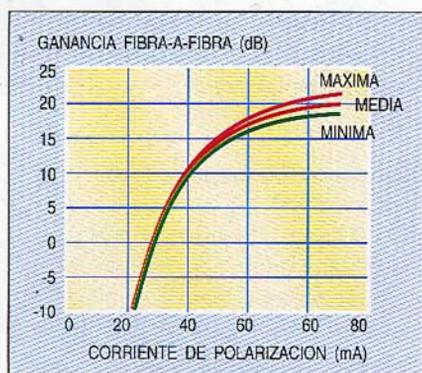


Figura 11 - Características de un módulo SCOA insensible a la polarización a 1,55 μm.

1480 nm en ciertas aplicaciones: tienen una relación de ruido más pequeña, un consumo de potencia inferior, una dependencia con la temperatura menor y, finalmente aunque igualmente importante, una realización más sencilla (coste más bajo) del amplificador óptico global.

Alcatel ha adquirido experiencia en este campo, alcanzando un rápido progreso. De nuevo, la tecnología Alcatel se basa en LP-MOVPE, y se han realizado láseres monomodo laterales de bombeo con una potencia óptica continua superior a 60 mW.

Amplificadores ópticos de semiconductores

Se podría pensar que un amplificador óptico lo único que hace es amplificar la luz. Pero cuando se trata de amplificadores ópticos de semiconductores (SOA) se trata de mucho más. De hecho, un SOA puede realizar modulación de intensidad y de fase rápida, puede utilizarse como una puerta óptica, y puede incluso detectar señales mientras que está amplificando!. Dado su pequeño tamaño, bajo consumo de potencia y elevada compatibilidad para la integración, se explica el porqué la investigación continua siendo tan activa a pesar del desarrollo de los amplificadores ópticos basados en fibra dopada de Erblio, los cuales son exclusivamente amplificadores.

El trabajo dentro de la comunidad científica de Alcatel se ha concentrado en dispositivos SOA de InGaAsP insensibles a la polarización, los cua-

les utilizan nuestra nueva estructura DCPBH modificada, la cual permite un control de regiones activas casi cuadradas (0,3 μm x 0,4 μm), prerequisite para poder alcanzar una baja sensibilidad a la polarización. Los módulos de amplificación se han realizado con unas prestaciones al estado del arte: ganancia fibra a fibra de 20 dB a una corriente de polarización de 90 mA (Figura 11), un factor de variación de la ganancia por debajo de 2 dB para polarización TE y TM y una ganancia de polarización entre los modos TE y TM por debajo de 0,4 dB. Además, estos dispositivos muestran un tiempo de subida/bajada extraordinariamente corto, del orden de 200 ps, característica que se explota en las aplicaciones de conmutación óptica rápida. Para mejorar las prestaciones de los dispositivos SOA se están integrando actualmente reductores tridimensionales, los cuales modifican el haz óptico y mejoran de manera importante la eficiencia de acoplamiento entre el amplificador y la fibra, o más adelante, la guíaonda de SiO₂. En los primeros dispositivos se ha podido demostrar la reducción en la divergencia de haces, mejorando el acoplamiento a la fibra monomodo desde 7 a 4 dB.

Dispositivos de recepción

La conversión de las señales ópticas en señales electrónicas en el extremo receptor de la fibra se realiza convencionalmente mediante fotodetectores de "función única", como los diodos PIN ó los fotodetectores de avalancha (APD). Se sigue investigando en dispositivos PIN y APD, básicamente tratan-

do de bajar los costes de fabricación, y ya están en preparación los futuros componentes integrados optoelectrónicos a ser utilizados en los receptores.

Fotodetectores PIN

Los fotodetectores PIN se fabrican desde hace años. La tecnología MOVPE y las herramientas de diseño avanzadas han permitido desarrollar dispositivos particularmente adecuados a cada aplicación específica de sistemas. Los parámetros de diseño incluyen capacidad y diámetro del chip, iluminación frontal o trasera y reflexión óptica hacia atrás, ya que se pueden considerar problemas solucionados los relacionados con la eficiencia cuántica, la corriente de oscuridad, la fiabilidad y el rendimiento. Ejemplos específicos de PIN actualmente disponibles son los detectores de muy alta velocidad para uso digital a más de 20 Gbit/s, y los detectores para distribución de televisión analógica con el requerimiento específico de muy alta linealidad aún en condiciones de potencia óptica incidente extremadamente alta del orden de unos cuantos mW.

Fotodetectores de avalancha

Desde hace algunos años se fabrican fotodetectores de avalancha (APD) con regiones separadas de absorción, multi-

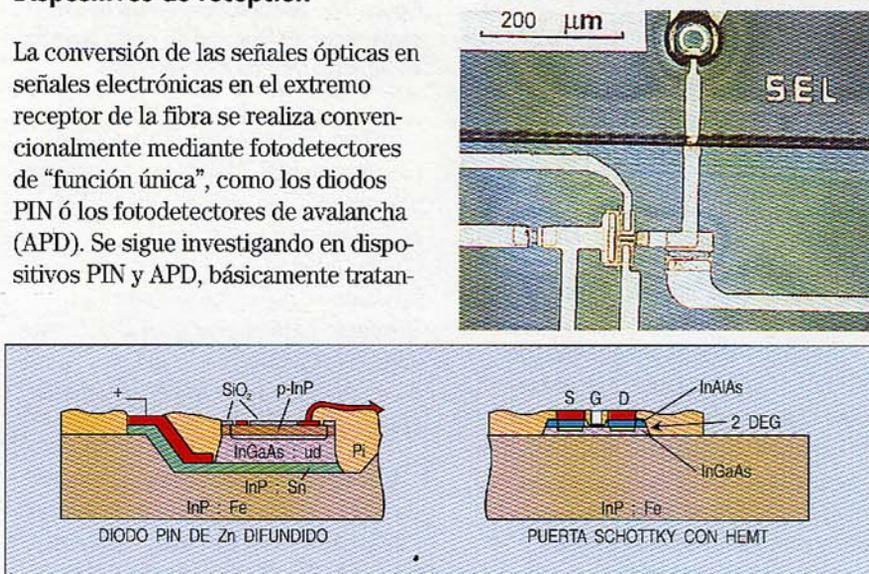


Figura 12 - Vista de un receptor OEIC basado en PIN-HEMT (arriba) y sección transversal de un PIN y un HEMT (abajo).

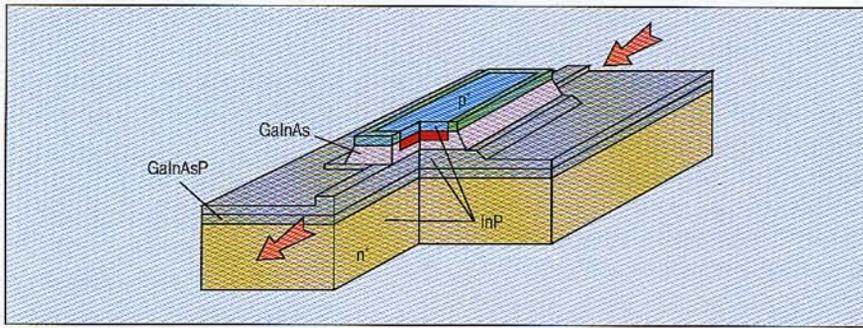


Figura 13 - Sección transversal de un detector PIN alimentado mediante guíaonda.

plicación y transición (SAGM-APD), para operación de hasta 2,5 Gbit/s. Los dispositivos avanzados encaminados hacia aspectos de seguridad, se basan en técnicas LP-MOVPE, y la antigua pregunta acerca de los APD de alta velocidad ya ha podido ser contestada por los investigadores de Alcatel: ¿existe de verdad ventaja de los APD frente a los PIN a velocidad de transmisión muy elevada? Si, y además existe una mejora de al menos 5 dB a 10 Gbit/s ya probada, con una técnica novedosa planar del tipo LP-MOCVD-SACGM-APD, la cuál incluye una verdadera región de transición continua. El efecto de ésta transición es como si se empuja a los electrones cuesta abajo: se incrementa la velocidad y el camino se despeja (se reduce el ruido).

Este récord mundial se presentó por primera vez en la conferencia ECOC de 1991, por Alcatel y Fujitsu, dentro de la misma sesión. En Alcatel, ha comenzado la fabricación de dichos dispositivos. Las primeras aplicaciones se centran en sistemas de 2,5 Gbit/s de altas prestaciones, pero el dispositivo opera a cualquier velocidad de transmisión entre 34 Mbit/s y 10 Gbit/s.

Receptores OEIC: integración con la electrónica

La integración en el mismo sustrato InP reducirá los costes de fabricación dado que éste proceso omite los pasos de ensamblamiento manual, y además permite mejorar las prestaciones del receptor dado que las impedancias de entrada parásita se minimizan. En la parte electrónica, Alcatel utiliza una tecnología de transistores del más alto nivel: transistores de electrones de

alta movilidad (HEMT) de InAlAs/-InGaAs. Basados de nuevo en la técnica LP-MOVPE, estos transistores utilizan efectos cuánticos para poder conseguir electrones de alta movilidad y, como consecuencia, muy altas prestaciones: una transconductancia superior a 400 mS/mm y una frecuencia de tránsito de 28 GHz.

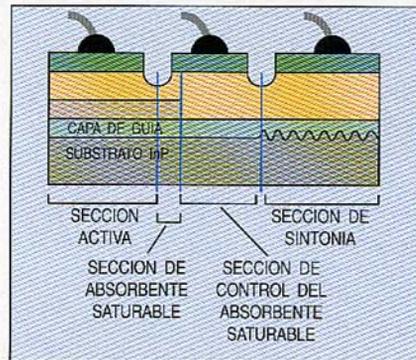


Figura 14 - Sección transversal de un convertidor de longitud de onda basado en un láser DBR de tres secciones.

Se han realizado receptores OEIC basados en PIN-HEMT con fotodiodos planares PIN de InGaAs, los HEMT anteriormente mencionados, y resistencias adicionales, todo en un chip tal como se indica en la Figura 12. Diseñado para operar a 2,4 Gbit/s este chip se ha probado a 3 Gbit/s mostrando un diagrama de ojo perfectamente abierto.

Los siguientes pasos serán el poder conseguir circuitos preamplificadores PIN-HEMT en un chip para operar hasta 10 Gbit/s, así como OEIC basados en detectores de bajo coste de HEMT para velocidades de transmi-

sión bajas utilizando detectores MSM (metal-semiconductor-metal) con tecnología simplificada.

Receptores OEIC: integración con guíaondas

Con el desarrollo de los dispositivos de guíaondas InP, como acopladores y conmutadores, el viejo sueño de los circuitos integrados fotónicos (PIC) se está convirtiendo en realidad. La integración de los dispositivos optoelectrónicos puede incrementar aún más la funcionalidad de estos circuitos. Un perfecto ejemplo lo constituye un fotodiodo PIN alimentado por guíaonda que se utiliza tanto como circuito supervisor como circuito receptor. La estructura desarrollada por los investigadores de Alcatel permite conseguir prestaciones al estado del arte (anchura de banda de 10 GHz, corrientes de oscuridad <math>< 1 \text{ nA}</math>, eficiencia cuántica interna cercana al 100%) utilizando la estructura de campo evanescente acoplado (Figura 13)². Y lo que es todavía mucho más importante, gracias a las propiedades específicas del crecimiento epitaxial en fase de vapor clorada (crecimiento localizado), esta integración es totalmente compatible con dispositivos de guíaonda optimizados, como los conmutadores ópticos.

Actualmente, se encuentran en estudio circuitos integrados fotónicos sofisticados que utilizan este esquema de integración: por ejemplo, un circuito que combina varios conmutadores y detectores de alta velocidad, y que realiza procesamiento optoelectrónico de paquetes similares al MTA (sincroniza-

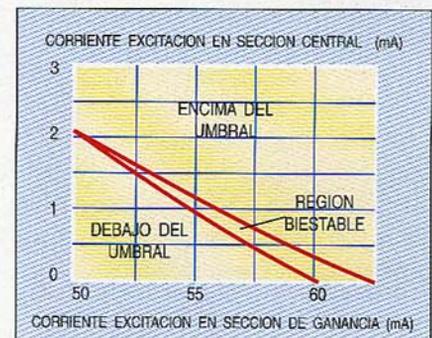


Figura 15 - Esquema operacional de un láser DBR de tres secciones.

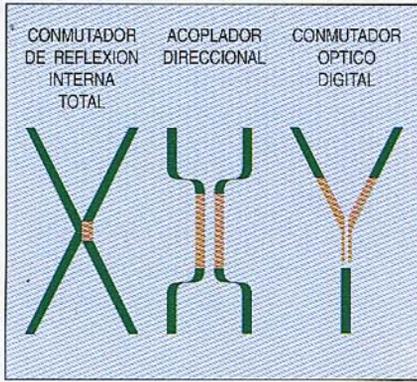


Figura 16 - Conmutador de reflexión interna total (izquierda), acoplador direccional (centro), conmutador óptico digital (derecha).

ción, interpretación de la cabecera): uno de los circuitos de conmutación óptica más avanzados de los reportados hasta la fecha³.

Dispositivos para la conmutación fotónica

En algunos libros de texto se puede leer que la luz se propaga en línea recta, con energía constante. En estos mismos libros también se puede leer que la luz no se puede poner dentro de una caja para guardarla. Olvídense de estos libros.

Los investigadores de Alcatel pueden controlar la trayectoria de la luz mediante dispositivos de tan solo 1 mm de longitud, y con velocidad del orden de Gbit/s. Se han podido realizar componentes optoelectrónicos que cambian la energía (o color longitud de onda) de una trama de datos ópticos modulados a alta velocidad. Y, han demostrado que se puede almacenar información óptica. Estas funciones son básicas en la introducción de la óptica, no solamente para transmitir, sino también para conmutar - eventualmente se unificarán en los nuevos sistemas ópticos de "transconmutación".

Convertidor de longitud de onda basado en láser DBR

El poder cambiar el color de la luz puede parecer una especie de truco de magia, pero constituye una función

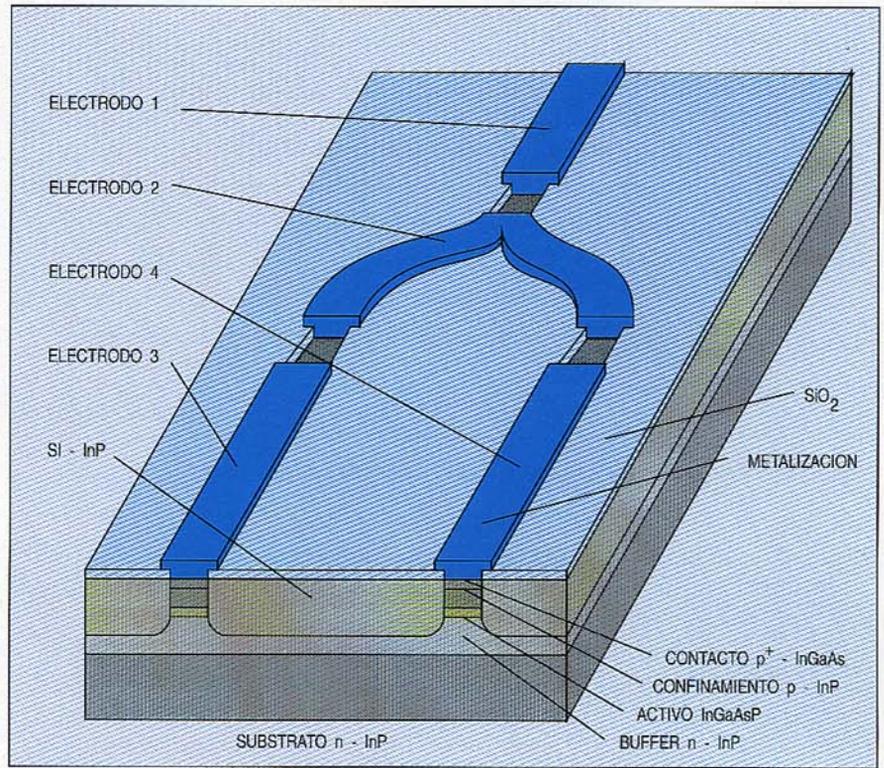


Figura 17a - Vista esquemática de un láser en Y.

esencial (conversión de longitud de onda) que se necesita en los nuevos conceptos de conmutación óptica y en las nuevas arquitecturas que explotan el dominio de las longitudes de onda.

Se ha desarrollado un convertidor de longitud de onda integrado basado en un láser DBR que incluye absorbente pasivo saturable (Figura 14). El contacto eléctrico central controla el absorbente saturable, mientras que la corriente en la sección Bragg se utiliza para sintonizar la longitud de onda. Las características potencia/corriente permiten obtener una región biestable en un margen de valores de la corriente de excitación en las secciones de absorción activa y saturable (Figura 15). Mediante una selección apropiada del punto de operación, el dispositivo puede ser disparado ópticamente o utilizado en una conversión de longitud de onda (o conmutación de longitud de onda). Este dispositivo muestra prestaciones muy interesantes en ambas configuraciones: una potencia óptica de control del orden de 100 μW fue suficiente para conseguir la conmutación de longitud de onda en nanosegundos

o el disparo óptico en subnanosegundos. Estos tiempos de respuesta sugieren que un componente como este podría ser adecuado en experimentos de conmutación ópticos del tipo MTA.

Dispositivos de conmutación basados en guíaondas

Con una guíaonda que permita confinar el haz de luz, y una modulación de la fase o de la absorción mediante efectos inducidos eléctricamente (electroópticos, portadores, etc.), los ingenieros pueden controlar totalmente la luz; pueden de hecho conmutarla parcialmente desde una guíaonda a



El láser en Y.

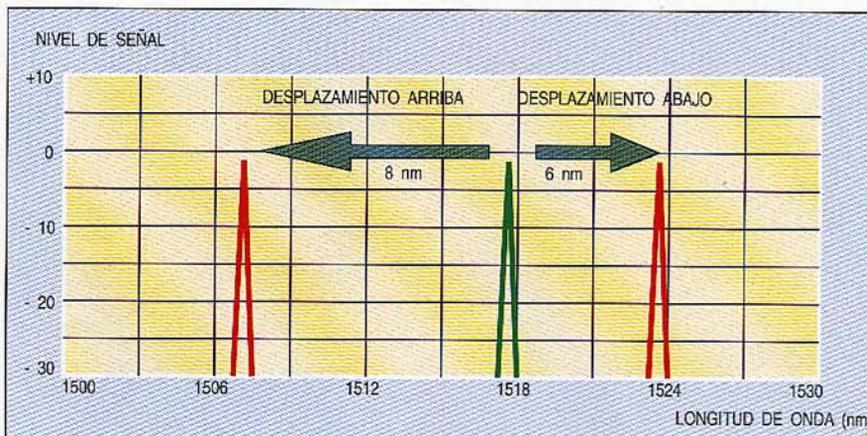


Figura 18 - Conversión de longitud de onda mediante un láser en Y.

otra. Se han desarrollado diferentes estructuras de conmutación, cada una con distintas características, especialmente adecuadas para diversas aplicaciones. Por ejemplo, se han podido fabricar conmutadores de reflexión interna total compactos (100 μm de largo) independientes de la polarización mediante inyección de portadores, que permiten índices de modulación refractivos tan altos como 10^{-2} (Figura 16). Se han desarrollado conmutadores de acopladores direccionales (Figura 16) para aplicaciones de alta velocidad, los cuales exhiben una eficiencia tres veces superior a los dispositivos electroópticos tradicionales, gracias a una estructura de guíaonda peculiar que utiliza una depleción de portadores. Se han podido demostrar tensiones de excitación tan bajas como 5 V, reconfiguración a 1 Gbit/s y diafonías del orden de -20 dB. Aunque se pueden conmutar ambas polarizaciones en estos acopladores direccionales, la tensión de excitación para los modos TE y TM es normalmente distinta, y por ello se prefiere una polarización fija. Algunos sistemas pueden acomodarse a ésta situación, pero otros no.

Desde hace bastante tiempo se ha estado buscando un conmutador lineal independiente de la polarización, de alta velocidad, fácil de controlar y susceptible de colocarse en cascada. Los investigadores de Alcatel han tenido éxito al desarrollar un conmutador óptico-digital (Figura 16), demostrado

por primera vez en un sustrato InP. Se han podido obtener tanto dispositivos de velocidad de transmisión moderada (inyección de portadores, corriente de excitación de 15 mA) como dispositivos de velocidad alta (depleción de portadores, tensión de conmutación de 15 V). En este momento, estos conmutadores se utilizan como bloques fundamentales para la fabricación de circuitos más complicados, por ejemplo matrices de conmutación 4x4 y 1x16; y esto es solo el comienzo.

Láser-Y

El láser-Y mostrado en la Figura 17, es un dispositivo de guíaonda totalmente activo con perfil en Y, cuyo contacto eléctrico está segmentado en cuatro partes. Su gama de aplicaciones potenciales se ha incrementado constantemente desde su invención por los investigadores de Alcatel⁴; a continuación se indican algunos ejemplos de utilización.

El láser en Y domina la escena mundial en lo que se refiere a *láseres de longitud de onda sintonizables*. El valor actualmente conseguido de los 51 nm mejora en cinco veces los mejores valores de las estructuras láser del tipo DFB/DRB. Como ejemplo, solo se requeriría un chip para generar 16 canales ópticos, separados entre sí por una vano muy grande de 3 nm ó, por ejemplo, 48 canales con espaciamiento de 1 nm.

El láser-Y puede funcionar como *convertidor de longitud de onda*, desplazando hacia arriba o hacia abajo la longitud de onda de la trama de datos de entrada (Figura 18), y con un desplazamiento de longitud de onda prefijable de hasta un valor récord de ± 8 nm. También se puede utilizar como *traductor de longitudes de onda*: una trama de datos ópticos a una longitud de onda corta (850 nm ó 1350 nm), inyectada en uno de los tres puertos, sale por otro puerto, pero a una longitud de onda de 1550 nm.

La configuración en Y de cuatro segmentos de guíaondas activas permite utilizar el dispositivo como un divisor/combinador, con funciones de amplificación o de puerta óptica. Los datos ópticos NRZ a 10 Gbit/s recibidos en la entrada común pueden salir por cualquiera de las dos salidas o por ambas a la vez, sin modificación en su perfil de pulsos y en su amplitud. A voluntad, los paquetes de datos se pueden enrutar hacia la otra salida. Es la función básica asociada al enrutamiento espacial o conmutación de paquetes MTA.

Recientemente se ha demostrado el almacenamiento de información óptica en dispositivos láseres en Y - ha sido solamente el comienzo, ya que la investigación continúa...

Conclusiones

Hace varios años, cuando se inventaron los primeros láseres de semiconductores, todos los expertos mundiales estaban convencidos de que nunca podrían funcionar a temperatura ambiente. Desde entonces, la investigación en componentes optoelectrónicos ha permitido a los ingenieros de sistemas el diseñar y el realizar sistemas de fibras ópticas sofisticados, con cada vez mejores prestaciones y con cada vez mayor capacidad de transmisión. A pesar del enorme progreso alcanzado, no estamos sino al comienzo de la evolución de las tecnologías ópticas: los componentes O/E no son solamente los sustitutos de las señales

de humo que solían hacer los indios, sino que son realmente los elementos esenciales de funciones absolutamente nuevas, como el proceso de longitudes de onda, el enrutamiento óptico, la memoria óptica etc., que ya se empiezan a vislumbrar en la actualidad. La futura evolución de los componentes O/E permitirá que los distintos bloques se combinen en chips integrados optoelectrónicos mucho más complejos, especialmente diseñados para satisfacer los requerimientos específicos de los sistemas, con funciones nuevas y utilizados en sistemas nuevos. El único camino seguro a seguir hacia este futuro es el de tener un alto grado de flexibilidad, clave en cualquier tecnología.

Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento a sus colegas de Marcoussis, Stuttgart y de otros lugares involucrados en las actividades descritas en este artículo. Parte de las actividades descritas han sido financiadas por el Ministerio Alemán de investigación y tecnología (BMFT), DBP Telecom de Alemania, France Telecom y la CEE (RACE 1027, 1031, 1033, 1051 y 1057).

Referencias

- 1 Hildebrand, O.: "Recent Trends in InP based Optoelectronic Components", Proc. ESSDERC, Nottingham, GB, 10-13 Sept. 1990.
- 2 Erman, M.; Riglet, Ph.; Jarry, Ph.; Martin, B.G.; Renaud, M.; Vinchant, J.F.; Cavaillès, J.A.: "Optical Circuits and Integrated Detectors", IEE Proceedings J. Optoelectronics, Número especial sobre Semiconductor Optoelectronics, vol. 138, n°2, Abril 1991, págs. 101-108.
- 3 Renaud, M.; Cavaillès, J.A.; Vinchant, J.F.; Jarry, Ph.; Erman, M.; Martinson, T.; Vogel, P.: "Monolithically integrated InP Photonic Circuits for Optical Processing in the Very High Speed Optical Loop", Proceedings of Topical Meeting on Photonic Swit-
- ching, Salt Lake City, Utah, EE. UU., 6-8 Marzo, 1991.
- 4 Hildebrand, O.; Schilling, M.; Idler, W.; Baums, D.; Wünnel, K.: "The Integrated Interferometric Injection Laser: One Device Concept for Various System Applications". Proc. 17th ECOC/8th IOOC, 9-12 Sept., 1991, pág. 39.

Olaf Hildebrand nació en 1948 en Hamburgo, Alemania. Alcanzó la licenciatura en Ciencias Físicas en 1973 y el Doctorado en 1977, en la Universidad de Stuttgart, en ambos casos con "summa cum laude". Su trabajo de licenciatura se centró en estudios de láseres de infrarrojos o casi infrarrojos de sintonía amplia con investigación aplicada en los láseres de GaAs; su tesis doctoral se centró en la investigación básica de láseres basados en GaAs y InP. En 1978 cambió el área de interés hacia los fotodetectores de avalancha PIN basados en AsGa y InP. En Mayo de 1983 el Dr Hildebrand entró a formar parte del centro de investigación de SEL en Stuttgart, donde desde 1985 es responsable de la división de componentes optoelectrónicos.

Marko Erman nació en Ljubljana, Eslovenia en 1954. Logró la licenciatura en 1978 en la escuela politécnica de París y un segundo diploma de ingeniería en 1980 por la Escuela Superior de Telecomunicaciones en París. Completó su Doctorado de tercer ciclo con tesis en 1982, y su Doctorado en Ciencias Físicas en 1986 (en ambos casos con la Universidad de París). En 1982 entró a formar parte de los laboratorios Philips, donde sus áreas de interés estuvieron centradas en las propiedades de los semiconductores de los grupos III-V, las técnicas de caracterización óptica y la óptica integrada. A partir de 1989 fue responsable del Grupo de Investigación Exploratoria, y a partir de 1990 responsable del Grupo de Imágenes Profesionales. Desde Julio de 1991 el Dr Erman forma parte de Alcatel Alsthom Recherche, donde se ha transferido la mayor parte de las actividades optoelectrónicas de LEP. Actualmente, es responsable delegado de la división de componentes optoelectrónicos.

Desarrollo y fabricación de componentes optoelectrónicos activos

J.-P. Pestie

Alcatel Optronics Division, Nozay, Francia

Dos factores dirigen los componentes optoelectrónicos activos. Uno es la necesidad de sistemas de largo alcance de mayores prestaciones y otro la necesidad de redes locales de menor coste. Las mayores prestaciones se obtienen con los nuevos diseños integrados, capaces de funcionar a mayores potencias ópticas y velocidades de transmisión. La reducción en los costes se logra con ensamblado automático, procesos compatibles con obleas grandes y usando bloques funcionales comunes.

Introducción

La enorme capacidad de la fibra óptica como medio de transmisión creará en el futuro un incesante aumento de la demanda de nuevos sistemas de comunicaciones. Cualquiera que vaya a ser su aplicación, estos sistemas utilizarán sofisticados componentes optoelectrónicos (O/E), que no solo constituirán el núcleo de los sistemas sino que también dictarán la mayoría de las características de transmisión. Algunas de las aplicaciones, como los enlaces de larga distancia terrestres y submarinos y las redes de distribución CATV, abarcan un vasto dominio en el que se presenta como una necesidad la utilización de los componentes tecnológicamente más avanzados. Otras aplicaciones, que incluyen el cableado de edificios de negocios o sistemas JDS de corto alcance, sistemas de acceso como la distribución de TV, redes locales y la conmutación de banda ancha, necesitarán unos componentes O/E, en los cuales es clave un bajo coste de producción.

En la mayoría de las aplicaciones, los componentes O/E constituyen una parte importante del coste total del sis-

tema. Por tanto, y a partir del instante en que se plantea cualquier proyecto, el objetivo primario debe ser un bajo coste del sistema, el cual va condicionar la elección de dispositivos y tecnologías durante las fases de estudio de factibilidad y desarrollo del producto.

En principio, los dispositivos de altas prestaciones se realizan mejor mediante estructuras complejas mientras que los componentes económicos se consiguen mejor con soluciones más simples, que ofrecen un grado mayor de fabricación. Afortunadamente, las modernas tecnologías como la epitaxia en fase de vapor orgánico metálico (MOVPE), la epitaxia de haz molecular (MBE) para crecimiento epitaxial, o las soldaduras YAG para fijar la fibra permiten conciliar tanto el gran dominio de la tecnología necesaria para los componentes O/E de vanguardia como las ventajas de costes requeridas por el resto de los componentes.

Si bien hasta ahora se han podido realizar mediante prácticas de bajo coste, la complejidad de los componentes O/E crece rápida y significativamente. Además de su función puramente óptica, los componentes integran dentro del mismo encapsulado circuitería electrónica, haciendo de ellos verdaderos módulos O/E integrados. Algunos fabricantes han llegado a acuerdos sobre normalización con el fin de aumentar la producción y garantizar suministros alternativos. Esta reciente tendencia requiere, no solo el desarrollo de una colaboración eficiente entre las firmas involucradas en el diseño de sistemas, sino también el desarrollar nuevas capacidades técnicas para ensamblar y probar los módulos integrados dentro las plantas de fabricación dedicadas a componentes O/E.

Este artículo revisa brevemente el camino seguido por la tecnología de los componentes O/E para satisfacer las necesidades de los sistemas de fibra óptica en un futuro próximo.

Panorámica de los productos actualmente en producción

La mayoría de los productos fabricados actualmente por Alcatel Optronics (división de Alcatel CIT) se describieron detalladamente en un número anterior¹ dedicado a componentes y sistemas de fibra óptica.

Dentro de Alcatel, Alcatel Optronics es la única unidad involucrada en el desarrollo y fabricación de dispositivos láser y detectores. Alcatel Optronics tiene también actividades de ensamble de módulos láser y de módulos integrados.

Los dispositivos fabricados en Alcatel Optronics son estructuras láser FP (Fabry-Perot) y DFB (realimentación distribuida) que emiten respectivamente a 1300 y 1550 nm, APD de germanio, APD y PIN planar en InGaAs. Hasta 1990, la producción de dispositivos se basaba en crecimiento epitaxial por medio de procesos de epitaxia en fase líquida (LPE). Actualmente, los procesos por crecimiento MOVPE y MBE están reemplazando progresivamente al LPE, especialmente en las secuencias críticas iniciales del procesado de las obleas del láser.

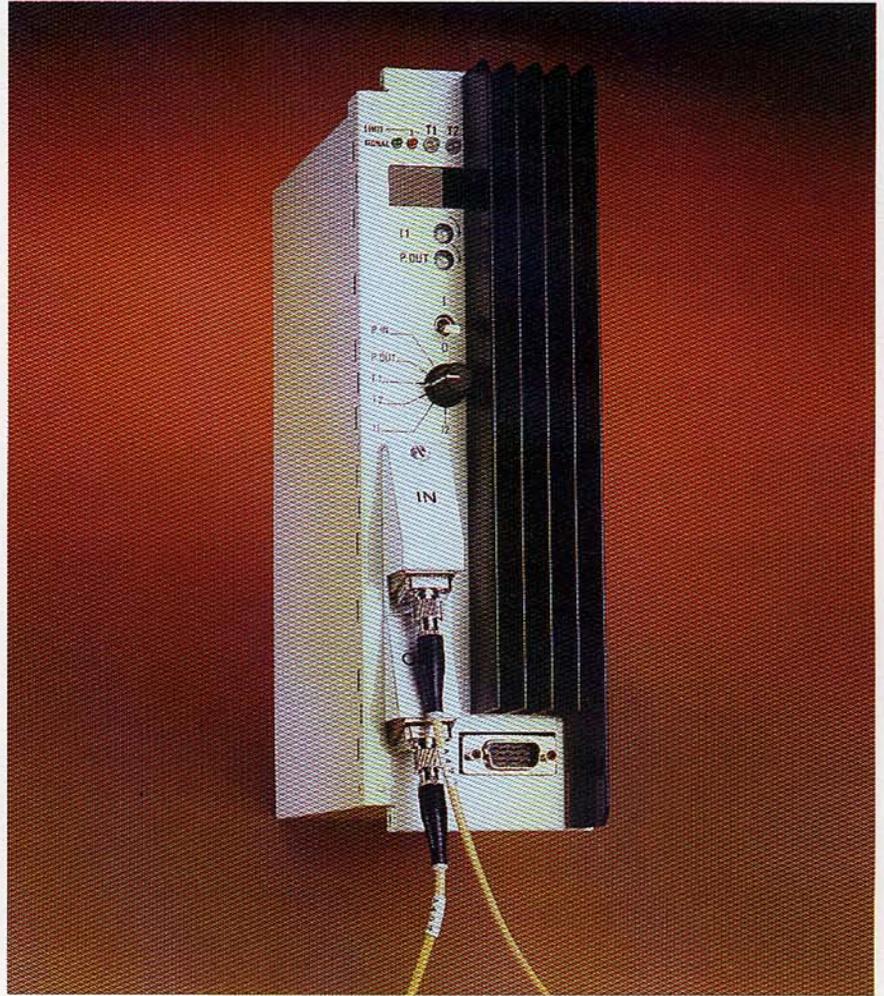
Todos los módulos láser en Alcatel Optronics son ensamblados o en formatos dual-in-line (DIL) normalizados de 14 terminales o en encapsulados en configuración de mariposa normalizados (o especiales). La mayoría de ellos, que tienen que disipar una poten-

cia media de 1,6 mW acoplados a una fibra monomodo en un amplio margen de condiciones climáticas, requieren un refrigerador termoelectrónico interno. Al igual que en la actualidad, solo una minoría entre los diversos tipos de módulos incorporan funciones electrónicas internamente. El antiguo proceso de anclaje de la fibra¹, que tenía dos sujeciones de resistencias híbridas para soldar la fibra y ajustarla dinámicamente frente a la superficie del láser, ha sido abandonado. La utilización de los procesos de soldadura YAG, inicialmente desarrollados para módulos láser submarinos, esta generalizándose en todos los productos a fin de cumplir con los estrictos requisitos funcionales y ambientales dispuestos por la normativa Alcatel e internacional establecida. Recientemente, se han efectuado los procesos de calificación de todos los tipos de módulos láser realizados mediante procesos de ensamblaje por soldaduras YAG.

Alcatel SEL está prioritariamente involucrada en el ensamblaje de detectores. La mayor parte de la producción consiste en módulos PINFET, que usan componentes PIN de InGaAs e híbridos de capa delgada, y en detectores APD de germanio y III-V terminados en espiral.

Alcatel Network Services (ANSI), Richardson, Tejas, está también muy involucrada en la producción de componentes O/E dentro del grupo Alcatel.

ANSI ensambla módulos ópticos de transmisión y recepción monomodo en grandes cantidades. Los módulos incluyen algunas funciones puramente electrónicas tales como un circuito controlador del láser para los transmisores, o un amplificador de transimpedancia con CAG para los receptores. La circuitería incluye chips de componentes discretos montados sobre circuitos híbridos de película delgada utilizando tecnología de nitruro de tantalato resistiva. Un tallado en el bloque de SiC en forma de "V" permite el anclaje de la fibra no metalizada con un pegamento de vidrio. Las secuencias de fijación y alineamiento han sido automatizadas. En 1992, ANSI está introdu-



Módulo postamplificador EDFA.

ciendo los procesos de soldadura YAG, transferidos desde Alcatel Optronics, y con ello contribuirá a la automatización de los procesos de fabricación.

Necesidad de componentes en los sistemas futuros

En esta sección solo se van a mencionar aquellos componentes O/E ya en desarrollo o requeridos en los sistemas de comunicaciones de un futuro próximo.

Los sistemas de enlaces de transmisión (larga distancia y alta velocidad) requieren láseres DBF de alta potencia con un aislamiento óptico, detectores de una gran sensibilidad tales como el fotodiodo de avalancha (APD) y amplificadores de fibra dopados con erbio (EDFA).

El balance óptico alcanzable en un sistema de enlaces no solo depende de la potencia emitida por la fuente láser. Las velocidades más altas (ahora se consideran 10 Gbit/s como la próxima velocidad a normalizar) requieren un módulo láser con un efecto chirp más bajo, dado que la dispersión cromática se convierte en el factor limitador dominante (el chirp es el efecto de mejora del espectro óptico con la corriente de control del láser).

También deben reducirse las capacidades parásitas de los chips.

Un EDFA puede ser utilizado de diversas formas dentro de un enlace:

- como postamplificador/elevador de potencia justo detrás del láser
- como repetidor de línea
- como preamplificador justo delante del detector.

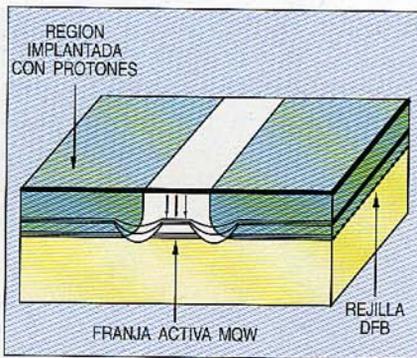


Figura 1 - Láser MQW DFB DCPBH.

Dependiendo de su utilización, los parámetros más importantes del EDFA se pueden ajustar fácilmente dentro de un margen muy amplio, añadiendo a los enlaces una flexibilidad adicional a la arquitectura y permitiendo futuras mejoras.

No obstante, el postamplificador es con mucho la aplicación que el mercado requiere de forma más urgente.

Los módulos EDFA incluyen todos los componentes ópticos, tales como la bomba del láser, WDM, fibra dopada con erbio, aislador, y toda la circuitería electrónica relacionada con el control del láser. El módulo EDFA optimizado para su aplicación como postamplificador, ya disponible en Alcatel Optronics, se muestra en la fotografía de la página anterior.

El dispositivo EDFA es el más claro exponente de la drástica reducción de tiempos, que se puede conseguir entre los primeros resultados de factibilidad en I+D y la finalización de la fase de desarrollo, menos de cuatro años desde su comienzo.

El nuevo sistema 1570 de distribución CATV de Alcatel necesita ser de bajo coste, pero a un mismo tiempo requiere componentes de la más alta tecnología. Las aplicaciones de banda estrecha necesitan de un módulo duplexor de bajo coste incluyendo un láser FP, un detector PIN y un chip preamplificador en un encapsulado de receptáculo coaxial (TO metálico). Mientras, las aplicaciones de banda ancha (analógicas) a 1550 nm utilizarán un láser DBF avanzado de gran linealidad, excelente acoplamiento óptico, bajo chirp y ruido, así como detectores de muy baja reflectividad. La distribución de TV analógica también requiere un EDFA para ser utilizado como postamplificador, permitiendo el reparto de la señal entre muchos abonados.

Los sistemas de transmisión de empresas y de corta distancia requieren módulos transmisores y receptores que funcionen a las velocidades JDS del CCITT para STM1, STM4 y STM16, así como a las velocidades

OC-3, OC-12 y OC-48 de SONET. En contraste con los sistemas plesiócronicos instalados durante la última década, los sistemas síncronicos ofrecen las ventajas de la normalización, que consecuentemente impondrá cambios radicales en la definición de componentes.

En la industria de componentes es bien sabido que la reducción de coste viene acompañada por un incremento del nivel de integración. Gracias a los mayores volúmenes de producción, y a las especificaciones y requisitos normalizadas, es posible aumentar la complejidad de los componentes O/E, especialmente por combinación en un mismo conjunto de circuitería óptica y electrónica. Un acuerdo tomado entre diversos fabricantes garantiza la existencia de suministros alternativos.

Debido a la necesidad de alcanzar la máxima flexibilidad en los sistemas de Alcatel, la primera generación de módulos JDS estará constituida por dos encapsulados DIL, transmisor y receptor, separados. La normativa Alcatel para productos STMn ya ha sido definida y, en la actualidad, Alcatel Optronics está negociando con varios suministradores.

Otras aplicaciones, como la interconexión entre módulos MTA, utilizarán un transceptor que combinará ambas funciones en un mismo encapsulado. Dichos componentes integrarán en el mismo bloque el láser, los chips de detección y un circuito integrado de silicio simple que efectuará todas las funciones requeridas, como la preamplificación, amplificación principal, recuperación de reloj, regeneración y control del láser.

En los sistemas de distribución de banda estrecha o de conmutación de banda ancha se usarán de forma amplia componentes similares de bajo coste con WDM (multiplexación en longitud de onda).

Finalmente, hay que hacer notar que las conexiones de bastidores ópticos y de abonados ópticos harán también un uso creciente de módulos O/E de bajo coste.

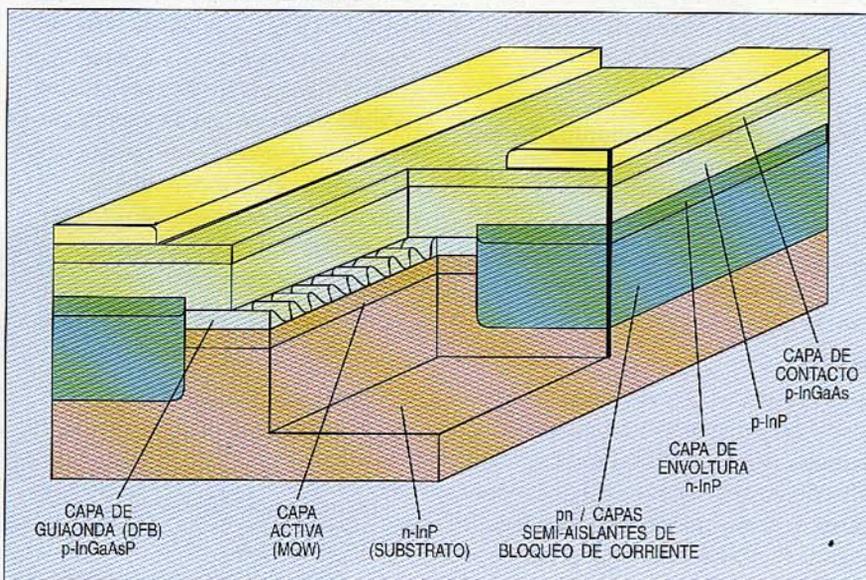


Figura 2 - Láser MQW DFB SIBH.

Mejoras en la estructura de los dispositivos y tendencias tecnológicas

Estructuras de láser y detectores

La ventaja más importante de las últimas estructuras láser DBF desarrolladas en los centros de investigación de Alcatel (Alcatel Alsthom Recherche y Alcatel SEL Research Center) la constituye el aumento de la potencia emitida y la disminución del chirp.

El pozo multicuántico (MQW) de la heteroestructura plana enterrada de doble canal (DCPBH) mostrado en la Figura 1, presenta algunas ventajas en lo que respecta a potencia óptica emitida y chirp. El haz muy concentrado de luz emitida permite una eficacia de acoplamiento a la fibra óptica monomodo excelente. Además, este dispositivo puede también alcanzar una corriente de umbral baja, gran estabilidad sobre un amplio margen de temperaturas, distorsión armónica reducida, bajo ruido, baja sensibilidad a la realimentación óptica, anchura de línea estrecha y, finalmente pero no menos importante, gran fiabilidad. A partir de los buenos resultados ya conseguidos en la fase de factibilidad, el MQW-DCPBH aparece como muy atractivo a corto plazo, y muy adecuado para los enlaces de transmisión y sistemas de transporte y distribución de TV analógica.

Otra estructura DBF, la heteroestructura enterrada semi-aislante (SIBH) que se muestra en la Figura 2, es de gran interés, especialmente en aplicaciones enteramente digitales de muy alta velocidad. Debido a la etapa de recrecimiento alcanzada con materiales InP semi-aislantes, la capacidad parasita lateral se reduce significativamente. En consecuencia, la estructura SIBH aparece como uno de los candidatos más adecuados para funcionar a velocidades superiores a 5 Gbit/s. Se ha comprobado que la estructura SIBH puede alcanzar también una linealidad excelente y un bajo ruido. Por tanto, el láser SIBH-DBF se considera también como un dispositivo alternativo de todos los sistemas analógicos. Se debe mencionar que dicha estructura puede ser enteramente creada por tecnología

MOCVD (deposición en fase vapor metal orgánica).

En todos los sistemas digitales que funcionan en la gama comprendida entre los 50 y 622 Mbit/s en distancias cortas, la emisión se realiza mediante un láser Fabry-Perot capaz de funcionar en un amplio margen de temperaturas cumpliendo la normativa JDS, sin necesidad de refrigeración. La estructura acanalada enterrada (BRS) de la Figura 3, es una de las estructuras mejor conocidas para estas aplicaciones (típicamente, la estructura láser BRS puede emitir más de 10 mW a 85°C). Debido principalmente a su muy simple estructura y a una banda superficial, las secuencias de crecido y recrecido pueden realizarse sobre obleas de gran diámetro mediante un proceso MOCVD, permitiendo conseguir una eficacia y comportamiento elevado. En la actualidad está siendo desarrollada por Alcatel Optronics conjuntamente con CNET (Centre National d'Etudes des Télécommunications), que es quien ha dado la licencia para utilizar la tecnología básica, un láser de Fabry-Perot basado en BRS y un proceso de obleas de 2". La BRS aparece como una estructura prometedora en producción, no solo para mantener los costes de producción al mínimo, sino también para alcanzar buenos compromisos con otros requisitos del láser en una serie de aplicaciones.

Los dispositivos de bombeo del láser necesarios en los EDFA, que emiten a 1480 nm, son también estructuras de Fabry-Perot en las que la capa activa MQW sustituye a la capa voluminosa normal para aumentar de forma significativa la potencia óptica acoplada. Típicamente, los dispositivos de bombeo del láser liberan 100 mW. Para mejorar la resistencia térmica y evitar un aumento importante en la temperatura de la unión, el chip se monta frecuentemente con el lado P hacia abajo sobre su soporte. Una capa espesa de oro, depositada sobre la banda de contacto, absorbe la mayoría de las tensiones inducidas por el propio proceso de soldadura. La bomba de láser que emite a 1480 nm ha sido transferida a

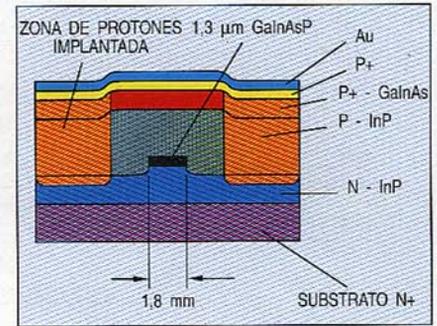


Figura 3 - Estructura acanalada enterrada.

Alcatel Optronics desde los centros de investigación de Alcatel, y en la actualidad se encuentra ya en producción.

Las bombas de láser que emiten a 980 nm son más prometedoras que los tipos precedentes en lo referente a ruido y consumo eléctrico. Alcatel Telettra, con una gran experiencia en tecnología AsGa, está involucrada en el desarrollo y fabricación de circuitos de bombeo de láser que emiten a 980 nm, los cuales se ensamblan en Alcatel Optronics.

Durante la fabricación, la eficiencia depende en gran manera del nivel de dominio de las estructuras. Por ello, la racionalización de la gama de estructuras requeridas por todos los dispositivos láser se está convirtiendo en un objetivo fundamental para conseguir unos costes eficientes. Los centros de investigación de Alcatel han comprometido un importante esfuerzo para conseguir la transferencia de una segunda generación de dispositivos basados en la misma estructura básica a Alcatel Optronics.

Los fotodiodos requeridos para los próximos cinco años se conseguirán principalmente mejorando las estructuras actuales. Los principales objetivos son la reducción de la capacidad y la mejora del factor de multiplicación. La capacidad que se puede conseguir depende del área total de las estructuras PIN y APD. Así, para todos los fotodiodos que funcionan a alta velocidad, las áreas activas deberán ser mucho más pequeñas que las normales de setenta micras actuales. La optimización del nivel de dopado y la mejora de

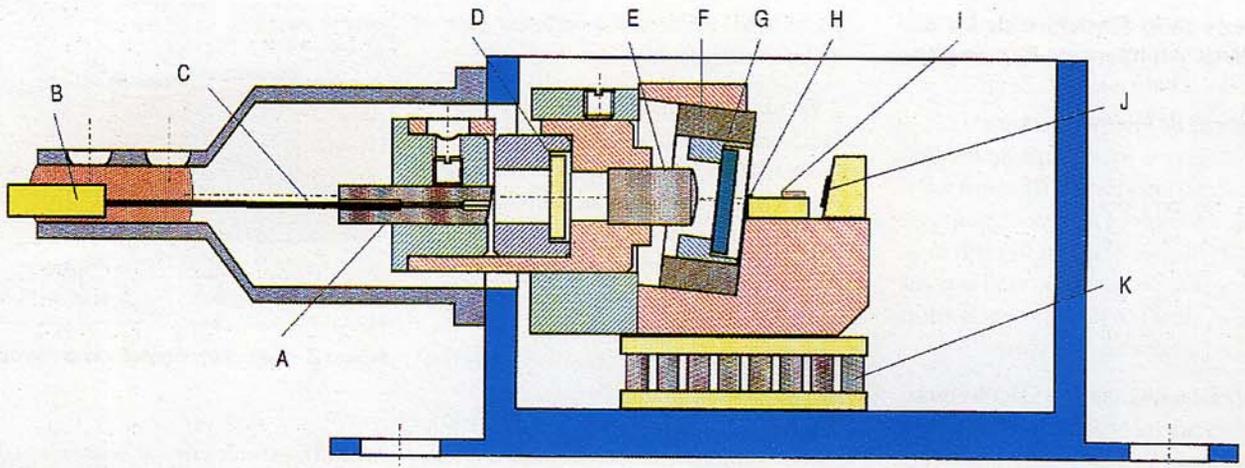


Figura 4 - Módulo aislador óptico integrado: A - Férula; B - Tubo; C - Fibra; D - Polarizador; E - Lente GRIN; F - Imán; G - Rotor de Faraday; H - Láser; I - Termistor; J - Fotodetector; K - Refrigerador..

las transiciones abruptas de capas en la estructura vertical permitirán conseguir los objetivos de la SAM-APD (absorción y multiplicación separadas).

Evolución de encapsulados y módulos

La principal ventaja de los chips láser DBF es la de ser capaces de proporcionar una potencia óptica de salida excelente a altas velocidades. Para conseguir estas altas prestaciones, el chip se monta sobre un refrigerador Peltier en un encapsulado de mariposa, que ofrece intrínsecamente una excelente respuesta en frecuencia, mucho mejor que la obtenida con encapsulado DIL de 14 terminales normalizados.

A velocidades altas, las características del láser se vuelven más sensibles a las reflexiones de luz generadas en los empalmes o conectores de la fibra. Para reducir este inconveniente, se ha incluido un aislador óptico en el módulo láser para aplicación analógica. Un aislador óptico integrado, similar al que se muestra en el módulo de la Figura 4, consiste en un rotor de Faraday y un polarizador de bloqueo separados por una microlente autofoco. Basándose en las propiedades de la luz polarizada, ello proporciona un aislamiento óptico de hasta 45 dB. Se puede conseguir un valor mejor utilizando un aislador de dos etapas.

También se necesita poner dentro del módulo del láser una red resistiva de adaptación de impedancias para módulos que funcionan a alta frecuencia. Este dispositivo consiste en un pequeño conjunto híbrido próximo a la submontura del láser o diseñado directamente sobre él. Un conector de alta frecuencia agregado lateralmente al módulo inyecta la señal de control lo que facilita la operación del componente cuando se le modula con señales de alta frecuencia.

El encapsulado tipo mariposa es también adecuado para el módulo de la bomba del láser. A consecuencia de la gran potencia óptica requerida por el bombeo EDFA, la resistencia térmica se debe reducir aún más. Además, un refrigerador minimiza la variación de temperatura, contribuyendo a estabilizar la longitud de onda en el valor de máxima ganancia.

Los encapsulados DIL y mariposa en espiral son componentes relativamente caros. Además, y debido principalmente a la altura del módulo, el proceso de ensamblaje no se puede automatizar completamente. Ello constituye un serio obstáculo al objetivo de conseguir un láser de bajo coste, puesto que los costes de ensamblaje constituyen la parte del león del coste total del láser.

En producciones masivas, el encapsulado coaxial tipo TO metálico, muy

similar al conocido encapsulado del láser del Disco Compacto, puede ser la mejor solución. Las pastillas del láser y del detector de supervisión se ensamblan fácilmente en encapsulados TO metálico utilizando técnicas convencionales de estampado y conexión por deposición, utilizadas comúnmente por la industria de semiconductores. Tras sellarse herméticamente con una caperuza metálica con una ventana transparente, el encapsulado TO metálico se puede conectar con el mundo exterior de varias formas diferentes. Puede ensamblarse bien directamente a una línea de proceso de ensamble automatizado como conector, bien como componente de un receptáculo coaxial en espiral.

Obviamente, los encapsulados coaxiales como TO18, TO46 ó TO72 son con mucho las mejores propuestas para una producción masiva de detectores. El formato TO es también adecuado para acomodar los chips detector y FET en un mismo encapsulado.

Los encapsulados coaxiales de formato pequeño son piezas esenciales a la hora de conseguir el concepto de desarrollo modular que requieren los módulos O/E integrados, concepto que se basa en la idea de utilizar encapsulados TO para toda clase de módulos O/E (STM, MTA, etc.) a fabricar en cantidades masivas.

El tamaño del encapsulado EDFA de segunda generación será mucho más reducido debido a la utilización de un encapsulado estilizado muy compacto.

Tendencias tecnológicas

En la fabricación de los circuitos integrados de silicio se ha observado, a lo largo de su historia, que la industria de la fabricación de obleas se ha desplazado hacia un mayor tamaño de las obleas. Esta tendencia natural ha venido dirigiendo el coste de producción de los chips, ya que el coste del procesamiento de las obleas permanece casi constante al aumentar su tamaño, mientras que la cantidad de dispositivos obtenidos por cada oblea aumenta muy significativamente.

El objetivo de reducción del coste de los dispositivos O/E deberá seguir, razonablemente, un camino semejante al del aumento de la producción en el caso de los componentes de tecnología de InP.

En muchas etapas de la producción de los materiales de InP, como la fotolitografía, la implantación de iones, la deposición de las capas de aislamiento y la metalización, se pueden usar fácilmente los ya bien probados equipos que se han venido utilizando en la fabricación de circuitos integrados de silicio. La característica más importante de los materiales de InP y de las estructuras de los dispositivos O/E radica en el hecho de que las complejas secuencias de crecido y recrecido hacen uso de capas sucesivas de película delgada de diferente composición.

El primer proceso epitaxial que fue utilizado históricamente en nuestra fabricación fue el LPE. Se está sustituyendo por la secuencia de crecido de capas activas, debido a su intrínsecamente pobre reproducibilidad y homogeneidad, lo que limita tanto el tamaño práctico de la oblea como su aprovechamiento. Afortunadamente, en los últimos años, han surgido otras dos nuevas técnicas epitaxiales, MOVPE y MBE, que permiten dominar los procesos más críticos de los dispositivos InP. Normalmente, ambos procesos se están

aplicando ampliamente para controlar, en obleas de gran tamaño, capas activas muy estrechas, como las de las estructuras láser con pozo multicuántico.

Debido a su capacidad de conseguir crecidos localizados y de alta velocidad, y en especial su capacidad para rellenar grietas y agujeros, el proceso LPE permanece como una tecnología atractiva en secuencias de recrecido, en las que el control del espesor de las capas no es excesivamente importante. Los hornos epitaxiales actuales se están modificando de forma significativa para que se puedan alojar obleas más grandes, compatibles con las usadas en las secuencias de crecido precedentes.

Hoy día, Alcatel Optronics utiliza en su fabricación procesos LPE, MOVPE de presión atmosférica y MBE de gas. En el futuro se utilizarán procesos MBE de gas y MOVPE de baja presión, totalmente compatibles con los procesos básicos implantados en los centros de investigación de Alcatel.

Al contrario que los fotodetectores, las obleas de láser no pueden ser sondadas antes de partidas, ya que el efecto láser ocurre solo cuando la cavidad ha sido totalmente definida con sus espejos. El sondaje, que consiste en manipular las obleas y medirlas con la ayuda de un haz de luz, incrementa el coste de los chips. El método del ruido eléctrico terminal (TEN) consiste en medir las características principales del láser, a partir del ruido de intensidad relativa (RIN) con respecto a su corriente, sin que haya que analizar ninguna luz. Este método, por su naturaleza muy económico, ha sido implantado en Alcatel Optronics.

En los módulos láser y detector, los pasos más críticos son el alineamiento y su conexión a la fibra. Como orientación a la elección de la tecnología, se han supuesto dos requisitos previos:

- capacidad de automatización
- funcionamiento estable en un margen amplio de temperaturas.

Como consideran estos dos puntos fundamentales, las técnicas de soldadura YAG de láser presentan ventajas

concluyentes. También se pueden aplicar fácilmente a otras etapas de ensamblado o a otros dispositivos, como por ejemplo el ensamble de encapsulados coaxiales, en los que la automatización de las operaciones es de importancia mayúscula. El equipo mismo es muy flexible, puesto la misma máquina YAG de láser puede servir a varias estaciones individuales de alineamiento mediante el uso de fibras deportadas. Por tanto, una decisión fundamental es la elección de este tipo de herramienta de ensamble.

Los módulos integrados que combinan funciones ópticas y electrónicas requieren no solo tecnología de ensamble avanzada para las funciones ópticas, sino también el disponer de las técnicas adecuadas de montaje sobre híbridos o en superficie, y también el recurso de expertos en diseño y pruebas eléctricas. Para ser competitivo, y debido al incesante aumento de la sofisticación de los sistemas, todos los diseños deberán, en unos pocos años, utilizar de forma progresiva módulos O/E integrados enchufables.

Conclusiones

Como se ha mostrado previamente, en los próximos años, la evolución de los dispositivos y módulos O/E vendrá determinada por las características de funcionamiento demandadas por los sistemas de largas distancias, y por las restricciones de coste requeridas por los sistemas de redes locales. Todos los sistemas de fibra óptica utilizarán de forma creciente nuevos componentes, como los EDFA y los módulos emisores y detectores completamente integrados.

Los componentes O/E más críticos son los dispositivos láser, y cuyo mayor reto es mejorar la capacidad para proyectar una mayor potencia óptica sobre fibras monomodo a muy altas velocidades.

Las redes locales requieren componentes de bajo coste para su propio éxito. Para reducir los costes de producción, los objetivos clave son obte-

ner procesos de ensamble totalmente automáticos, basados en soldaduras YAG láser, componentes básicos normalizados para todos los módulos enchufables, y utilizar procesos de obleas que sean compatibles con obleas de gran diámetro.

La misión de Alcatel Optronics es, claramente, proporcionar una ventaja estratégica a la compañía, entregando a tiempo componentes y funciones O/E de la más avanzada tecnología, de calidad superior y a un coste competitivo.

A fin de asegurar una rápida industrialización de los resultados de las investigaciones se ha definido, con gran nitidez, una estrategia cuyo componente esencial se basa en una única estructura láser y sobre procesos de crecido ya muy refinados. Esta estrategia se está implantado con la ayuda de los centros de investigación de Alcatel.

Referencias

- 1 C. Amoroux, J.-P. Pestie, I.R. Isert: Producción de Componentes Optoelectrónicos; Revista técnica de Alcatel - 1988 - Vol 62 - págs 251—258.

J.-P. Pestie nació en 1939. Se graduó en Física por la Escuela Nacional de Química de Paris en 1961, obteniendo el título de ingeniería en 1969. Ingresó en los Laboratorios de Marcoussis en 1964, en donde trabajó en el campo de transistores bipolares de microondas. Entró en Alcatel CIT en 1976 donde estuvo involucrado en el desarrollo y fabricación de componentes O/E y circuitos integrados de silicio. Desde 1991 es Director Adjunto de la División de Alcatel Optronics.

Diseño y fabricación de componentes pasivos de optoelectrónica

R. Jocteur
J.-P. Dumas

Alcatel Câble, Lyon, Francia
Alcatel Alsthom Recherche, Marcoussis, Francia

Aparte de la propia fibra hay muchos elementos pasivos involucrados en la comunicación fotónica, teniendo todos ellos un impacto significativo en las prestaciones y coste de un sistema.

Introducción

Durante los últimos años, la atención de la industria de fibra óptica se ha dirigido preferentemente hacia el desarrollo de fibras ópticas de alto rendimiento y a sus componentes asociados para sistemas de transmisión de telecomunicación a gran distancia y, en algunos países como Francia, distribución de TV. Entre estos componentes, los ópticos pasivos se han desarrollado y fabricado a gran escala. Los componentes pasivos incluyen la propia fibra óptica, empalmes y conectores. El artículo da una breve descripción de estos productos ya familiares, así como de la posición de Alcatel en este área.

Con las nuevas áreas de aplicación, como la distribución en el bucle de abonado, la transmisión de datos, las redes de área local (LAN) y una gama de usos militar e industriales, está surgiendo otro grupo de componentes pasivos, especialmente diseñados para redes de pequeñas distancias o sistemas de muy alta velocidad. Este artículo da una descripción de las principales aplicaciones de componentes pasivos y de las tecnologías de componentes existentes para fabricarlos, en particular de aquellas en fase de investigación o desarrollo dentro de Alcatel.

Se comparan las ventajas de las distintas tecnologías en la fabricación de componentes estrictamente pasivos o frente a la realización de híbridos optoelectrónicos empleando la técnica planar de guíaondas. Diferentes grupos de

las líneas de producto de Alcatel (transmisión, conmutación, cables) están interesados en los componentes pasivos. Se debe de poner una gran atención en el desarrollo de dichos productos y seleccionar las mejores tecnologías para sus actividades.

Aplicaciones de componentes pasivos

Sistemas de telecomunicación a gran distancia

La fibra óptica se ha convertido en el medio dominante en este tipo de aplicaciones de comunicaciones. La fibra monomodo normalizada está actualmente desplegada en sistemas punto a punto terrestres y submarinos. La fibra, el cable, los conectores y los empalmes son los componentes pasivos que se emplean en estas aplicaciones.

Redes de distribución

Se ha hecho particularmente evidente el interés del usuario en aplicar las ventajas de la fibra óptica en el bucle del abonado. Sin embargo, se deben superar los nuevos desafíos económicos y de prestaciones. En las comunicaciones a corta distancia, los aspectos relativos de coste y prestaciones de los componentes pasivos son más importantes que en las comunicaciones a larga distancia. Una red de distribución local implica emplear dispositivos de ramificación para transmisión bidireccional sobre una fibra, en operaciones de longitud de onda múltiple o para compartir los dispositivos activos y la planta de fibra entre varios abonados o servicios.

Comunicaciones de datos

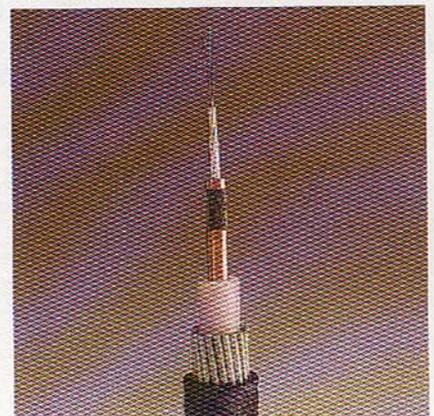
En el caso de algunas redes de área local se están desarrollando, como

alternativa a los sistemas basados en cobre, redes ópticas en una arquitectura de difusión. En este caso, las redes ópticas necesitan emplear derivadores ópticos o acopladores en estrella pasivos.

Otras versiones de los sistemas ópticos emplean un acoplador en estrella en un nodo central, a través del cual se hace las comunicaciones con los usuarios. En otros diseños, una topología de bus lineal puede emplear derivadores ópticos en línea. Generalmente, todas estas redes se basan en tipos de fibra multimodo.

Otras aplicaciones

El atenuador de fibra óptica se usa frecuentemente en sistemas de alta velocidad para eliminar la influencia de la atenuación de reflexión en las fuentes. Otros componentes de fibras especiales para los que existen muchas aplicaciones son los filtros, los polarizadores, los atenuadores, los defasadores, los acopladores 3x3, los limitadores de ancho de banda y los acopladores que mantienen la polarización.



Cable submarino de fibra óptica.

Hibridación de componentes optoelectrónicos

Una de las tecnologías de fabricación de componentes pasivos es la planar, en la cual una combinación de las tecnologías de la fibra óptica y de la fabricación de LSI dan como resultado una guafanda de fibra de óxido de silicio adaptada sobre un substrato planar de silicio. Estas ópticas integradas, que emplean tecnologías de silicio y de óxido de silicio, dan como resultado componentes activos híbridos. El número de funciones que se obtienen en el mismo substrato de silicio aumentan por la hibridación de componentes optoelectrónicos y microelectrónicos.

Productos y tecnologías de productos existentes

Fibras ópticas, conectores y empalmes

En la Tabla 1 se detallan los principales tipos de fibra y sus aplicaciones.

Actualmente se obtiene un gran rendimiento de la fibra monomodo fabricada masivamente, que representa un 80-90% de la producción total de fibras. Las atenuaciones típicas de 0,36 (calidad perfeccionada 0,34) dB/km a 1300 nm y 0,20 (calidad per-

feccionada 0,19) dB/km a 1550 nm, están muy cercanas a los límites del material empleado.

Se han mejorado considerablemente las propiedades mecánicas. Al emplearse en condiciones muy duras (como en los sistemas submarinos), las fibras se prueban continuamente en una prolongación del 2%.

Tres procesos importantes nos permiten alcanzar estos niveles de rendimiento: deposición axial en fase vapor (VAD), deposición externa en fase vapor (OVD) y deposición química modificada en fase vapor (MCVD). La capacidad de producción mundial es de mas de cinco millones de kilómetros por año. Desde principios de 1993 el grupo Alcatel Cable será capaz de producir un millón de kilómetros de fibra monomodo, de los cuales dos tercios se producirán en EE.UU., así como fibras especiales y multimodo.

El precio de la fibra es de vital importancia en las redes de bucle de abonado. Está en curso en Alcatel Cable un programa de desarrollo de una nueva tecnología, que se completará durante 1992/1993, antes de comenzar la producción. Este nuevo proceso, llamado deposición de plasma, es prometedor: se reducen los costes incre-

mentándose la capacidad de preformado y la mejora del rendimiento (propiedades geométricas, duración, etc.).

Se han hecho frecuentemente descripciones de los diferentes tipos de conectores y empalmes monomodo y multimodo, y de sus principios de funcionamiento. La comparación de su rendimiento se refiere esencialmente a la atenuación de inserción, atenuación de reflexión, repetición, duración, y margen de temperatura de funcionamiento.

La atenuación de empalme de fusión monomodo es, típicamente, menor de 0,1 dB. La alineación de perfil y la inyección-detección local son opciones útiles en la optimización dinámica de los empalmes. Las herramientas de segmentación y las máquinas de fusión permiten empalmar varios pares de fibras simultáneamente, obteniendo una operación económica. En la tecnología de cables submarinos, se debe reforzar la zona de empalme sin aumentar el diámetro externo.

El desarrollo de conectores múltiples de fibra de cable está avanzando para superar el nuevo reto económico de los cables de gran número de fibras, empleados en redes de distribución.

Tipo	Características	Aplicaciones
Multimodo	Fibra de silicio fusionado; diámetro de núcleo 50, 62.5, 85 ó 100 μm ; recubrimiento 125 ó 140 μm	Comunicaciones de datos, LAN, sensores, sistema de videocomunicaciones Alcatel RCV-1G
Monomodo estandard	Núcleo dopado con GeO_2 ; núcleo de sílice puro; 8 a 10 μm / 125 μm	Telecomunicaciones, datos a alta velocidad, sensores
Monomodo con dispersión desplazada	Opera en la ventana de 1550 nm	Sistemas de telecomunicación a gran distancia y muy alta velocidad
Monomodo con manten. de polarización	---	Sensores interferométricos y polarimétricos
Multimodo especial	---	Suministro de potencia a láseres, sensores
De infrarrojo extremo		Suministro a láser CO_2 , imágenes térmicas

Tabla 1 - Tipos de fibras y sus aplicaciones

Alcatel Cable y Alcatel Alsthom Recherche se encuentran involucrados en estas actividades.

Circuitos ópticos pasivos

La evolución de los requisitos para dispositivos de redes de distribución y otras aplicaciones de corto alcance han conducido al desarrollo de tres importantes tipos de circuitos ópticos pasivos - base, fibra y planar - basados en tres tecnologías - microóptica, fibra reducida por fusión y óptica integrada.

— Microóptica

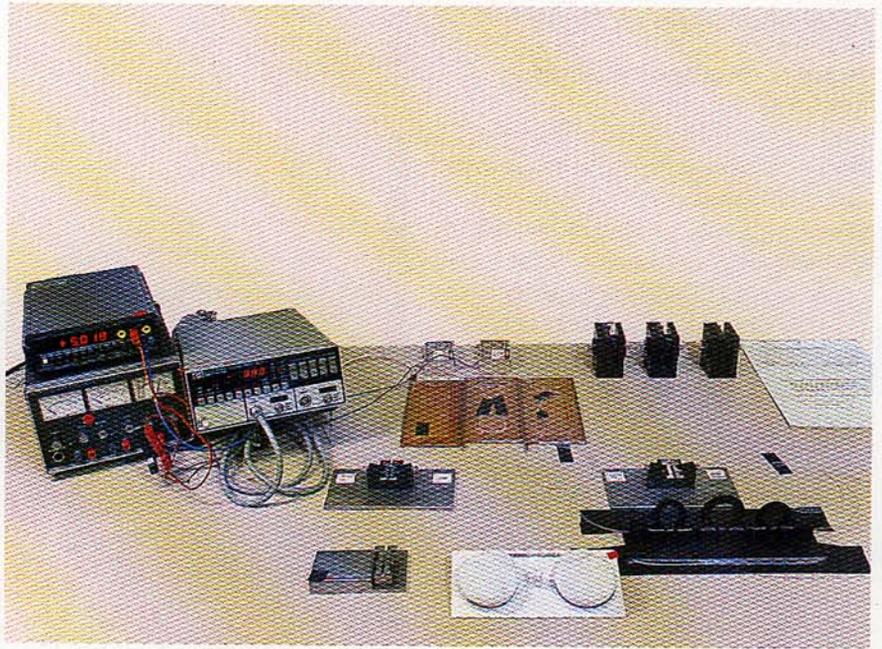
Los microdispositivos como los divisores de haz y los microlentes se utilizan en diferentes configuraciones para realizar las funciones requeridas al componente. La alineación de los microdispositivos es la etapa clave de la fabricación. No se permite la integración de dispositivos.

— Técnica de fibra reducida por fusión

El arrastre y fusión de fibras con o sin entrelazado reduce sus secciones transversales; de esta forma sus núcleos están muy próximos permitiendo el acoplamiento de la potencia óptica entre ellas. La zona de fusión está protegida por un encapsulado apropiado.

— Ópticas integradas

Un método consiste en el empleo de un sustrato de cristal muy delgado en el que se implantan las guíaondas por medio de fotolitografía e intercambio iónico. El proceso se completa añadiendo el conexionado en espiral de fibras y el apropiado encapsulado de protección. Otro método consiste en la unión de la técnica de deposición de óxido de silicio con la tecnología de fabricación LSI. La deposición de óxido de silicio sobre un sustrato de silicio se realiza bien por deposición química en fase vapor mejorada por plasma (PECVD) bien por deposición axial en fase vapor (VAD), ambas técnicas son muy similares al proceso de fabricación de fibras



Medida de la sensibilidad de polarización.

de óxido de silicio. El proceso se completa con intercambio iónico reactivo, conexionado en espiral y encapsulado. Además, las ópticas integradas se pueden realizar empleando GaInAsP sobre InP. El empleo de LiNbO₃ permite la implantación de moduladores (fase, amplitud, polarización) o conmutadores espaciales. Finalmente, las películas electroópticas de polímeros en investigación se pueden usar como moduladores con técnicas ópticas integradas.

Características generales

El entorno de funcionamiento en el que se sitúan muchos componentes pasivos es frecuentemente hostil: conductos, zanjas subterráneas o aceras para fibras, circuitos ópticos y accesorios en redes urbanas, amplio margen de temperaturas en las LAN, vibraciones por choques y presión del fondo del mar en amplificadores ópticos submarinos. Se requiere que el equipo terminal sea compacto y con estabilidad térmica. Todos los componentes se someten a una gran variedad de pruebas mecánicas y de entorno para ase-

gurar su fiabilidad bajo las peores condiciones. El conexionado en espiral y el encapsulado son etapas fundamentales de fabricación y diseño para dispositivos compactos.

Para medir el comportamiento mecánico y ambiental y controlar las características ópticas se emplean procedimientos de prueba de fibras ópticas EIA e IEC recomendadas.

Las características ópticas requeridas dependen del componente, del sistema en que se utiliza y de limitaciones específicas. Pero, en general, los requisitos consisten en:

- bajas pérdidas por atenuación e inserción
- acromaticidad en intervalos de longitudes de onda grandes
- uniformidad de puertos
- alta directividad y aislamiento
- baja dispersión de reflexión
- insensibilidad al modo de polarización.

La facilidad con la que se pueden integrar en configuraciones híbridas los componentes activos y pasivos es un aspecto importante.

Desarrollos dentro de Alcatel

Técnica de fibra fusionada (Alcatel Kabelmetal)

Los acopladores fusionados monomodo son componentes pasivos empleados en sistemas ópticos de comunicaciones. Se usan para dividir y multiplexar señales ópticas. La arquitectura expuesta para un sistema de distribución de fibras al hogar requiere acopladores que permitan una pura derivación óptica sin involucrar a la conversión de señal electro-óptica.

Los acopladores de fibra monomodo son dispositivos de $n \times n$ puertos, siendo n normalmente igual a dos. El acoplador se produce fusionando y reduciendo dos fibras monomodo idénticas, mientras se supervisa el camino óptico. El proceso de fusión se detiene cuando se alcanza la relación de acoplamiento deseada.

La función de acoplamiento se describe mediante varios parámetros ópticos. Uno de los más importantes es la dependencia de la longitud de onda con la relación de acoplamiento (cr). La energía de fuga se expresa por la atenuación de exceso. La pérdida de inserción es una indexación combinada que involucra la relación de acoplamiento y la atenuación de exceso, como se muestra en las siguientes ecuaciones:

— relación de acoplamiento
 $cr = 10 \log (P_4 / (P_3 + P_4))$

— atenuación de exceso
 $exl = 10 \log (P_1 / (P_3 + P_4))$

— pérdida de inserción del Puerto 4
 $ins(P_4) = 10 \log (P_4 / P_1)$

(siendo P_1 la potencia de entrada y P_3 y P_4 la potencia de salida, ver Figura 1).

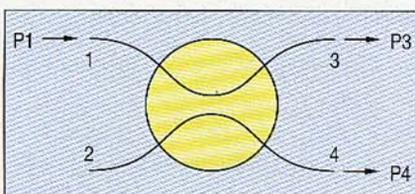


Figura 1 - Esquema de un acoplador de cuatro puertos.



Medida de la sensibilidad de vibración.

Otros parámetros importantes son la dependencia de la relación de acoplamiento con la temperatura y polarización y la directividad.

Para obtener acopladores de baja atenuación y pequeña dependencia con la polarización tiene una importancia vital el diseño de reducción. En la actualidad, se puede alcanzar un máximo de atenuación de exceso mejor que 0,03 dB en una fabricación automatizada de acopladores. Normalmente se llega a un valor mejor que 0,1 dB.

La aplicación de acoplador más difundida es la del divisor de potencia a una longitud de onda específica. La Figura 2 muestra la relación de acoplamiento frente a la longitud de onda de un divisor de potencia de 3 dB. Para permitir una cierta anchura de banda la pendiente de la relación de acoplamiento debe de ser la mínima posible en el punto de trabajo (aquí 1300 nm).

Otras aplicaciones de acopladores incluyen sistemas de longitudes de onda duales como instrumentos de medida, transmisión de datos por canal dual y, más recientemente, amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA) en circuitos de largo alcance o sistemas de bucle local, empleando

división de potencia y amplificación óptica pasiva para un gran número de abonados.

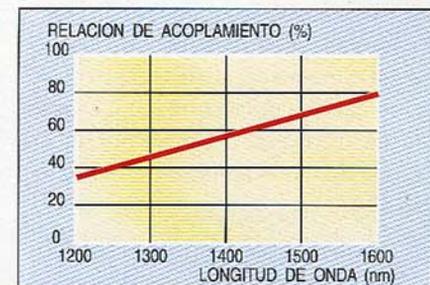


Figura 2 - Relación de acoplamiento frente a longitud de onda en un divisor de potencia de 3 dB.

Los multiplexores por división en longitud de onda (WDM) de dos o más longitudes de onda se producen por diferentes formas de espaciamiento de canal. La atenuación de exceso típica está por debajo de 0,1 dB. La pérdida de inserción es inferior a 0,2 dB en un intervalo de ± 20 nm de la longitud de onda central.

Los amplificadores de fibra dopada con erbio están encontrando un uso creciente en sistemas optoelectrónicos. La potencia de bombeo y de señal

se acoplan en una fibra común dopada con erbio. El proceso de amplificación láser permite amplificación de bajo ruido, puramente óptica. Se están investigando acopladores de baja atenuación para reducir la energía de fuga.

En las aplicaciones de longitudes de ondas duales se necesitan frecuentemente acopladores independientes de la longitud de onda (WIC). La independencia de longitud de onda se consigue fusionando fibras diferentes. Así se puede conseguir cualquier relación de acoplamiento.

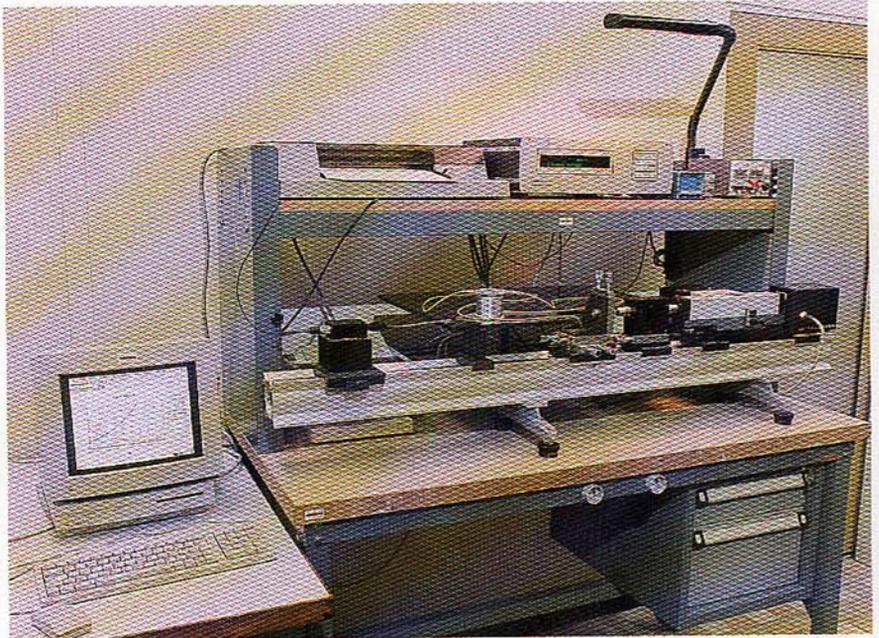
Los acopladores monomodo 3×3 se emplean en el campo de la comunicación óptica coherente o en instrumentos de medida, p. ej., giroscopios. Se han fabricado acopladores planares 3×3 con una atenuación de exceso mejor de 0,1 dB y una relación de acoplamiento de $32 \pm 1,5\%$.

Los acopladores monomodo 1×7 ó 1×8 están ganando más importancia en la distribución de los próximos servicios ópticos telefónicos y de vídeo en el bucle local.

Alcatel Kabelmetal está involucrada en el European CECC Committee para normalizar dispositivos de ramificación pasivos. En la actualidad, el grupo de trabajo WG 27 del CECC está llegando a un acuerdo sobre el número de especificaciones detalladas.

Óptica integrada de óxido de silicio sobre silicio (Alcatel FACE Research Centre)

La tecnología de óxido de silicio sobre silicio es una derivación de la tecnología planar ampliamente usada en la fabricación electrónica. La principal ventaja de esta tecnología reside en su compatibilidad con los procesos de microelectrónica, y en la posibilidad de emplear el sustrato de silicio para retener y alinear las fibras con el dispositivo. Además, los cristales de silicio (100) orientados a lo largo de una dirección presentan una grabación preferencial, lo que permite la formación de ranurado en V rodeado por pla-



Medida de la atenuación espectral.

nos (111). Se puede realizar un control muy preciso de la ranura en V, tanto en profundidad como en anchura. Por ello, las fibras se pueden acoplar a los componentes de guíaonda solo con posicionar la fibra en la ranura en V, que da como resultado un proceso de acoplamiento fibra-guíaonda de bajo costo, eficaz y seguro. Esto al final significa un importante impacto en los

aspectos técnico-económicos en sistemas ópticos de fibras monomodo. Una ventaja posterior está representada por la posible hibridación en el mismo sustrato de circuitos integrados, detectores y fuentes, empleando las guíaondas como interconexiones ópticas entre las diferentes partes del circuito. Se puede realizar un módulo optoelectrónico muy compacto.



Medida de la atenuación de pérdida y de reflexión.

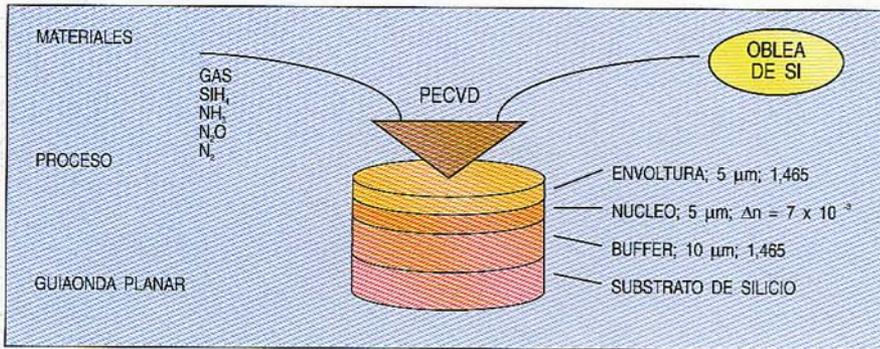


Figura 3 - Proceso de deposición de guíaonda de óxido de silicio.

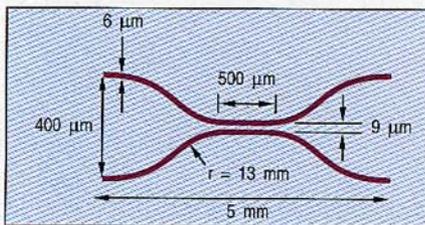


Figura 4 - Esquema de acoplador direccional.

Las capas de óxido de silicio se pueden depositar, de manera controlada, en el sustrato de silicio. Las guíaondas monomodo ópticas planares se pueden obtener depositando tres capas de SiO₂ con diferentes dopados. Las guíaondas de canal se pueden trazar sobre la capa depositada mediante grabación iónica reactiva. Se pueden elegir las características físicas del núcleo de la guíaonda para que sea totalmente compatible con las fibras, estando ambas constituidas por el mismo material. Se han demostrado guíaondas confinadas de atenuación muy pequeña.

Hasta hoy, gran parte del esfuerzo tecnológico de FACE se ha dedicado al desarrollo de un proceso de obtención de guíaondas ópticas de baja atenuación, a una longitud de onda de 1540 nm, usando dopado nitrogenado del núcleo de la guíaonda (Figura 3).

Se han grabado varias guíaondas de canal con proceso RIE (grabado por reacción de ión), empleando cromo como material de máscara y un proceso de despegue. La medida de la atenuación de propagación sobre guíaondas de canal muestra que se puede conseguir una atenuación por debajo de 0,5 dB/cm:

Se ha fabricado un conjunto de acopladores de 3 dB (Figura 4) usando el mismo proceso desarrollado en la fabricación de guíaondas de canal. La caracterización óptica de la relación de división se hizo a una longitud de onda de 1545 nm usando un láser de diodo. Una fibra monomodo conectada a un fotodiodo se acopló alternativamente a los dos puertos de salida. Los datos se recogieron usando como entrada cuatro puertos diferentes del dispositivo, y realizando la media de los resultados. Se demostró que el acoplamiento aumentó desde una potencia asimétrica de puerto de salida de 30/70 para dispositivos con una longitud de acoplamiento de 200 μm hasta una potencia asimétrica de 52/48 para muestras con longitud de acoplamiento de alrededor de 500 μm. Se observó en estos resultados una dependencia de la polarización no detectable.

Óptica integrada sobre vidrio (Alcatel Fibres Optiques)

El material de arranque es el vidrio; las etapas del proceso de fabricación consisten en microfotolitografía, intercambio doble iónico, corte de la oblea, conexión en espiral y encapsulado. El material de sustrato de vidrio debe de ser apropiado para asegurar guíaondas de baja atenuación, atenuación de interconexión baja, estabilidad y fiabilidad, y debe de ser compatible con los materiales de dopaje empleados en el intercambio iónico; la superficie de la oblea se enmascara de manera similar a la empleada en las técnicas de microelectrónica.

Las guíaondas planares se realizan por intercambio iónico Ti⁺/K⁺ a una temperatura cercana a los 770°K en un vidrio específico desarrollado por Alcatel Alsthom Recherche. Los procesos mejorados térmicos y eléctricos se uti-

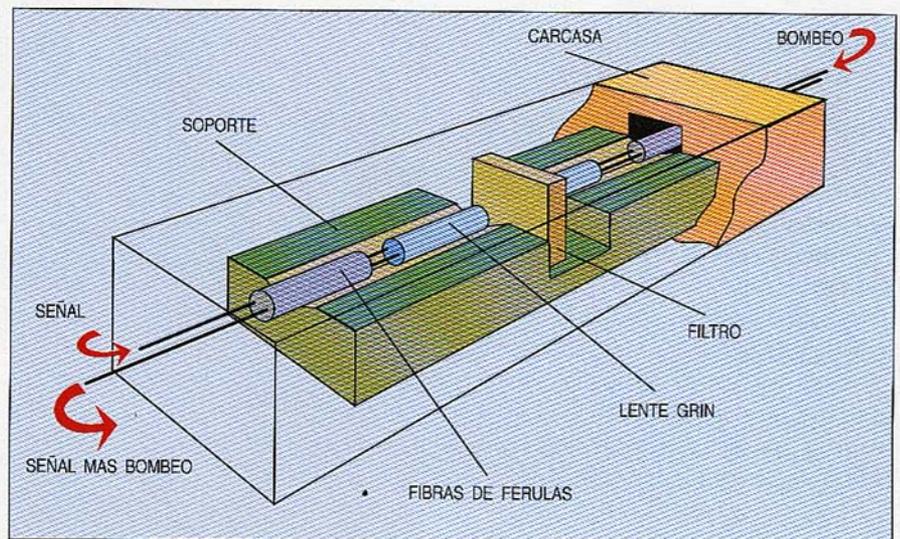


Figura 5 - Duplexor microóptico.

lizan para caracterizar los cambios del índice de refracción, la constante de interdifusión y la movilidad eléctrica.

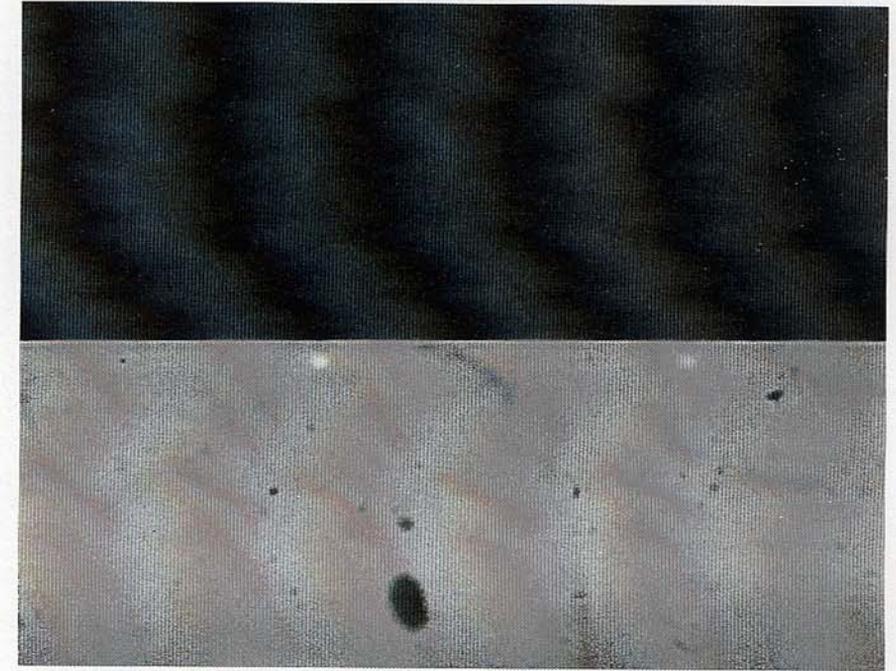
Las guíaondas por canal enterrado se realizan mediante un método de difusión en dos etapas. Durante la primera difusión, se permite el desplazamiento de los iones de talio en el vidrio a través de aperturas de $4\ \mu\text{m}$ en una máscara de titanio y la sustitución de los iones de potasio cerca de la superficie. Se elimina la máscara y se efectúa la segunda difusión en un campo eléctrico externo cercano a $50\ \text{V/mm}$. Se han realizado guíaondas enterradas monomodo, de $12\ \mu\text{m}$ de profundidad, que funcionan a una longitud de onda de $1300\ \text{nm}$ con una atenuación lineal de $0,2\ \text{dB/cm}$. El acoplamiento con una fibra monomodo crea una atenuación de exceso de $0,3\ \text{dB}$. Las pérdidas totales, incluyendo conexión en espiral y cubierta, de un divisor 1×8 es de $12,5\ \text{dB}$. El comportamiento térmico de dicho componente entre -20°C y $+60^\circ\text{C}$ es satisfactorio.

Tecnologías de microóptica (Alcatel Alsthom Recherche)

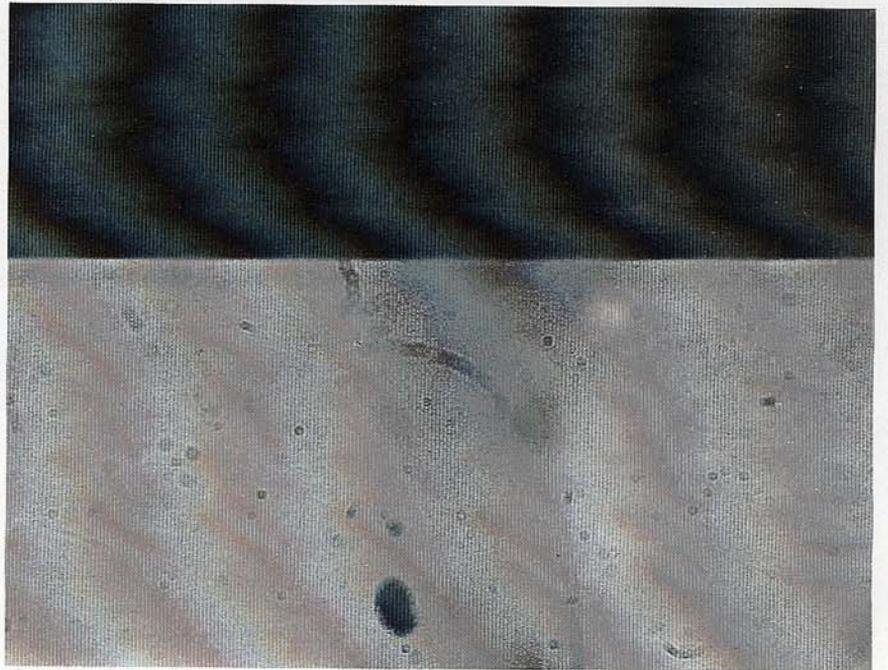
Los dispositivos pasivos se obtienen ensamblando componentes discretos sobre un soporte común. El rendimiento de un dispositivo se determina por la eficacia de cada componente y depende mucho de:

- el esquema y diseño
- los materiales de soporte: coeficiente termal de expansión, propiedades mecánicas, solidez, estabilidad superficial, resistencia a la corrosión
- las tecnologías de ensamblaje: soldadura, pegado, disposición mecánica.

La flexibilidad de esta tecnología, disponible en la actualidad, se adapta para producir dispositivos con especificaciones rigurosas. Las restricciones en el desarrollo a gran escala en el futuro serán su alto coste, los limitados métodos de producción en masa y los límites en la escala de integración.



Guíaondas ampliadas 200 veces.



Guíaondas ampliadas 500 veces.

El amplificador/duplexor de fibra óptica del futuro TAT 12 (Figura 5) en estudio dentro de Alcatel Alsthom Recherche se realizará empleando esta tecnología. Ello garantiza el rendimiento óptico, la reproductibilidad y la fiabilidad requerida en los enlaces submarinos.

El soporte se realiza en un material de vidrio cerámico que proporciona unas características dimensionales de alta precisión, una muy buena estabilidad superficial y un excelente comportamiento frente a la corrosión. Con este tipo de material, se pueden adoptar dos métodos de ensamblaje: pega-

do ó mecánico. La elección del pegado debe de ser compatible con las especificaciones de los amplificadores submarinos.

Tecnologías de películas de polímeros

Se han considerado a los polímeros como un posible material para los dispositivos activos y pasivos. Aún se encuentran en fase de investigación. Sus ventajas son muy atractivas: simplificación de los procesos de fabricación, apropiados para una producción en masa de bajo coste, procesamiento de grandes áreas, deposición sobre cualquier sustrato, implantación de estructuras de guíasondas multicapa. Los inconvenientes se relacionan con su duración, inestabilidad térmica y atenuaciones ópticas.

Conclusiones

Alcatel está involucrada en la mayoría de las tecnologías avanzadas relacionadas con dispositivos y fibras ópticas, tanto en producción como en desarrollo.

Con el bien conocido proceso MCVD se obtienen fibras con un rendimiento equiparable al mejor. La nueva tecnología de plasma es muy prometedora.

Los procesos y las tecnologías adaptadas a la producción de dispositivos y componentes pasivos son muy variados:

- ensamblaje de microóptica
- fibra reducidas por fusión
- ópticas integradas sobre vidrio
- ópticas integradas con óxido de silicio sobre silicio
- ópticas integradas sobre películas de polímeros.

La dos primeras tecnologías, ensamblaje de microóptica y fibra reducida por fusión, están en la actualidad preparadas para producir los componentes activos y pasivos necesarios en las aplicaciones existentes y a corto

plazo: duplexores, acopladores, divisores, y acopladores que mantienen la polarización.

Estas tecnologías presentan algunas limitaciones. La microóptica es un proceso caro, incompatible con un proceso de producción en masa o con una integración híbrida grande. La técnica de fibra reducida por fusión se limita a acopladores y divisores, y no es adaptable a la integración.

Las ópticas integradas sobre sustrato de vidrio, óxido de silicio sobre silicio y polímeros tienen un potencial mayor. La mejor de ellas, para aplicaciones a medio plazo, debería ser la óptica integrada de óxido de silicio sobre silicio. El proceso es muy adaptable a la fabricación de componentes elementales o estructuras híbridas complejas apropiadas para comunicaciones fotónicas, especialmente los nuevos sistemas de "transconmutación".

Robert Jocteur nació en 1933 en Lyon, Francia. Se graduó en la Universidad de Lyon con un MS en matemáticas y física. Ingresó en Les Câbles de Lyon, ahora Alcatel Cable, para hacerse cargo de la investigación de cables de cobre para telecomunicaciones. En 1974 comenzó a trabajar en la tecnología de cables de fibra óptica, y en 1983 asumió la responsabilidad para el desarrollo de fibras ópticas submarinas. El Sr Jocteur es en la actualidad Director Técnico del Departamento de Telecomunicaciones de Alcatel Cable.

Jean Pierre Dumas graduado como ingeniero en la Ecole Nationale Supérieure de Céramique Industrielle, y en el Institut National des Sciences and Techniques Nucléaires con el Diplôme d'Etudes Approfondies en Métallurgie Spéciale. Ingresó en el Comisariado para la Energía Atómica de Saclay en 1962, dentro del departamento de metalurgia. En 1966, pasó a CGT (Compagnie Générale d'Electricité), ahora Alcatel Alstom, como ingeniero del centro de investigación de la compañía, responsable del Crystal Growth Group hasta 1971. Pasó al centro de estudios industriales de la compañía, siendo asistente del Jefe de la división de Materiales de los Laborato-

rios de Marcoussis en 1973. Desde 1976 hasta 1991 fue sucesivamente Director de las divisiones de Materiales, de Fotónica y Materiales y de Energía y Materiales de los Laboratorios de Marcoussis, ahora Alcatel Alstom Recherche. Desde 1991 es Director de las actividades de Energía y Materiales de Alcatel Alstom Recherche.

Progresos en amplificación óptica

J. Augé, J. Chesnoy
P.-M. Gabla
A. Weygang

Alcatel Alsthom Recherche, Marcoussis, Francia
Alcatel CIT, La Ville du Bois, Francia
Alcatel SEL Research Center, Stuttgart, Alemania

La aparición de los amplificadores ópticos dopados con erbio ha iniciado una revolución en las comunicaciones ópticas, abriendo nuevas posibilidades en las áreas de transmisión a alta velocidad y gran distancia, distribución de video analógico y conmutación óptica.

Introducción

La sustitución de los sistemas optoelectrónicos complejos por amplificadores ópticos transparentes para compensar las pérdidas de propagación o de distribución ha sido durante largo tiempo un sueño en el campo de las comunicaciones ópticas. Los fundamentos de la amplificación óptica nacieron con el descubrimiento del láser (luz amplificada por radiación de emisión estimulada) en los años sesenta, no obstante, las soluciones prácticas para telecomunicaciones aparecieron recientemente con la madurez de la tecnología de las fibras y de los componentes optoelectrónicos. En la amplificación óptica se podrían utilizar muchos de los efectos no lineales (tales como Raman estimulado, dispersión de Brillouin o amplificación paramétrica), pero fue el propio efecto láser el que condujo más rápidamente a soluciones prácticas que culminaron con la aparición en los años ochenta del amplificador láser semiconductor y del amplificador de fibra dopada de erbio (EDFA) en 1987. Esta última solución se reveló pronto como la más prometedora y la explosión de las actividades investigadoras sobre ella en todas las compañías importantes de telecomunicaciones ha llevado en pocos años al desarrollo de la fabricación.

Los amplificadores ópticos se usan en sistemas de transmisión por fibra óptica para mejorar la ganancia del sistema, lo que permite una mayor distancia entre repetidores en enlaces punto a punto o un aumento del factor de compartimiento de un diodo láser en los sistemas de distribución. Básicamente se distinguen tres tipos diferentes de amplificador óptico, según se localice en la red (Figura 1).

Los amplificadores elevadores de potencia o postamplificadores aumentarán la potencia óptica acoplada en el lado del transmisor, los preamplificadores mejorarán la sensibilidad de los receptores ópticos y los amplificadores de distribución en la línea compensarán las pérdidas de distribución de la fibra. Cada tipo de amplificador óptico tiene diferentes requisitos y necesita ser optimizado consecuentemente (Tabla 1).

Un amplificador elevador de potencia de fibra dopada de erbio puede

emitir una potencia óptica mayor de 50 mW, aumentando aproximadamente una vez la potencia óptica del láser transmisor.

Los receptores de detección directa con preamplificadores y filtros ópticos son casi tan buenos como los receptores para esquemas FSK de detección heterodina y la ventaja de los amplificadores ópticos aumenta con la velocidad de transmisión si se compara con los receptores convencionales basados en fotodiodos PIN y APD. Por encima de los 2 Gbit/s, la mejora es cercana a diez veces la de la detección directa sin amplificador óptico.

Amplificador óptico: características básicas

Amplificadores de fibra dopada de erbio
La Figura 2 muestra la configuración básica de un amplificador de fibra dopada de erbio. El medio amplificador es una fibra dopada con una cantidad muy pequeña de un ion de tierra rara, erbio, que tiene una transición láser en la ventana de longitud de onda de comunicaciones ópticas de 1,55 μm . Para inducir ganancia en la fibra dopada, la transición láser se bombea ópticamente mediante un diodo láser, la potencia óptica de bombeo se combina en el interior del núcleo de la fibra mediante un acoplador dicróico, el multiplexor de longitud de onda. Es de gran interés en esta configuración de amplificador su compatibilidad con la fibra: se puede empalmar directamente a la fibra de telecomunicación con pérdidas muy bajas (alrededor de 0,5 dB), o a otros componentes de la fibra.

Entre las bandas de absorción del ion de erbio disponibles existen dos longitudes de onda verdaderamente

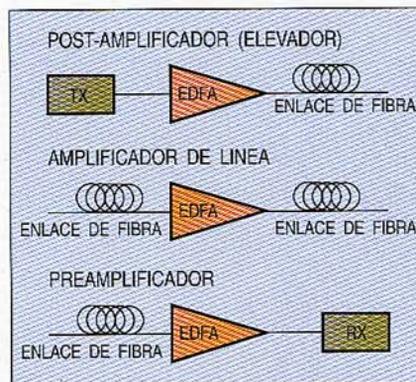


Figura 1 - Dependiendo de su posición en la red, un amplificador óptico es un post-amplificador (elevador de potencia) que incrementa la potencia de salida del transmisor (TX), un amplificador de línea que une dos redes de fibra o un preamplificador óptico situado frente al receptor (RX).

Tipo de amplificador	Principal requisito	Limitación
Amplificador elevador	Potencia de salida alta (P_{opt} max. $\sim + 15$ dBm)	comportamiento de fibra no lineal
Amplificador en línea	Ruido y consumo de potencia eléctrica bajo	Ruido impulsivo de la señal espontánea (~ 200 EDFA en cascada)
Pre-amplificador	Ruido bajo	Emisión espontánea amplificada (ASE)

Tabla 1 - Tipos de amplificadores ópticos para aplicaciones.

excelentes: 1,48 μm y 0,98 μm . Esta apreciación se basa en la viabilidad del diodo láser de bombeo y en el comportamiento de amplificación. La eficiencia de bombeo y las propiedades de ruido son dos parámetros intrínsecos de la fibra con los que comparar estas dos longitudes de onda. Se ha desarrollado un análisis teórico de los EDFA para describir totalmente su comportamiento¹.

La Figura 3 muestra la evolución de la ganancia de una pequeña señal medida a 1,55 μm en función de la potencia de bombeo acoplada a 1,48 μm y 0,98 μm . Para obtener estas altas eficiencias de ganancia, las fibras dopadas de erbio específicas diseñadas en Alcatel Alsthom Recherche² tienen un diámetro modal muy pequeño (típicamente 4 μm) comparado con el

de una fibra de telecomunicación monomodo estándar (11 μm).

Como elementos de ganancia, los EDFA ofrecen muchas características interesantes:

- longitud de onda de operación en la ventana de transmisión de 150 nm de la fibra de bajas pérdidas con una amplia anchura de banda (35 nm)
- alta ganancia (≥ 30 dB) y gran potencia de salida de saturación (≥ 10 dBm) definida como ganancia en el punto de compresión de 3 dB
- propiedades de ruido bajo medido (como en electrónica) por una figura de ruido, que intrínsecamente está cerca del límite teórico (3 dB), con una contribución muy

pequeña de las pérdidas del empalme de entrada

- alta velocidad de respuesta. Se han utilizado con un EDFA señales digitales de hasta 100 Gbit/s
- inmunidad a la diafonía y distorsión. Se mantiene una perfecta linealidad por encima de 100 kHz en un amplificador muy saturado
- ganancia insensible a la polarización.

Al ser capaz de funcionar en condiciones de saturación y con un gran margen dinámico frente a la potencia de entrada del amplificador, éste es extremadamente atractivo para líneas de enlaces de alta velocidad, redes de distribución multicanal y sistemas de distribución de video analógico. Ya bien adaptados para aplicaciones de sistemas digitales, los EDFA se ha mostrado también útiles en sistemas de distribución en el bucle de abonado de banda ancha al compensar las pérdidas de derivación de la señal óptica.

La Figura 4 muestra el esquema de un amplificador optimizado para aplicación como elevador de potencia con un diodo láser de bombeo de 1,48 μm en cada extremo de la fibra dopada de erbio. Este bombeo bidireccional permite duplicar la potencia de salida. La eficiencia de conversión de bombeo a

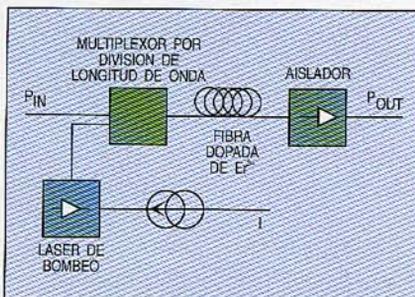


Figura 2 - Esquema básico de un amplificador de fibra dopada de erbio. La señal de entrada (PIN) se combina en el interior de la fibra con la potencia óptica de bombeo mediante un multiplexor de división de longitud de onda (WDM). Se necesita en la mayoría de los casos un aislador óptico opcional para evitar la realimentación óptica y la oscilación del láser.

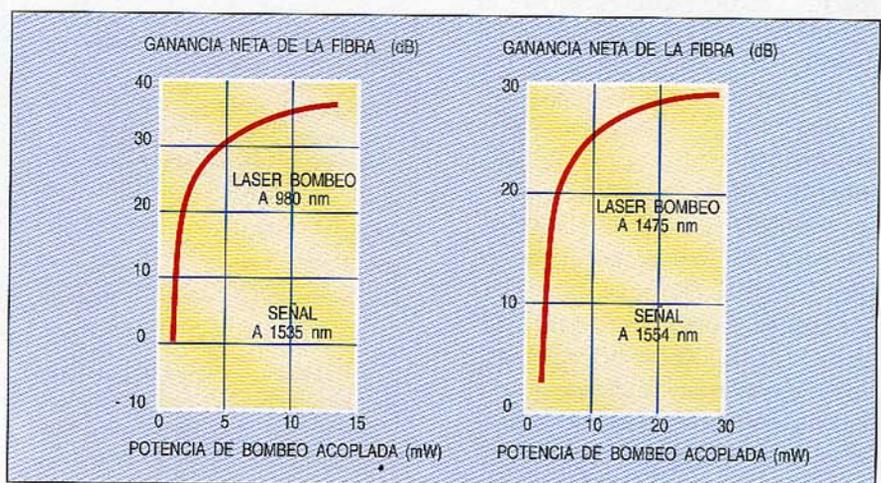


Figura 3 - Ganancia de señal pequeña de la fibra dopada de erbio en función de la potencia de bombeo para las longitudes de onda de bombeo 0,98 μm y 1,48 μm .

señal en la fibra dopada puede llegar al 88% para un bombeo a $1,48 \mu\text{m}^3$, alcanzando una potencia de salida próxima a 100 mW con dos diodos de bombeo que pueden emitir potencias de salida mayores de 50 mW cada una⁴.

Para otras aplicaciones, como la amplificación en línea o la preamplificación, se puede optimizar el diseño del amplificador óptico de acuerdo a las especificaciones requeridas (ver mas adelante ejemplos de aplicaciones).

Amplificadores ópticos semiconductores

La Figura 5 representa un diagrama esquemático de un amplificador óptico semiconductor. El chip del láser semiconductor está cubierto con una capa antirreflectiva (para prevenir la oscilación láser) y está insertado entre las fibras de entrada y salida. La ganancia se obtiene mediante bombeo eléctrico.

Comparados con los amplificadores de fibra dopada de erbio, los amplificadores ópticos semiconductores (SCOA) son una alternativa interesante por su pequeño tamaño, bajo consumo de potencia, compatibilidad con la integración y bajo coste esperado en la producción masiva.

Sin embargo, es difícil obtener tecnológicamente a la vez alta ganancia, insensibilidad a la polarización, ausencia de "rizado de ganancia" con la longitud de onda, baja figura de ruido y bajas pérdidas de acoplamiento, por lo que la comercialización de dispositivos con prestaciones satisfactorias está bastante más lejos que la de los amplificadores de fibra. No obstante, recientemente se han anunciado impresionantes resultados de amplificadores semiconductores con ganancias fibra a fibra mayores de 20 dB, con sensibilidad a la polarización y rizado de ganancia limitados⁵.

La principal limitación que se ha encontrado en los amplificadores ópticos semiconductores es la distorsión de las señales en la región de saturación debido al corto tiempo de recuperación de la ganancia. Esta limitación se puede convertir en una ventaja ya que la ganancia del amplificador se puede

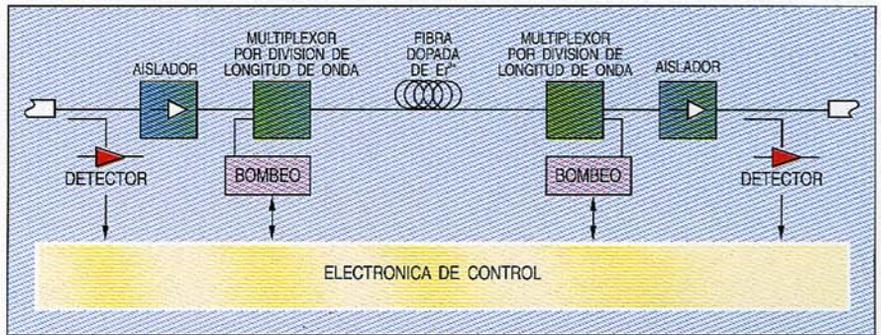


Figura 4 - Diseño de una configuración práctica de un elevador de potencia de un EDFA con bombeo bidireccional por dos diodos. La medida de las potencias de entrada y salida da acceso a la ganancia interna. Esta tarjeta óptica tiene interfaz con la electrónica de control.

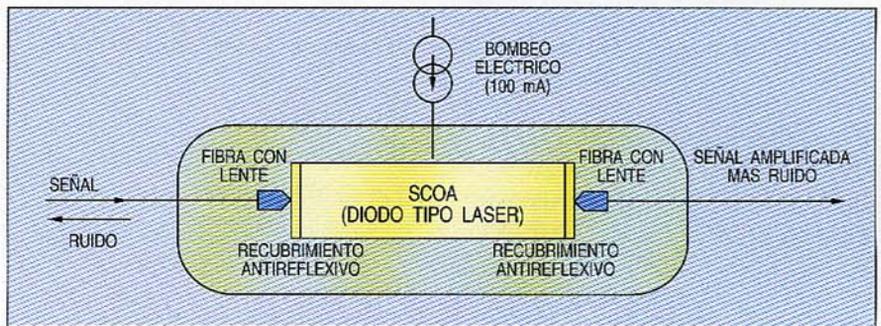


Figura 5 - Configuración básica de un amplificador óptico semiconductor.

modular a muy alta velocidad mediante una orden eléctrica (Figura 6). Estas puertas ópticas pueden ser de interés para el procesado óptico en aplicaciones tales como la conmutación óptica. La posibilidad de integración en circuitos optoelectrónicos integrados (OEIC) y la potencial ganancia a cualquier longitud de onda (p. ej., $1,3 \mu\text{m}$) son también muy atractivos.

Resultados experimentales

Los primeros resultados experimentales con los EDFA se publicaron en septiembre de 1989, mientras que en Alcatel se aplicaron en 1989 en sistemas de líneas de alta velocidad para enlaces terrestres. La longitud del enlace de un sistema de transmisión por fibra óptica a 5 Gbit/s se incrementó desde 111 Km a 148 Km de fibra de dispersión desplazada, utilizando un EDFA en línea con ganancia de 12,6 dB⁶. El amplificador utilizó una fibra dopada de erbio de 4 m bombeada por un láser de Kriptón, con una potencia de 150 mW a una longitud de onda de 531 nm. El mismo

año, se construyó un enlace de 98 Km de fibra de dispersión desplazada con un EDFA en línea de 20 dB de ganancia. Este amplificador se bombeó con un láser de estado sólido de titanio/zafiro a una longitud de onda de 980 nm. A comienzos de 1990, se esta-

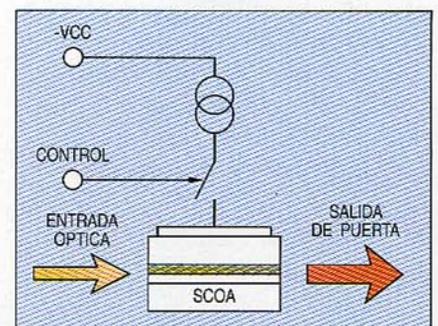


Figura 6 - Puerta óptica mediante amplificadores ópticos semiconductores: Los amplificadores ópticos semiconductores operados en la región de ganancia-conmutación son dispositivos atractivos, que se caracterizan por:

- tiempos de encendido y apagado de subnanosegundos
- ganancia inherente en el margen de 10 dB netos
- ser compactos, integrables, bajo consumo de potencia (<100 mA).

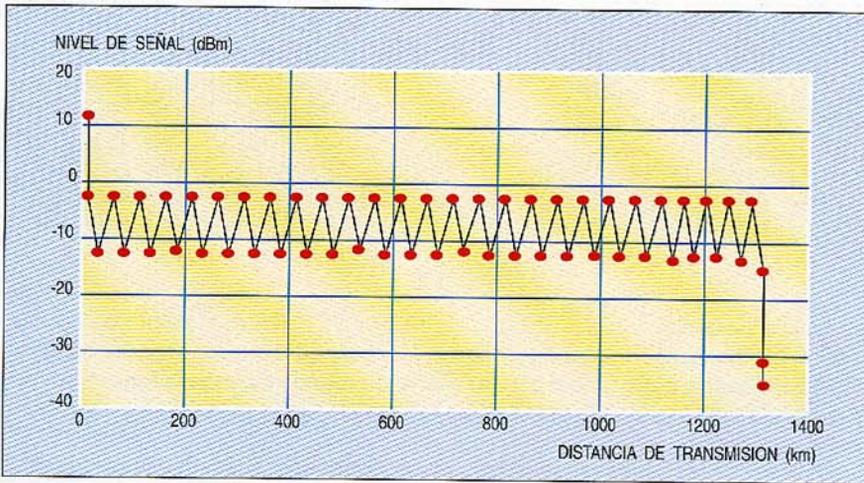


Figura 7 - Diagrama del nivel de potencia en el sistema de transmisión de 1316 Km.

realización basada en repetidor electroóptico, la sensibilidad del receptor se mantiene en $-34,2$ dBm para una tasa de error (BER) de 10^{-9} . El balance de potencia total, incluyendo longitudes de fibra y atenuadores, es de 318 dB.

Preamplificador digital

En esta aplicación, el preamplificador óptico, que incluye un filtro óptico, amplifica la potencia de la señal antes del fotodiodo, por lo que el ruido térmico en los circuitos eléctricos del receptor tiene una pequeña influencia en la sensibilidad del receptor si se compara con los factores de los que depende la relación señal-ruido, tales como el ruido impulsivo de la señal y la relación señal-ruido derivado de la amplificación de emisión estimulada (ASE). El preamplificador óptico se considera optimizado cuando la relación señal-ruido ASE es el factor dominante. Evaluaciones teóricas muestran que se necesita un preamplificador con una ganancia fibra-fibra de 25 dB y un filtro óptico de anchura de banda del doble de la velocidad de transmisión para llegar cerca de una sensibilidad limitada de la relación señal-ruido ASE.

Se ha experimentado con receptores preamplificados con EDFA a 622 Mbit/s y a 2,3 Gbit/s. Se probaron las longitudes de onda de bombeo de 1480 y 980 nm⁹. El preamplificador incluía aisladores ópticos para protegerlo contra las reflexiones de elementos discretos y la retrodifusión Rayleigh de la línea de fibra. El pream-

bleció un enlace de transmisión de 20 Gbit/s (2x10 Gbit/s multiplexados por división en el tiempo ópticamente) de 115 Km de fibra de dispersión desplazada, incluyendo un amplificador elevador de potencia con una potencia de salida de +6 dBm y un EFDA en línea de 16,5 dB de ganancia⁷.

Ambos amplificadores se bombearon mediante láseres de estado sólido a 980 nm con potencias de bombeo de 70 mW y 38 mW.

A continuación se describen algunos ejemplos de sistemas realizados por Alcatel.

Transmisión no regenerada a ultra larga distancia con amplificadores de fibra dopada de erbio en cascada

Se ha realizado un experimento de transmisión no regenerada de 1316 Km a 2,5 Gbit/s con detección directa de modulación de intensidad

(IM-DD)⁸. El enlace constaba de un transmisor con láser de realimentación distribuida (DFB) que emitía a 1553 nm, modulado externamente, seguido por postamplificador EDFA, un atenuador y una bobina de fibra de 50 Km; 26 secciones idénticas con un EDFA y una bobina de aproximadamente 50 Km de fibra; un receptor de fotodiodo de avalancha precedido de un atenuador y un filtro óptico. Los EDFA en línea se bombearon en direcciones contrarias a 1480 nm y no incluían ningún filtro óptico. Las fibras eran del tipo de dispersión desplazada, con una longitud de onda media de dispersión cero de 1553,6 nm. La potencia de bombeo en cada EDFA se ajustó para que la potencia de la señal de salida fuese de -2 dBm. El nivel de potencia obtenido se muestra en la Figura 7. No hay penalidad en la transmisión después de 1316 Km si se compara con una

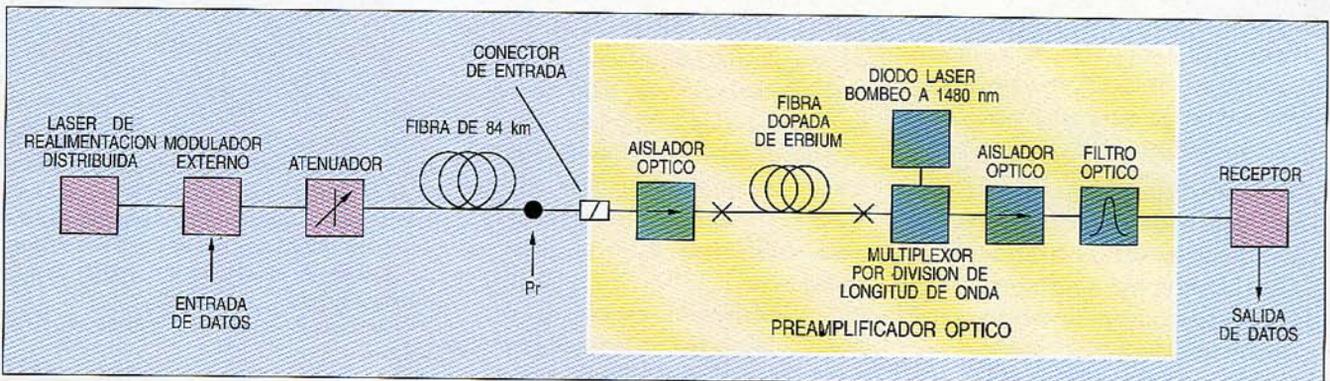


Figura 8 - Montaje experimental para evaluación del receptor preamplificado.

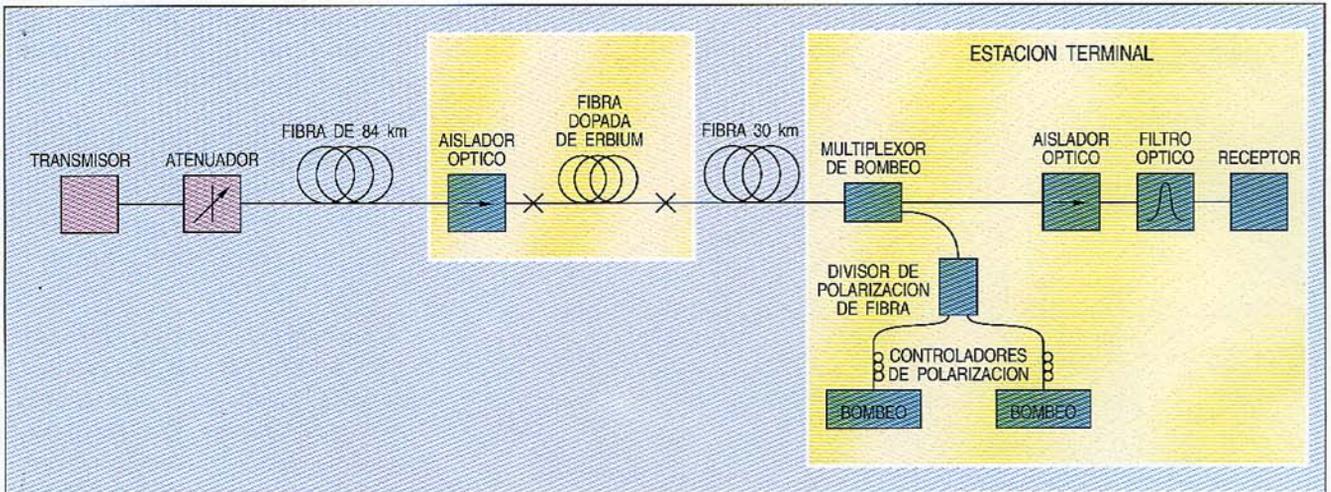


Figura 9 - Montaje experimental para evaluación del amplificador bombeado remotamente.

plificador bombeado a 1480 nm se caracterizó con un esquema de bombeo contrario a la señal, una ganancia fibra a fibra de 23,8 dB y un parámetro de ruido (n_{sp}/C_1) de 4 dB. En la Figura 8 se muestra el montaje experimental. En el preamplificador bombeado a 980 nm, el esquema de bombeo es codireccional, la ganancia fibra a fibra de 23,7 dB y el parámetro de ruido de 2 dB. La sensibilidad del receptor preamplificado PS_1 se especificó a la entrada del conector.

La sensibilidad de entrada al receptor fue de -47,7 dBm a 622 Mbit/s y -40,7 dBm a 2,3 Gbit/s, para el preamplificador bombeado a 1480 nm. En el preamplificador bombeado a 980 nm, la sensibilidad es de -49,6 dBm a 622 Mbit/s y de -43,3 dBm a 2,3 Gbit/s. Las sensibilidades conseguidas, especialmente con 980 nm, llegan a ser muy próximas a las sensibilidades conseguidas en sistemas prácticos de detección coherente, pero la implantación del sistema de detección directa preamplificado ópticamente es bastante más fácil.

Amplificador digital bombeado remotamente

Esta aplicación se deriva de la preamplificación, donde se advirtió la existencia de un valor mínimo de la ganancia del EDFA para conseguir la sensibilidad del receptor. La idea es poner el amplificador alejado del

receptor e inyectar el bombeo desde el terminal receptor. Cuando el bombeo que llega a la fibra amplificadora tiene la potencia adecuada para generar la suficiente ganancia, la potencia necesaria a la entrada del amplificador se mantiene constante para conseguir en el receptor una tasa de error de 10^{-9} . La mejora en la distancia de transmisión es, por tanto, igual a la distancia entre amplificador y terminal receptor, que es directamente dependiente de la potencia de bombeo disponible en el terminal.

La Figura 9 muestra el montaje del experimento¹⁰. El módulo de bombeo en el terminal se compone de dos diodos láser de bombeo a 1480 nm encapsulados cuyas potencias de salida se suman mediante multiplexación de polarización. Se ajustan sus polarizaciones con controladores de polarización manual antes de entrar al divisor de polarización de fibra. La potencia de bombeo total que se inyecta en el

multiplexor puede ser tan alta como 125 mW. El filtro óptico del receptor tiene una anchura de banda de 0,16 nm y el receptor de APD tiene una sensibilidad base de -33 dBm a 2,3 Gbit/s. La fibra de 30 Km tiene unas pérdidas (incluyendo conectores) de 7,9 dB a 1554 nm y 8,8 dB a 1480 nm.

Si se emplean 30 Km de fibra, hay que incluir un aislador a la entrada de la fibra dopada de erbio para prevenir la degradación de la señal inducida por la retrodifusión de Rayleigh. Así, la ganancia del enlace útil está alrededor de 8 dB, que se corresponde con casi 40 Km de fibra estándar.

Combinando este amplificador EDFA remotamente bombeado con un postamplificador EDFA a la salida del transmisor, se consigue un balance de potencia de 63 dB a 2,3 Gbit/s. Esto permitiría una distancia de transmisión sin repetidor de 350 Km usando una fibra de núcleo de sílice pura de

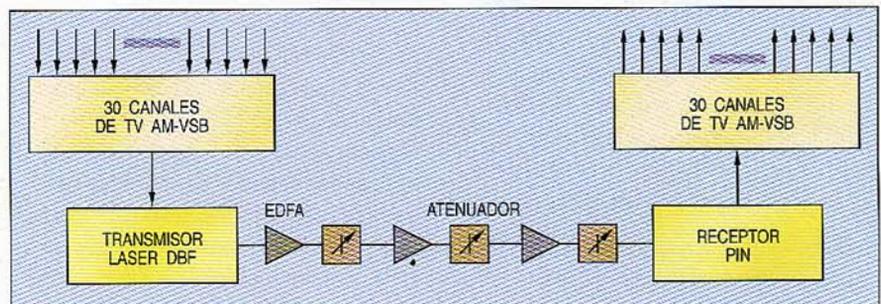


Figura 10 - Sistema de distribución multicanal analógico AM-VSB con tres EDFA en cascada.

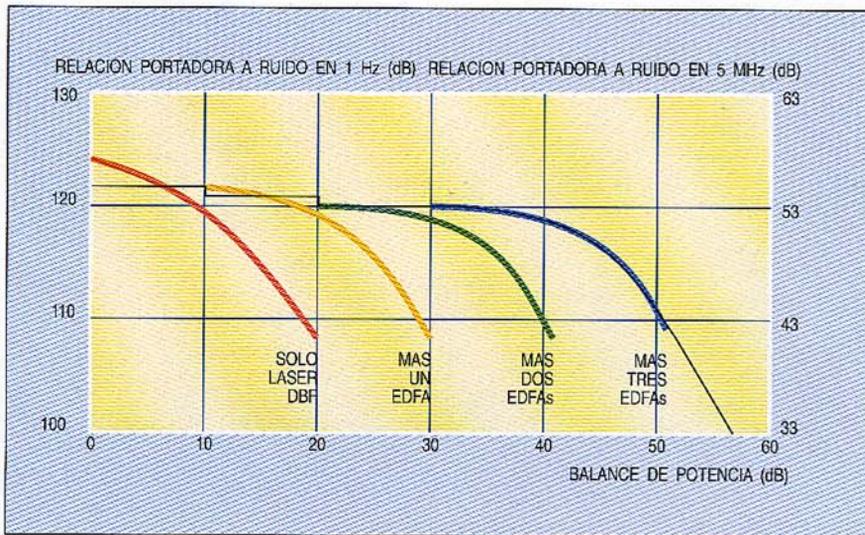


Figura 11 - Relación señal-ruido frente al balance de potencia total.

0,18 dB/Km. A 622 Mbit/s, el balance de potencia alcanzado es de 70 dB.

Postamplificador y repetidores analógicos

Se experimentó con tres EDFA en cascada en un sistema de distribución de TV AM-VSB de 30 canales. El montaje se muestra en la Figura, 10. El transmisor es un láser DFB con un aislador, que emite +3 dBm a 1561 nm, directamente modulado con un índice de modulación por canal del 6%, caracterizado por un ruido de intensidad relativo de -152 dBs, un armónico compuesto de segundo orden de -61 dBc y uno compuesto triple de -65 dBc. El receptor PIN se caracteriza por un ruido térmico de alrededor 5 pA/√Hz. Los EDFA se bombean bidireccionalmente a 1480 nm. La potencia de bombeo inyectada en la fibra dopada de erbio es mayor de 40 mW por lado en cada uno de los amplificadores. La potencia de salida de dichos amplificadores con +3 dBm de entrada es superior a +15 dBm. Debido a la propia optimización estructural de los EDFA, el parámetro de ruido (n_{sp}/C_1) permanece por debajo de 5dB aun en esta condición altamente saturada.

Se colocaron los atenuadores primero y segundo de manera que la potencia de entrada al segundo y tercer amplificador EDFA fuese de +5 dBm,

para minimizar la contribución de ruido de estos amplificadores. La Figura 11 muestra la relación portadora a ruido (CNR) en función del balance de potencia, medido con el láser DFB solamente, y con uno, dos y tres EDFA insertados en el enlace. Se puede ver claramente en la figura 11 que cada EDFA aumenta el balance del enlace aproximadamente en su valor neto de la ganancia, es decir, casi 10 dB. Esta conclusión es válida en tanto el valor máximo del CNR, medido a potencia recibida alta, sea razonablemente superior al valor definido como objetivo del sistema (48, 50 ó 52 dB, dependiendo de la arquitectura del sistema). Se puede conseguir este objetivo para 48 y 50 dB como valores del CNR. Sin embargo, como el valor máximo del CNR después del tercer EDFA es de solamente 53 dB, un CNR final de 52 dB proporciona una reducida ganancia de enlace por el tercer amplificador.

En otra aplicación similar, la TV analógica, las señales (47 MHz a 450 MHz) se distribuyeron en una disposición de sistema con tres EDFA en cascada y divisores de potencia óptica pasivos utilizando un factor de división de 16 en cada etapa, lo que llevó a un factor de compartimiento total del láser de 4096. El sistema incluía 3 Km de fibra monomodo estándar sin compensación de la distorsión inducida por la

dispersión, pero cumpliendo los requisitos de CSO, CTB y S/N de la administración alemana (CNR de 46 dB en recepción).

Los tres EDFA fueron bombeados con diodos láser en disposición de propagación contradiagonal y con niveles de potencia entre 27 mW y 43 mW.

Los aisladores ópticos se insertaron en los dos primeros EDFA, entre las salidas del amplificador y los divisores de potencia para evitar la degradación de la relación S/R debido a la luz reflejada. Adicionalmente, se han realizado experimentos de transmisión con un total de nueve conectores ópticos de baja reflexión y con unas pérdidas medias de inserción de 0,9 dB por conector.

Distribución de canales de TV digital

Se ha hecho una demostración de la distribución de 60 canales de TV digital de 140 Mbit/s cada uno, con dos EDFA en línea bombeados con diodo láser, para compensar las pérdidas de distribución, más un preamplificador EDFA seguido de un fotodiodo PIN, un amplificador principal electrónico, un circuito de decisión y un recuperador de reloj. En el transmisor óptico se utilizó un diodo láser de alta velocidad del tipo MQW (pozo cuántico múltiple) y se transmitieron las señales sobre 2,3 Km de fibra monomodo estándar. La distribución de las señales de TV se llevó a cabo mediante tres conjuntos de divisores de potencia ópticos dando un factor de compartimiento total de 262144.

El preamplificador EDFA incluía un diodo láser de bombeo a 980 nm, un acoplador selectivo de longitud de onda de fibra fundida, once metros de fibra dopada de erbio y trabajaba en configuración de contrapropagación sin aislador óptico. La potencia de entrada al receptor fue de -20,75 dBm, dando como resultado una tasa de error de $3,8 \times 10^{-10}$.

Recientemente también se demostró la distribución simultánea de señales analógicas y digitales¹¹.

Conclusiones

Con la llegada de los amplificadores de fibra dopada de erbio en 1987 comenzó una revolución en las comunicaciones ópticas. La actividad de los equipos de investigación de Alcatel llevará al desarrollo comercial de los nuevos sistemas en un futuro cercano. Se espera que en las áreas de comunicaciones submarinas, sistemas de transmisión terrestre de alta velocidad y distribución de video analógico los sistemas basados en amplificadores de fibra dopada de erbio estarán disponibles antes de 1995.

Para aplicaciones a más largo plazo, una consecuencia indirecta de la disponibilidad de amplificadores de fibra dopada de erbio es abrir la oportunidad de explotación de la propagación no lineal de señales ópticas y en particular de los solitones ópticos, que son señales ópticas que se propagan en la práctica indefinidamente sin distorsión. Los primeros resultados en propagación de solitones a largo alcance se consiguieron en Alcatel Alsthom Recherche. Así, como ejemplo, empleando un láser ajustable de cavidad externa se implantó una transmisión de solitones sobre 8000 Km de fibra de dispersión desplazada a través de un bucle amplificado. La frecuencia de repetición fue de 2,4 GHz y el producto anchura de banda- tiempo 0,55 para una anchura de impulsos de 45 ps. Se esperan importantes mejoras para aumentar la velocidad, especialmente con láseres de solitones de conmutación de ganancia, en estudio en la actualidad.

La investigación actual en amplificación óptica está también explorando nuevos campos. Se puede citar el posible desarrollo de amplificadores de fibra en otras ventanas de longitud de onda, como la de 1,3 μm . También se pueden esperar amplificadores dopados de erbio miniaturizados usando

óptica integrada. Lo más probable es que con la amplificación óptica ocurra una nueva revolución en el campo de la conmutación óptica, utilizando componentes optoelectrónicos y, en particular, amplificadores semiconductores montados en placas ópticas de silicio, que conducirá al nuevo concepto de híbridos ópticos.

Referencias

- 1 J.F. Marcerou, H.Fevrier, J.Ramos, J.Augé y P.Bousselet: SPIE 90, San José, artículo invitado, 1373-18, págs 168—166, Septiembre 1990.
- 2 J.Augé, J.F. Marcerou, H.Fevrier, C.LeSergent y P.Dupont: ECOC'90, Amsterdam, págs 95—98.
- 3 J.Augé, B.Clesca, B.Biotteau, P.Bousselet, A.Dursin, C.Clergeaud, P.Kretzmeyer, V.Lemaire, O.Gautheron, G.Grandpierre, E.Leclerc y P.Gabla: "Topical Meeting on Optical Amplifiers and their Application", Monterey, págs 156—159, 1990.
- 4 F.Brillouet, A.Accard, P.Garabedian, G.Gelly, E.Grard y M.Lambert: ECOC/IOOC'91, París, págs 121—124.
- 5 P.Doussière, B.Mersali, A.Accard, P.Garabedian, G.Gelly, J.L.Lafragette, F.Lebland, G.Michaud, M.Monnot, B.Fernier: "Topical Meeting on Optical Amplifiers and their Application", págs 68—71, 1991.
- 6 B.Wedding, T.Pfeiffer, M.Wittmann: "5 Gbit/s Transmission over 146 km using Erbium doped fiber Amplifier", ECOC'89, Gotenburgo, págs 86—69.
- 7 B.Wedding, T.Pfeiffer: "20 Gbit/s optical pattern generation amplification and 115 km fiber propagation using optical time division multiplexing", ECOC'90, Amsterdam, págs 453—456.
- 8 P.M.Gabla, O.Scaramucci, J.O.Frorud, G.Basnier, J.B.Leroy, V.Harvard, E.Leclerc: ECOC-IOOC'91, PDP-4, parte tercera de los artículos de la Conferencia, págs 72—75, París, 9-12 de Septiembre, 1991.
- 9 P.M.Gabla, E.Leclerc, J.F.Marcerou, J.Hervo: OFC'92, San Diego, Febrero 1992, artículo Th K3.
- 10 P.M.Gabla: SPIE OE/FIBERS'91, Boston, 3-6 de Septiembre, 1991, artículo n° 1581—19.
- 11 R.Heidemann, B.Junginger, H.Krimmel, J.Otterbach, D.Schlump, B.Wedding: "Simultaneous Distribution of analog AM-TV and multigigabit HDTV with optical amplifier and their applications, Snowmass, FB 2, págs 210—213, 1991.

Jacques C. Augé nació en Clayette, Francia, en 1954. Recibió el grado francés 2° ciclo por la Universidad de Besançon en 1976 y el grado de ingeniero por la Ecole Supérieure d'Optique, Orsay, en 1978. En 1979 ingresó en CGE Marcoussis, investigando en láseres de alta energía. En 1980 pasó a Thomson CSF, donde trabajó en caracterización de fibras ópticas. Ingresó en 1983 en CGE Research Centre donde trabajó en el campo de la propagación y caracterización de fibras ópticas. En la actualidad el Sr. Augé está en Alcatel Alsthom Recherche donde dirige el grupo de amplificadores de fibras ópticas y es jefe de la división de Fotónica y Electrónica.

José Chesnoy nació en 1954. Es antiguo alumno de la Ecole Polytechnique y Doctor por Orsay (1981). Estuvo inicialmente involucrado en actividades de investigación en el CRNS, tras lo cual pasó a Alcatel Alsthom Recherche en 1989. El Dr. Chesnoy está en la actualidad a cargo de la división de Fotónica y Electrónica de Alcatel Alsthom Recherche, donde se está estudiando la viabilidad de los sistemas de conmutación y transmisión óptica, y en donde la amplificación óptica juega un importante papel.

Paul M. Gabla recibió el diploma de la Ecole Polytechnique de Palaiseau, Francia en 1986, y el diploma de la Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Paris en 1988. Durante sus estudios trabajó en el acoplamiento de LED a fibras monomodo en SAT Paris y en modulación a alta velocidad de láseres semiconductores en AT&T Bell Laboratories, Murray Hill, NJ. En 1988 ingresó en Alcatel CIT, departamento de transmisión por cable. Sus investigaciones incluyen aplicaciones de amplificadores ópti-

cos en sistemas de transmisión y redes de distribución, y las interacciones de ópticas de fibras no lineales con la transmisión a larga distancia.

Adolf Weygang nació en 1933 en Heidenheim, Alemania. Se graduó en telecomunicaciones en la Fachhochschule Esslingen. Ingresó en Mix y Genest donde trabajó en la preparación de componentes eléctricos y en el desarrollo de circuitos analógicos y digitales básicos. En 1964 pasó al laboratorio central de SEL y se hizo miembro de diferentes grupos de normalización nacionales y de ITT. Su trabajo como director del grupo de trabajo de ITT sobre LSI le llevó a recibir el ITT Quality Program Award. En la actualidad el Sr. Weygang es jefe de la división de Electrónica y Optoelectrónica de Alcatel SEL Research Center, con responsabilidad en el desarrollo de sistemas ópticos de conmutación de banda ancha y de transmisión.

Sistemas submarinos de transmisión óptica

E. Blanc

Ch. Reinaudo

J.-L. Chabert, V. Lemaire

Alcatel Submarcom, Clichy, Francia

Alcatel Câble, Clichy, Francia

Alcatel CIT, Villarceaux, Francia

La importancia de los cables submarinos continúa en aumento a la vista de las nuevas demandas de velocidades de transmisión y fiabilidad de las comunicaciones. Aquí se describen las ventajas de los diferentes sistemas submarinos, tanto actuales como futuros, y se identifica la importante contribución de la amplificación óptica.

Introducción

Antes de noviembre de 1988, fecha en que fue entregado el primer cable óptico submarino, el Atlántico Norte estaba cruzado solamente por un total de 8000 circuitos telefónicos analógicos a través de cable submarino. A finales de 1993, esta capacidad habrá aumentado hasta 110000 circuitos*. Uno de los principales factores de este aumento ha sido el rápido progreso tecnológico. Entre 1995 y 1996, los primeros sistemas en incorporar amplificadores ópticos, con una capacidad de transmisión de 2 x 5 Gbit/s, darán soporte a más de

370000 circuitos. Este aumento espectacular en la capacidad disponible en el Atlántico Norte refleja lo que ha sido cuanto menos una explosión del mercado internacional de enlaces submarinos, uno de los más boyantes en el sector de las telecomunicaciones hasta final de siglo. Este crecimiento es el resultado del progreso tecnológico, que ha provisto a los operadores de una capacidad en continuo aumento y de unos circuitos de alta calidad de uso múltiple, todo ello a unos precios cada vez más bajos (Figura 1).

Este artículo describe los sistemas de Alcatel actuales y futuros: el sistema de repetidores S560, cuyas primeras versiones fueron recientemente encargadas (Atlántico Norte (TAT 9), Italia - España (MAT 2) y Australia - Nueva Zelanda (TASMAN 2)), y el futuro sistema de amplificadores ópticos S 5000 A, cuya puesta en servicio está prevista en 1995 (TAT 12).

Más adelante, en este mismo artículo, se describen también las características

de funcionamiento de los sistemas sin repetidores SR 140, SR 560 y SR 2500, actualmente en desarrollo. Ello permite pronosticar que Alcatel continuará ostentando el liderazgo en este prometedor segmento de mercado.

Sistemas de larga distancia

El desarrollo de sistemas submarinos de fibra óptica tiene una gran ventaja sobre los sistemas de tierra semejantes. La razón es bien sencilla: la demanda de comunicaciones submarinas es mucho más grande.

Entre 1950 y 1980, los cables coaxiales submarinos de tecnología analógica siguieron prudentemente las innovaciones introducidas y validadas en los sistemas terrestres. La introducción de los sistemas de fibra óptica de 280 y 560 Mbit/s en enlaces submarinos redujo considerablemente el retraso respecto a los enlaces terrestres de la época.

*440000 con equipo de concentración tipo DCMS

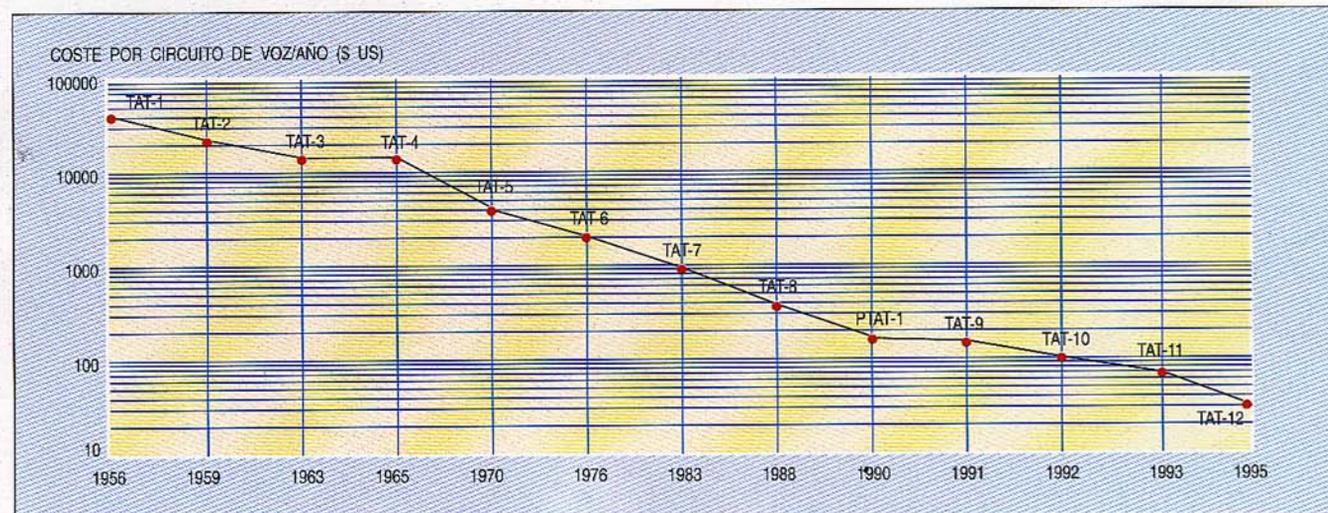


Figura 1 - Coste de un sistema trasatlántico por circuito comprimido de voz-año (1956 - 1989).

Por ello, la fiabilidad de estos sistemas, que debe corresponderse con un ciclo de vida útil de veinticinco años, nunca pudo sacar provecho total de la experiencia obtenida en el campo de las comunicaciones terrestres. Esta fiabilidad fue de hecho demostrada por medio de investigaciones intensas en el área de la fiabilidad de componentes, y de la aplicación de una disciplina de componentes muy estricta¹. Por la escalada de necesidades y la presión de la competencia, la tecnología de los sistemas submarinos alcanzó a la de los sistemas terrestres. Se aplicarán conjuntamente a ambos tipos de sistemas las técnicas de amplificación con fibra dopada, por lo que la próxima generación de velocidades de transmisión utilizadas en enlaces submarinos (5 Gbit/s) duplicará a las utilizadas en sistemas terrestres (2,5 Gbit/s).

El diseño de enlaces, repetidores e incluso terminales se verá sustancialmente modificado, de forma tal que no se podrá continuar utilizando la experiencia adquirida en las aplicaciones terrestres. Esto explica la intención de describir primero un sistema existente, para luego mirar hacia el futuro.

Sistema S560 actual

En servicio en múltiples conexiones actualmente, el sistema utiliza tecnología de regeneración óptica de señal. Cuando esta alcanza el repetidor, la señal óptica se convierte en eléctrica, se amplifica, reconforma y resincroniza, y se aplica a un láser que realiza una función inversa de conversión eléctrico-óptica.

Respecto al primer sistema submarino de Alcatel, el S 280, el S560² ha aumentado su capacidad de transmisión y la distancia máxima entre repetidores, y ha mejorado las posibilidades de configuración y supervisión del enlace.

El S560 puede llevar 23000 canales telefónicos bidireccionales de 64 Kbit/s. Esta nueva capacidad permite la inclusión de nuevos servicios tales como las imágenes de televisión o la transmisión datos de alta veloci-

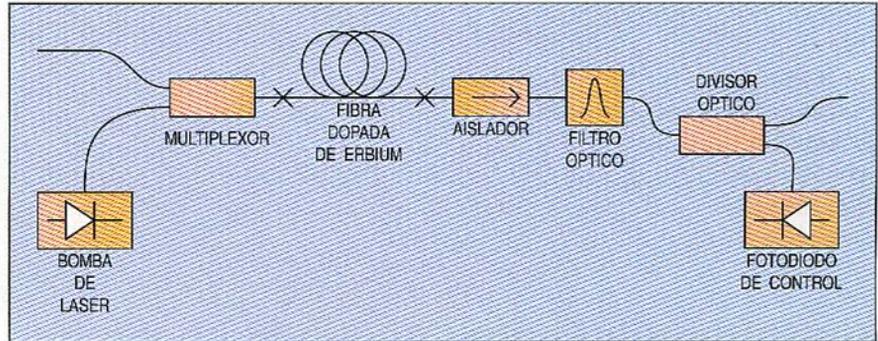


Figura 2 - Configuración de un amplificador en línea (bombeo codireccional).

dad. Se puede reconfigurar cada uno de los alimentadores de 140 Mbit/s para poder tratar flujos de 3 x 45 Mbit/s, como los utilizados en las jerarquías digitales americana y japonesa.

En el S560 se ha conseguido una distancia máxima entre repetidores de 130 Km (eran 70 Km en el S 280) de la siguiente forma:

- Ventana de mínima atenuación de la fibra a 1,55 μm : atenuación de cable de 0,22 dB/Km, y vanos de repetición de 130 Km con balance de atenuación de 30,5 dB.
- Fotodiodos de avalancha (APD) en la recepción de señal, que poseen un factor de multiplicación que permite la amplificación de la corriente fotodetectada. La potencia necesaria de recepción para funcionamiento del receptor sin errores es de 0,15 μW .
- Láser de realimentación distribuida (DBF): la dispersión cromática de la fibra a 1,55 μm , debido principalmente a la variación de la velocidad de propagación en la fibra en función de su longitud de onda, requiere un componente emisor con un espectro muy estrecho, a fin de evitar la distorsión de la señal transmitida. A la vista de su complejidad, y para asegurar la disponibilidad del repetidor, se adopta una configuración de redundancia fría del láser DFB.

También se han mejorado las posibilidades de configuración del enlace, mediante la adición de una unidad de conexión sumergible, que se utiliza para interconectar un enlace con otro,

creándose así una verdadera red submarina. Esta unidad puede incorporar dispositivos de conmutación óptica entre ramales bajo el control de una estación costera.

Las unidades de transmisión en cada repetidor se pueden disponer en forma redundante para elevar la disponibilidad del sistema. Así, es posible conmutar la unidad de transmisión redundante de cada sección para, por ejemplo, segregar una fibra del cable defectuosa.

Se debe hacer mención de otras importantes características del sistema. La longitud máxima del enlace es de 10000 Km, con una profundidad de inmersión máxima de 9500 m. Una fuente de alimentación en cada extremo suministra una corriente de 1,6 A a 15 kV. Los repetidores tienen una protección de sobrecorriente de 500 A entre 10 y 1000 mseg. Todas las estaciones terminales pueden interrogar a los repetidores a efectos de supervisión (y sólo el repetidor autorizado contesta a la estación interrogadora con mensajes acerca de su estado).

La complejidad de la electrónica utilizada en los repetidores regenerativos limita el empleo de esta tecnología a velocidades de transmisión que no superen los 2,5 Gbit/s, lo que actualmente no es adecuado para ciertas necesidades específicas de operadores internacionales.

Sistema S 5000 A futuro

El futuro sistema submarino funcionará a 5 Gbit/s, usando tecnología de amplificación óptica³, y entrará en servicio en 1995.

Se ha tenido que realizar una elección entre dos tipos de amplificadores ópticos, el realizado con semiconductores y el de fibra dopada, ambos basados en el principio de la amplificación por emisión estimulada por la onda luminosa incidente. La emisión estimulada se produce en un medio provisto de una función de amplificación debida a la introducción de energía estática externa (bombeo). Como resultado de este efecto de bombeo, la emisión estimulada viene acompañada por una emisión espontánea (ruido óptico), que también es amplificado por el medio (ASE).

En el caso de los amplificadores con semiconductores, el medio de amplificación es la zona activa de un componente de arseniuro de galio o indio, realizándose la función de bombeo eléctricamente. Las fibras se acoplan a las dos caras a fin de obtener la transferencia óptica de la señal. El medio de amplificación en un amplificador de fibra dopada es el núcleo de una fibra óptica monomodo dopada con iones de erbio. En este caso, la función de bombeo es óptica, y se obtiene mediante el acoplamiento de un potente flujo luminoso de $1,48 \mu\text{m}$ a la fibra. La configuración típica de un amplificador óptico se muestra en la Figura 2.

Alcatel ha optado por el amplificador de fibra dopada. Esta elección se justifica por la anchura de banda casi ilimitada que se obtiene con el amplificador de fibra (la anchura de banda del amplificador con semiconductores está limitada a 5 Gbit/s.), el menor nivel de ruido, y el mejor acoplamiento óptico entre la línea de fibra y el medio de amplificación, resultando así una mejora en la ganancia del amplificador y de la figura de ruido.

El diseño de los enlaces⁴ con la amplificación óptica se modificará sustancialmente, ya que la función del amplificador será simplemente la de compensar las pérdidas de la línea de fibra entre repetidores sucesivos. La eliminación del proceso de regeneración evitará la distorsión de los impulsos y una acumulación excesiva del efecto ASE sobre la línea.

Para una correcta propagación se requieren cuatro condiciones:

- La potencia óptica de entrada al amplificador debe adecuarse a una relación S/R correcta en cada amplificador, y garantizar que el ruido acumulado al final de la línea produce una tasa de errores baja.
- La dispersión cromática de la línea debe ser muy baja. Por ello es esencial el uso de un tipo de fibras de dispersión desplazada.
- La potencia a la salida del amplificador no debe ser muy alta, para evitar el efecto de falta de linealidad de la fibra (Kerr) que produce distorsión del impulso.
- El espectro transmitido por el terminal debe ser muy estrecho, por lo que se requieren moduladores externos. La longitud de onda deberá estar cerca de la mínima

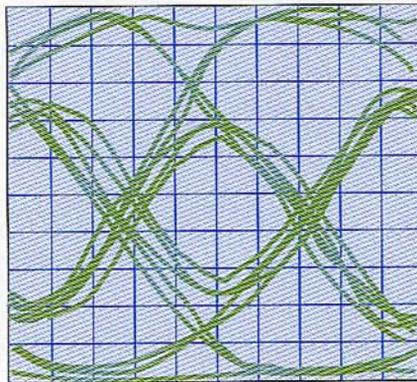


Figura 3 - Diagrama de ojos tras una transmisión de 9000 Km.

dispersión cromática en la fibra. Se requiere que la señal se propague por toda la fibra, por lo que es muy importante la calidad de la señal del transmisor.

El espaciado entre repetidores variará dependiendo de la longitud del sistema, debido a las leyes aditivas de ruido y pérdida de linealidad. Una línea con una longitud total de 9000 Km tendrá un espaciado de 40 a 50 Km, pudiendo ser esta cifra mayor para líneas más cortas. El espaciado entre repetidores puede ampliarse mediante el uso de un

dispositivo de compensación eléctrico u óptico en el receptor terminal que compense la distorsión del impulso. La Figura 3 muestra un modelo del diagrama de ojos tras una transmisión sin compensación sobre una distancia de 9000 Km.

En los sistemas amplificados, los componentes ópticos sustituirán a los electrónicos. En la función de bombeo se utilizará un láser de $1,48 \mu\text{m}$, el ruido óptico se eliminará mediante un filtro, y un multiplexor óptico acoplará el láser de $1,48 \mu\text{m}$ con la señal de $1,55 \mu\text{m}$ en la fibra dopada. Un aislador óptico evitará las interferencias entre los distintos componentes ópticos. Todos estos nuevos componentes se van a desarrollar y calificar para cumplir con el objetivo de fiabilidad de tres fallos en veinticinco años.

Sistemas sin repetidores

Mercado y aplicaciones

El aumento de la distancia de los enlaces submarinos sin repetidores (hasta 300 Km), junto con su mayor capacidad (2,5 Gbit/s), ha abierto un nuevo mercado mundial para los enlaces de este tipo. Dos terceras partes del mercado corresponde a suministro y tendido de los cables, mientras que el otro tercio representa el suministro e instalación de equipos terminales.

Este mercado cubre dos tipos de aplicaciones:

- Conexiones intercontinentales o interinsulares, en las que la ausencia de repetidores significa un ahorro que está entre el 50 y el 65%, al comparar con una solución que incorpore repetidores submarinos. Esto posibilita la modernización de los enlaces existentes, así como el tendido de nuevos enlaces que antes eran inviables.
- Enlaces costeros que proporcionan redes adicionales de apoyo a los enlaces terrestres existentes (fibra óptica o microondas), en países con costas abundantes, lo que permite conseguir mayor disponibilidad de los enlaces.

Sistema SR 140

El SR 140 es un sistema a 140 Mbit/s, desarrollado inicialmente en 1988 para conectar Irlanda e Inglaterra. Hoy en día existen trece enlaces servidos por más de doscientos terminales. Se tiene prevista la sustitución de los terminales actuales por otros cuatro de 140/155 Mbit/s durante los próximos tres años. Este equipo utiliza potentes láseres DBF y diodos receptores APD III-V de alta sensibilidad, que dan un balance neto de 40 dB. Esto significa que puede establecerse un enlace de 200 Km utilizando fibra de núcleo de silicio, cuya atenuación una vez instalado no excede de 0,2 dB/Km.

Sistema SR 560 y amplificadores ópticos

El segundo sistema se desarrolló para una capacidad de cuatro terminales de 140/155 Mbit/s, y será instalado durante 1992 en enlaces TAT entre Alemania y Holanda, y entre Córcega y el Continente.

El sistema utiliza componentes optoelectrónicos de altas prestaciones (láseres DBF) y códigos correctores de errores (ganancia de 4 dB). Se puede ampliar la distancia hasta los 300 Km, y utilizar fibra de dispersión no desplazada de muy bajas pérdidas (0,2 dB/Km una vez tendida).

Los amplificadores ópticos que funcionan de acuerdo con el principio de fibra dopada con iones de erbio y de bombeo a 1,48 μm , pueden proporcionar un balance de atenuación de 60 dB. Se emplean amplificadores en transmisión y recepción. A 30 ó 40 Km del punto de recepción se sitúa un amplificador de fibra sumergido.

El alcance del sistema, limitado solo por el balance óptico, es de 210 Km para el equipo terminal, ó 280 Km si se asocia con dos amplificadores ópticos (Tabla 1).

Sistema SR 2500

En 1993, se dispondrá de este equipo con una capacidad de dieciseis terminales de 140/155 Mbit/s, y un alcance de 100 Km para el equipo terminal, ó 240 Km si se emplean dos amplificado-

res ópticos. En enlaces que pasen de 100 Km se emplea modulación externa.

Cable óptico submarino

Desde la instalación de un enlace experimental de fibra óptica monomodo en el Mediterráneo en 1982, Alcatel ha fabricado cables para sistemas oceánicos basados en el mismo principio (una barra estriada abrazando las fibras ópticas y protegida por una bóveda de acero)⁵. Alcatel ha seguido durante diez años una política de innovación con el objetivo permanente de mejorar la fiabilidad de los cables⁶, a fin de cumplir las peticiones de los operadores de los sistemas.

Diseño de un cable submarino mejorado

En la generación actual el diámetro del cable se ha reducido de 25 mm a 21,5 mm, resultado de la mayor resistencia mecánica de las fibras y del desarrollo de nuevos materiales capaces de resistir las restricciones ambientales del cable.

La reducción del diámetro del cable permite cargar mayores largos en los tanques de los buques cableadores, y al ser más compacto se tiene una mayor facilidad de manipulación durante las operaciones de tendido y alzado en el mar.

Evolución constante de la fibra

La fibra contenida en el cable ha cambiado considerablemente. Las pérdidas en la fibra han disminuido desde 0,45 dB/Km a menos de 0,2 dB/Km, al tiempo que las ventanas de la longitud de onda de los sistemas de transmisión se han desplazado de 1,3 μm a 1,55 μm ⁷.

La capacidad para resistir los fenómenos de las curvaturas y cocas se ha mejorado substancialmente, lo que permite un mejor comportamiento del cable durante las operaciones de fabricación, conexión y tendido. También se debe apuntar la notable mejora de la solidez mecánica, asociada a la longitud media de la unidad de fibra. Ello ha permitido disminuir el diámetro del cable sin aumentar su fragilidad, y reducir a la mitad el "peso" relativo de las segregaciones de la fibra en las secciones con repetición (regeneradores).

La última década ha estado marcada por una serie de avances en el diseño de la fibra, con la aparición de la fibra monomodo de índice de escalón para la ventana de 1,3 μm , fibras de índice de escalón para la ventana de 1,55 μm , fibras de núcleo de silicio de baja atenuación, y fibras de dispersión desplazada para funcionamiento alrededor de los 1,55 μm ⁸. La Figura 4 muestra la inversión global y la política de I+D sostenida por Alcatel en el campo de los sistemas de fibra óptica.

Mejoras en la protección

El aumento de la capacidad de los sistemas submarinos de 140 a 280 Mbit/s, y posteriormente a 560 Mbit/s⁹, ha requerido la fabricación de cables cada vez más robustos. Esto tiene inicialmente como origen la gran resistencia mecánica de la armadura de cable de acero (para profundidades de hasta 2000 m) y el emparedado que realiza una doble capa de polietileno sobre una cinta de aluminio (profundidades entre 2000 y 3000 m). Generalmente, cuando la profundidad del mar

Sistema	Terminal sin amplif. óptico	Terminal con amplif. óptico	Terminal con amplif. óptico y preamplificador
SR 140	200 km	--	--
SR 560	210 km	250 km	280 km
SR 2500	100 km	200 km	240 km

Tabla 1 - Alcance de sistemas sin repetidores

es menor de 900 m, los cables submarinos se tienden sobre zanjas practicadas en el fondo del mar, lo que añade una fortaleza mecánica adicional.

Esta técnica, frecuentemente requerida hasta profundidades de 900 m, implica usar una especie de arado que arrastra el buque cableador según se va tendiendo el cable. Otra forma es excavar la zanja mediante un vehículo remolcado o autopropulsado después de la operación de tendido. La necesidad de hacer zanjas en el fondo del mar ha estimulado el desarrollo de equipos tales como arados y vehículos submarinos de control remoto, así como de diversas técnicas de excavación (rozas, dragados, etc.). Los buques de cableado han incorporado numerosas modificaciones para poder realizar las nuevas técnicas (puentes totalmente equipados, posicionamiento dinámico, y uso de elementos de arrastre).

Cables a la medida del usuario

Alcatel satisface las necesidades de sus clientes con una gama de cables, adecuados a las profundidades y otras condiciones específicas de cada enlace submarino, junto con la disponibilidad de tecnologías innovadoras (fibras de núcleo de silicio, fibras selladas herméticamente, etc.). Así, Alcatel tiene una sólida posición en el mercado, equipando conexiones tanto en aguas poco profundas o de profundidad variable, donde las actividades de pesca suponen con frecuencia un riesgo, como en aguas extremadamente profundas, en donde la masa del cable requiere un diseño muy especial que permita las operaciones de tendido y recuperación del cable.

Los permanentes programas de investigación apuntan continuamente a la mejora de las características del cable. Estos programas, que se ocupan de la elección de nuevos materiales tales como polímeros y productos de relleno, llevan a los procesos de fabricación hacia una mayor fiabilidad y una mejor protección de las fibras ópticas.

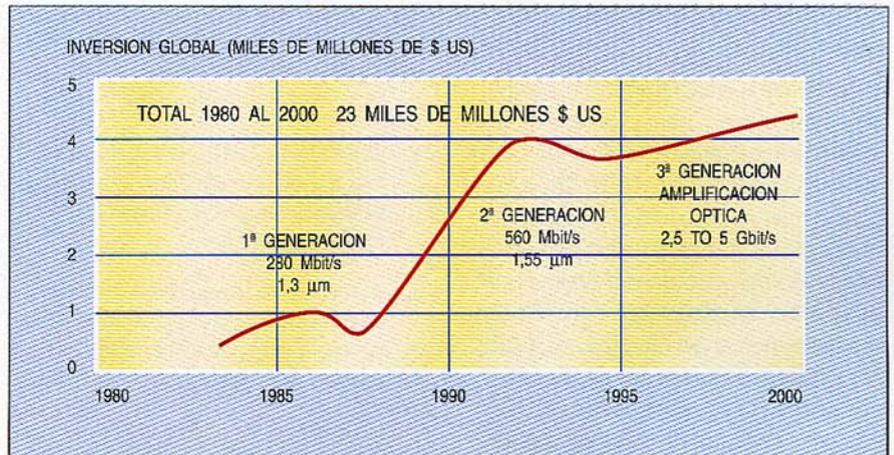


Figura 4 - Inversión global en sistemas submarinos de fibra óptica.

Fibras de dispersión desplazada

Mientras que los sistemas actualmente en producción (S560) pueden funcionar con fibras con una dispersión cromática no nula en la longitud de onda de la señal de propagación, los futuros sistemas de amplificación óptica de alta velocidad necesitarán una dispersión cromática muy baja. Por ello, es esencial desarrollar y calificar un cable, y sus dispositivos de conexión, que sea compatible con la utilización de este tipo de fibra en enlaces de larga distancia.

Sistema S 5000 A

En el sistema S 5000 A, tres pares de fibras activas son capaces de transportar 200000 circuitos telefónicos. Esto significa que si un cable se corta accidentalmente, se perderán más circuitos de los que ahora hay instalados en la ruta mejor dotada del mundo. Los programas de investigación en las áreas de mejora de la protección deben continuar. Y mientras los operadores reaccionan frente a esta nueva situación reforzando los sistemas existentes (los TAT 12 y TAT 13 se dan cobertura mutua), los fabricantes como Alcatel son instados a proporcionar equipos con una incesante mejora de su protección.

Complejidad de la instalación

La evolución en los últimos años ha sido considerable, pero las técnicas de labrado de zanjas todavía se deben

mejorar y generalizar. La profundidad recomendada de 60 cm tiende ya a aumentar hasta 1 m, llegando hasta 10 m en algunas zonas. En este caso se requieren equipos de excavación especiales. El equipo debe asegurar la fiabilidad del trabajo, así como garantizar la vida útil del cable. Estas nuevas necesidades se refleja en un aumento de la contribución de la instalación a los costes globales de los sistemas submarinos. Anteriormente, la instalación no llegaba a representar un 10% del coste total, pero con frecuencia asciende ya al 15% en los enlaces que entrarán en servicio en un futuro próximo (en el caso de líneas cortas puede llegar hasta el 40 y el 50%).

Conclusiones

En los sistemas de larga distancia, parece probable que la evolución continuará hacia un aumento de la capacidad, que será el resultado de tres técnicas: láser de bombeo de longitud de onda de 0,98 μm, utilizado para mejorar las características de potencia y el factor de ruido de los amplificadores, transmisión impulsiva tipo solitón para evitar la distorsión de las señales en la línea, y multiplexación en longitud de onda para conseguir mayores capacidades sin aumentar su complejidad. Las técnicas más innovadoras en sistemas ópticos submarinos traerá el repetidor-regenerador completamente óptico.

co, que aún no ha alcanzado la etapa inicial de diseño.

En lo que a enlaces sin repetidores se refiere, parece muy probable que las distancias máximas de enlaces submarinos alcancen los 300 ó 320 Km hacia 1995, como resultado de los logros en el campo de la fibra y de los componentes optoelectrónicos. Aún se podrá aumentar esta distancia en 20 ó 30 Km mediante el uso del efecto de amplificación RAMAN, métodos de modulación tipo MDPS y recepción heterodina, pero a cambio de una mayor complejidad y, por tanto, un incremento en los costes de los equipos.

Como se ha podido ver en este artículo, el reto real de Alcatel está en el campo de la tecnología, en particular en lo referente a la amplificación óptica submarina. Los presupuestos de I+D comprometidos en la actividad de cables continúa ascendiendo, habiéndose duplicado en la práctica durante los últimos años. La inversión de I+D más importante se está haciendo sobre el futuro sistema S 5000 A. Este programa de inversiones demuestra la determinación de Alcatel de estar preparada en 1995, condición esencial para mantener la posición en el mercado.

Referencias

1. J.L. Boussois, J.L. Goudard, M. Gueguen, B. Kramer, D. Sauvage: Selección de dispositivos optoelectrónicos para repetidores submarinos, *Revista técnica de Alcatel*, Volumen 63, nº3, págs 240—248.
2. J.P. Trézéguet: Sistema óptico submarino de telecomunicación S560, *Revista técnica de Alcatel*, Volumen 63, nº3, págs 231—239.
3. P.M. Gabla: bright Prospects for Erbium-doped fiber Amplifiers in future lightwave Communication Systems, *SPIE OE/FIBERS 91*, Boston, 3-6 Septiembre, 1991, Paper nº1581-19.
4. P.M. Gabla, O.Scaramucci, J.O. Frorud, G. Bassier, J.B. Leroy, V. Havard, E. Leclerc: 1316 Km, 2,5 Gbit/s IM-DD penalty free transmission through 26 in-line erbium doped fiber amplifiers, ECOC-IOCC'91, *Conference Proceedings part 8 PDP-4*, págs 72—75, París, 9-12 Septiembre 1991.
5. C. Reinaudo: Cable para sistemas submarinos de telecomunicación, *Revista técnica de Alcatel*, Volumen 63, nº3, págs 226—230.
6. R. Jocteur, C. Reinaudo, M. Carratt: SUBMARCOM cables reliability - First international optical organisation conference, Kobe, Japón, 18-21 Julio 1989.
7. C. Brehm, C. Reinaudo: Improved drawing conditions for very low loss 1.55 μm - shifted dispersion fiber - *Fiber and integral optics*, volumen 7, 1988, página 333.
8. M. Carratt, C. Reinaudo, R. Jocteur, J.P. Trézéguet: Fibras de característica de dispersión desplazada para sistemas submarinos sin repetidores: *Revista técnica de Alcatel*, Volumen 61, nº4, 1987, página 384.
9. J.P. Trézéguet, J. Thiennot, C. Reinaudo, G. Bourret, E. Vion: S560 optical fiber intercontinental undersea links, *Commutation et Transmission*, nº1, 1991.
10. E. Blanc, J.L. Chabert, J. Robin, L. Weens: High data rate repeaterless undersea optical fiber systems: *Commutation et Transmission*, nº4, 1990, página 27.

Christian Reinaudo nació en Avignon, Francia, en 1954. Se graduó en la Escuela Superior de Física y Química Industrial de la Villa de París en 1977, obteniendo el grado de doctor por la Universidad de París en 1983. Tras trabajar sobre materiales en los laboratorios de Marcoussis, ingresó en CLTO en 1984 y en Alcatel Cable en 1987. En la actualidad es director adjunto de la división de cables submarinos de Alcatel.

Vincent Lemaire nació en los alrededores de París, Francia en 1962. Se graduó en la Escuela Superior de Electricidad en 1986, e ingresó en Alcatel CIT en 1987 para estudiar nuevas técnicas de transmisión por fibra óptica. En la actualidad es jefe de proyecto de desarrollo de los futuros sistemas submarinos de amplificación óptica.

Jean-Louis Chabert nació en Marsella, Francia, en 1939. Se graduó en Ciencias Físicas en la Universidad de Marsella en 1960, y en ingeniería en la Escuela Superior de Electricidad de París en 1963. Tras haber trabajado en enlaces de microondas con Philips hasta 1982, ingresó en Alcatel donde ha sido responsable de la línea de productos de sistemas submarinos sin repetidores desde 1988.

Enmanuel Blanc nació en Lyon, Francia, en 1942. Se graduó en la Escuela Naval en 1962, y más tarde en sistemas ópticos y electrónicos en la Escuela Nacional Superior de Técnicas Avanzadas en 1976. Sirvió en la Marina hasta 1978, dejando el servicio con el grado de Teniente Coronel, e ingresando en Submarcon como Director Comercial.

Sistemas terrestres de transmisión optoelectrónica

S. Bartsch
P.-M. Thépaut

Alcatel SEL, Stuttgart, Alemania
Alcatel CIT, Lannion, Francia

Los sistemas síncronos de transmisión por línea óptica superan muchas de las limitaciones tanto de los sistemas de coaxiales como de los sistemas ópticos plesiócronicos, ofreciendo a los operadores de red junto a las ventajas de la fibra la flexibilidad de servicios.

Introducción

Durante las dos últimas décadas se ha observado en los países industrializados un incremento drástico en la necesidad de ancho de banda. Esta necesidad ha tenido su origen en las limitaciones de los sistemas coaxiales en costes, velocidad binaria, longitud de alcance e inflexibilidad del ancho de banda de encaminamiento. Los sistemas ópticos plesiócronicos ofrecieron una solución a los problemas de coste y longitud de alcance, pero las necesidades de flexibilidad de los operadores de red solo fueron satisfechas con la introducción de las normas SONET (red óptica síncrona) en EE.UU. y su equivalente europeo del CCITT, la JDS (jerarquía digital síncrona).

La introducción de los sistemas síncronos de líneas ópticas de Alcatel SL1654 y SL1664 (STM-4 y STM-16 con 622 y 2488 Mbit/s de velocidad de línea respectivamente), junto a los multiplexores de inserción/extracción y a los transconectores, proporcionó a los operadores de red una herramienta eficiente.

Aplicación en la red

Dependiendo de las necesidades de ancho de banda y de la estructura de la red, los sistemas de líneas ópticas sirven como conexiones punto a punto

tanto en redes de infraestructura como en redes regionales o locales. Junto a los transconectores, que conmutan las señales ópticas STM-1 ó STM-4, se puede configurar una red de infraestructura de alta capacidad totalmente protegida con grandes distancias entre los nodos.

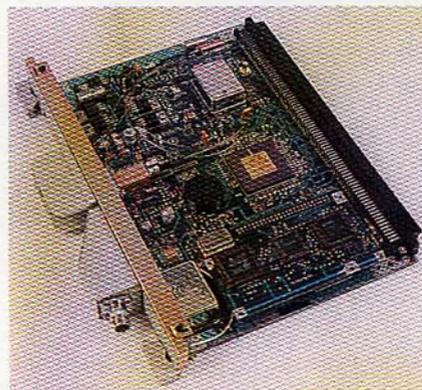
En zonas regionales donde están implicadas principalmente distancias medias, se necesitan de nuevo enlaces punto a punto pero junto a multiplexores de inserción/extracción en configuraciones lineales o en anillo. Los nodos de la red, que constan de transconectores que manejan velocidades que van desde 155 Mbit/s hasta 2,048 Mbit/s, se conectan a la capa superior de la red mediante enlaces ópticos STM-1 ó STM-4.

La distribución local con sus multiplexores terminales se conecta a la red regional mediante interfaces ópticas STM-1.

Los diferentes equipos se gestionan a través de un EOC (canal de operación interno), que da acceso a características de proceso del sistema tales como estado de alarmas, observación del comportamiento, encaminamiento y reencaminamiento de tráfico, tarificación y estadísticas.

Así, una red JDS totalmente óptica de alto rendimiento se puede configurar cubriendo necesidades tales como velocidad flexible incluso en diferentes niveles jerárquicos, diferentes longitudes de vano, protección de red y gestión de red.

Sin embargo, algunas de las velocidades plesiócronicas existentes tales como 140 Mbit/s, 34 Mbit/s, 45 Mbit/s y 2 Mbit/s con sus interfaces eléctricos se pueden gestionar mediante diferentes interfaces de correspondencia



Placa de circuito impreso del transmisor/multiplexor SL1654.

(p. ej., contenedor virtual VC-4 para 140 Mbit/s) dentro de los terminales de línea y de los transconectores.

Características de la familia del sistema Alcatel SL16X4

La siguiente descripción, aplicable en general a todos los sistemas síncronos de líneas ópticas, se refiere al sistema de transmisión por línea óptica SL1664 de Alcatel en configuración protegida 1:1 (Figura 1).

Sus principales bloques son:

- tributarios de transmisión y recepción (ETX y ERX)
- multiplexor e interfaz de transmisión óptica (OTX)
- demultiplexor e interfaz de recepción óptica (ORX)
- generador de tiempos (SYN)
- unidad de alarma y control (ALC) con NMI (interfaz de gestión de red)
- unidad de arbitraje y órdenes (SCA y SCI)

- encaminador de tara (OHR)
- conmutador de protección (TPS)
- fuente de alimentación (PSU).

Debido a los interfaces internos normalizados se pueden configurar todas las aplicaciones necesarias de la red, incluyendo:

- terminal de línea STM-4 (protegido o no)
- regenerador de línea STM-4
- terminal de línea STM-16 (protegido o no)
- regenerador de línea STM-16.

Todos los terminales se pueden equipar con diferentes tipos de interfaces tributarios tales como:

- eléctrico a 140 Mbit/s de acuerdo con la Recomendación G.703 del CCITT
- STM-1 eléctrico a 155 Mbit/s

- eléctrico conmutable a 140/155 Mbit/s
- STM-1 óptico a 155 Mbit/s
- STM-4 óptico a 622 Mbit/s.

Cada unidad tributaria (salvo STM-4) consta de cuatro interfaces de transmisión o de cuatro de recepción.

Se multiplexan/demultiplexan hasta cuatro (dieciséis) interfaces nibble STM-1 generados internamente por medio de un conjunto de ASIC en un tren de bits NRZ (sin retorno a cero) en serie, codificado y aleatorizado a 622 (2,488) Mbit/s.

Después de la conversión eléctrico/óptica, la señal de línea con una longitud de onda de 1300 nm ó 1550 nm se alimenta en una fibra monomodo a una amplitud apropiada.

En el lado del receptor la señal de línea óptica se puede detectar por diferentes tipos de dispositivos ópticos. Se

amplifica, reajusta la temporización y envía a las etapas demultiplexoras y tributarias antes mencionadas.

Durante los diferentes procesos las señales tributarias y de línea se supervisan calculando la paridad B1, B2 y B3 en los diferentes niveles del sistema. Se detectan pérdidas de diversas señales así como pérdidas de tramas y AIS (señal de todos unos).

Cualquier terminal de línea se puede sincronizar de varias formas:

- reloj externo de 2,048 MHz
- sobre una señal entrante tributaria STM-1
- sobre una señal entrante de línea STM-N
- sobre un oscilador interno con estabilidad 15 ppm (opcionalmente 4,6 ppm).

La prioridad de las fuentes de reloj es configurable por software.

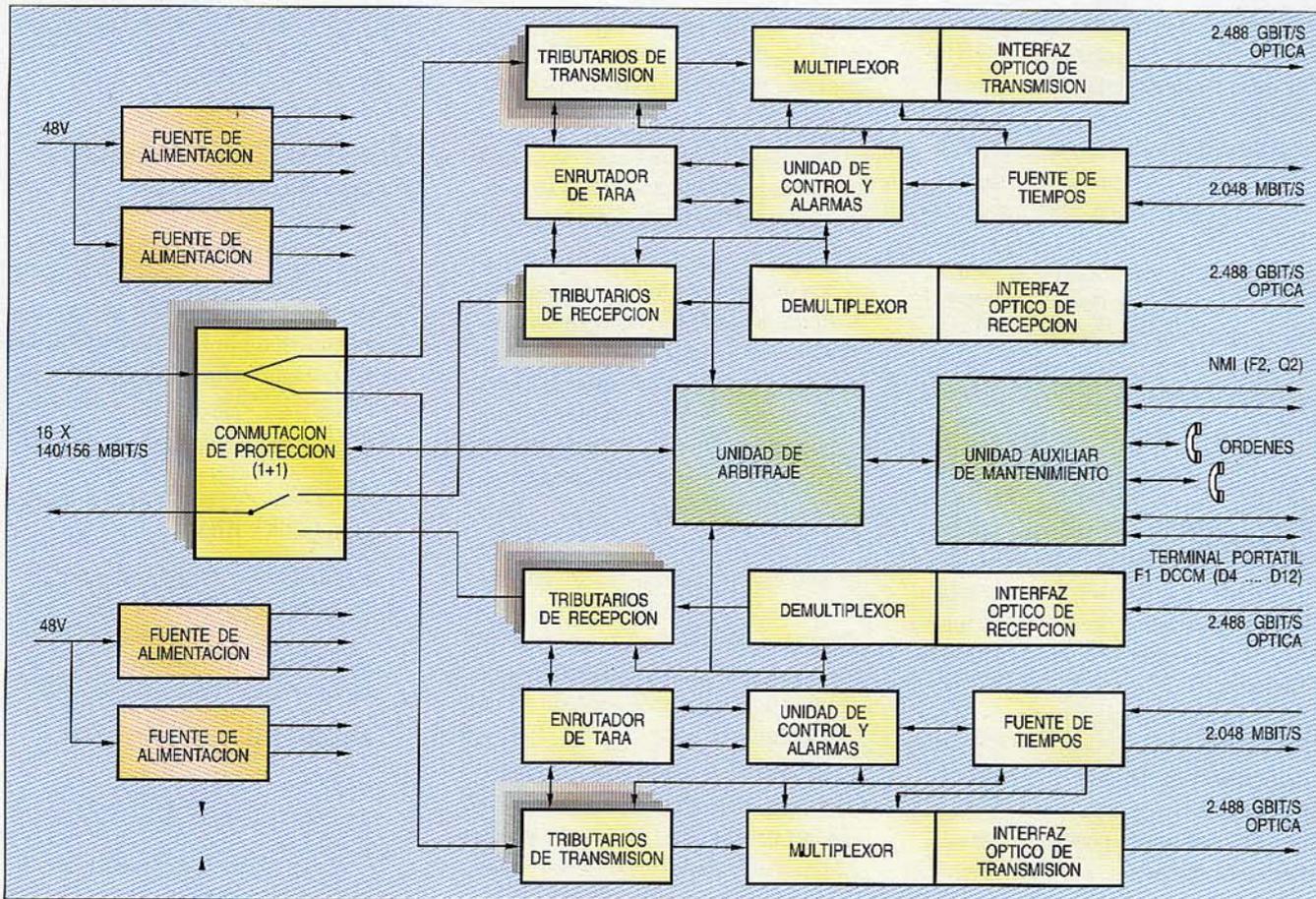


Figura 1 - Diagrama de bloques del terminal de línea óptica SL1664.

Un encaminador opcional de tara proporciona acceso a cualquier octeto de tara de sección y de tara del trayecto, desde el lado tributario o del lado de la línea. Los octetos seleccionados se pueden dirigir a un procesador asociado para manejar protocolos EOC, o hasta cuatro interfaces externos de 2,048 Mbit/s.

La protección se realiza al nivel de la entrada tributaria. Dos opciones - protección 1+1 y 1:1 - dan una elevada disponibilidad del sistema. La unidad de arbitraje activa el sistema de reserva en menos de 50 ms y asegura la conmutación simultánea, en ambos lados, en el caso de protección 1:1.

Un interfaz de servicio del canal proporciona un acceso a los dos canales de circuitos analógicos auxiliares de ajuste y mantenimiento - express, terminal a terminal, y local, terminal a repetidores - con posibilidad de llamada selectiva. Además se dispone de un canal de datos G.703 del CCITT a 64 Kbit/s.

Convertidores de potencia de alta eficacia, opcionalmente duplicados, alimentan a todas las unidades.

Tributarios

Los abonados pueden configurar el sistema de acuerdo a sus necesidades reemplazando unidades - eléctricas u ópticas a 140 Mbit/s, 155 Mbit/s, ópticas a 622 Mbit/s, o en el caso de un interfaz eléctrico conmutable ya aplicado por una configuración software del tipo de la señal de entrada - de 140 ó 155 Mbit/s.

En el caso de un interfaz eléctrico las señales entrantes/salientes se ecualizan y el CMI (inversión de la marca del código) se codificad/decodifica. Las señales plesiócronicas de 140 Mbit/s se transforman en una envoltura de la carga útil por relleno positivo, mientras que las señales STM-1 solamente se retransforman. Posteriormente, se inserta la tara de la sección y se extrae la tara del trayecto. Esta tara lleva la infor-

Longitud de onda óptica	1290 a 1330 nm	
Código de aplicación	I - 1.1	S - 1.1
Velocidad nominal	155,52 Mbit/s	
Código de línea	NRZ binario aleatorizado	
Tipo de fibra	Monomodo	
Balace de potencia, garantizado para un margen de temperatura entre +5 y +40°C	8 dB	13 dB
Penalizaciones de transmisión típicas	1 dB	1 dB
Balace de pérdidas finales típico	7 dB	12 dB
Margen dinámico	0 ... 7 dB	0 ... 12 dB

Tabla 1 - Camino óptico entre S y R para tributarios ópticos.

mación de gestión de red, canales de servicio y otros aspectos todavía no totalmente definidos tales como los octetos NU (uso nacional).

En el interfaz de nibble interno todas las señales tributarias se sincronizan con el sistema con referencia al reloj del nodo.

Los interfaces ópticos se definen con rango interno en el caso de señales STM-1. Utilizando un módulo PIN-FET de alta eficacia se puede emplear un láser no refrigerado, ahorrando así gastos de regulación de temperatura.

La unidad de interfaz óptico STM-4 comprende las funciones de conversión óptico/eléctrica, multiplexor/demultiplexor y transformación/detransformación para cubrir las necesidades de adaptación a la sección del CCITT.

El balance del enlace óptico del interfaz tributario de STM-1 y STM-4 de Alcatel se muestra en la Tabla 1.

Proceso de la señal principal (STM-16)

Las dieciséis señales lógicas de entrada STM-1 se entregan a la PBA multiplexora en formato nibble (4 x 39 Mbit/s) y se procesan inicialmente en una matriz de puertas HCMOS que proporciona una señal lógica STM-16 de 32 bits de amplitud.

Esta matriz de puertas puede sobrescribir los octetos A1 y A2 de trama de cada canal entrante.

El cálculo e inserción de la paridad BIP-24 (3xB2) sobre el STM-1#1 (canal n°1) se produce en un terminal de línea. Después, se realiza la aleatorización y el cálculo de BIP-8. El resultado del cálculo de BIP-8 se inserta en el octeto B1 de STM-1#1. B1 se puede invertir para probar el sistema de supervisión.

En caso de pérdida de canales STM-1, el octeto identificador C1 y los octetos NU18 y NU19 se codifican para evitar largas series de unos o ceros en la parte no aleatorizada del SOH. Los restantes octetos de uso nacional tienen que ponerse, en este caso, a '1'.

En una segunda etapa de multiplexación la señal lógica STM-16 de 32 bits de amplitud se multiplexa a una señal STM-16 de un octeto de amplitud.

Finalmente en una última etapa de multiplexación los octetos STM-16 se convierten de paralelo a serie para formar la señal STM-16 correcta.

La parte de demultiplexación tiene generalmente la misma estructura que las señales de datos generadas y utiliza los mismos tipos de ASIC.

El sincronismo de trama se supervisa en la matriz de puertas de baja velocidad. En caso de pérdida de sincronismo, el circuito de trama en la matriz de puertas de alta velocidad está capacitado para buscar la información de trama.

Longitud de onda óptica	1290 a 1330 nm		1530 a 1570 nm	
Código de aplicación	S - 16.1	L - 16.1	S - 16.2	L - 16.2
Nivel óptico lógico	Emisión luminosa = lógica "1"			
Componente de fuente del diodo láser	DFB		DFB	
Amplitud espectral máxima de - 20 dB	0,25 nm		0,25 nm	
Relación de supresión de modo lateral mínima	30 dB		30 dB	
Potencia media emitida* - máxima - mínima	0,0 dBm - 4,0 dBm		0,0 dBm - 4,0 dBm	
Máxima potencia permisible en caso de fallo	+ 4,0 dBm		+ 4,0 dBm	
Relación de extinción	≥ 10 dB		≥ 10 dB	
Máscara diagrama de ojos	De acuerdo con G. 957			
Conector óptico	Del tipo FC/PC en el frontal de la placa			

* Medido en el núcleo de una fibra monomodo

Tabla 2 - Interfaz del transmisor STM-16.

Se realiza el cálculo y la desaleatorización del BIP-8. El resultado del cálculo de BIP-8 se compara con el octeto B1 recibido del STM-1#1.

El BIP-24 se comprueba para calcular la tasa de errores. La pérdida de trama, fuera de trama y el AIS de sección se detectan por puntos de supervisión.

Generación del reloj

La unidad de generación del reloj SYN comprende la lógica de selección para elegir el generador de temporizaciones (ver arriba), los divisores y un PLL (circuito de sincronización de fase) que genera señales de 155 MHz y 39 MHz como el reloj del sistema.

Para proporcionar la función de modo retención, a una estabilidad menor de 4,6 ppm durante 24 horas, cuando falta el reloj externo de 2048 kHz, se utiliza un procesador digital de señal asociado con un convertidor A/D de alta definición para realizar la función de filtro paso bajo en el PLL.

El reloj de línea se genera por un segundo PLL sobre la correspondiente PBA multiplexora. Así, con el soporte de un reloj local de la central de 2,048 MHz se introduce en cada punto terminal un reloj nodal con referencia en el reloj del sistema.

Conversión O/E

La PBA O/E, placa hija de la placa OTX, es un transmisor óptico que recibe desde la PBA multiplexora la señal eléctrica STM-16 juntamente con el correspondiente reloj de 2,5 GHz. La conversión eléctrico/óptica la realiza un láser DFB con una longitud de onda de 1,3 μm ó 1,55 μm (Tabla 2).

Regenerador de datos

Para ser independiente de cualquier tolerancia en el interfaz que pueda afectar a la señal óptica de salida, la señal STM-16 se regenera en tiempo y amplitud por un biestable a medida disparado por la señal entrante de reloj.

Se da la posibilidad de ajustar la fase de la señal de reloj.

Excitador de láser

El excitador de láser, proporciona la modulación al mismo de acuerdo con los requisitos del interfaz óptico, descritos en la Tabla 2.

Se realizan ajustes en la corriente de polarización, en la potencia media y en el coeficiente de extinción para cubrir diferentes tipos de láser.

Módulo láser

El módulo, alojado en un encapsulado de mariposa, proporciona el chip del láser DFB, un diodo supervisor PIN para controlar la potencia de salida óptica, un termistor y un refrigerador Peltier que mantiene la temperatura del chip del láser a un nivel constante.

Regulación de la potencia media

La corriente media del láser se regula para obtener un nivel de salida óptico constante compensando las variaciones debidas a las fluctuaciones por envejecimiento y temperatura.

La corriente del láser se puede conectar o desconectar por el procesador de la placa mediante la conexión/desconexión de la señal de entrada de control del láser usando un procesador integrado en la placa.

Regulación de la temperatura

Este circuito recibe información de la temperatura desde el termistor del

Longitud de onda óptica	1290 a 1330 nm		1530 a 1570 nm	
Código de aplicación	S - 16.1	L - 16.1	S - 16.2	L - 16.2
Dispositivo receptor	III-V PIN	III-V APD	III-V PIN	III-V APD
Sensibilidad del receptor para un BER garantizado de 10 ⁻¹⁰	- 20 dBm	- 27 dBm	- 20 dBm	- 28 dBm
Margen de reserva para envejecimiento	3 dB	3 dB	3 dB	3 dB
Sobrecarga mínima	0 dBm	- 10 dBm	0 dBm	- 9 dBm
Reflectancia máxima del receptor	- 27 dB	- 27 dB	- 27 dB	- 27 dB
Conector óptico	Del tipo FC/PC en el frontal de la placa			

Tabla 3 - Interfaz del receptor STM-16.

módulo láser y controla la corriente del refrigerador Peltier.

Un voltaje analógico que se corresponde con la temperatura del láser se envía al convertidor A/D del procesador de la placa donde se genera una alarma de la temperatura del láser, si la temperatura del chip del láser sale de un margen predefinido.

Supervisión del nivel de salida

La información relativa al nivel óptico de salida, que proviene del diodo supervisor, se da en forma de voltaje analógico a un convertidor A/D para ser procesada en un microprocesador de la placa.

De igual manera, el valor de la corriente asíncrona del láser se convierte en voltaje analógico y se evalúa después de la conversión A/D, comparando con un umbral programable.

Conversión O/E

Se utilizan dos tipos diferentes de convertidores sobre la PBA O/E, placa hija de la PBA ORX: un APD de InGaAs para transmisión a larga distancia y un diodo PIN de InGaAs en transmisión de corta distancia. Estos dos tipos de convertidores O/E sirven como receptores de señales de longitud de onda de 1,3 μm y de 1,55 μm .

El interfaz de la señal óptica entrante STM-N se detalla en la Tabla 4.

Convertidor DC/DC

Cuando se utiliza un APD como convertidor O/E se necesita un voltaje compensado de temperatura de aproximadamente 30 a 90 voltios. Un convertidor DC/DC genera este voltaje a partir del voltaje de operación de +5V. El límite de la corriente se debe ajustar a un valor que proteja al APD de daños.

Preamplificador

La señal eléctrica de bajo nivel procedente del convertidor O/E se amplifica en un preamplificador de bajo ruido del ancho de banda apropiado y de margen dinámico suficiente.

Longitud de onda óptica	1290 a 1330 nm		1530 a 1570 nm	
Código de aplicación	S - 4.1	L - 4.1	L - 4.2	JE - 4.2
Velocidad nominal	622,08 Mbit/s			
Código de línea	NRZ binario aleatorizado			
Tipo de fibra	Monomodo			
Dispersión máxima	75 ps/nm	110 ps/nm	1450 ps/nm	1800 ps/nm
Balace de potencia, garantizado en margen de temperaturas +5 a +40°C	13 dB	25 dB	25 dB	29 dB
Penalizaciones de transmisión típicas	1 dB	1 dB	1 dB	1 dB
Balace de pérdidas finales típico	12 dB	24 dB	28 dB	28 dB
Margen dinámico	10 ... 24 dB	12 ... 24 dB	10 ... 24 dB	10 ... 28 dB

Longitud de onda óptica	1290 a 1330 nm		1530 a 1570 nm		
Código de aplicación	S - 16.1	L - 16.1	S - 16.2	L - 16.2	JE - 16.2
Velocidad nominal	2,488 Gbit/s				
Código de línea	NRZ binario aleatorizado				
Tipo de fibra	Monomodo				
Dispersión máxima	n. a.	n. a.	860 ps/nm	1220 ps/nm	1800 ps/nm
Balace de potencia, garantizado en margen de temperaturas +5 a +40°C	16 dB	23 dB	16 dB	24 dB	30 dB
Penalizaciones de transmisión típicas	1 dB	1 dB	1 dB	2 dB	2 dB
Balace de pérdidas finales típico	15 dB	22 dB	15 dB	22 dB	28 dB
Margen dinámico	0 ... 15 dB	10 ... 22 dB	0 ... 15 dB	9 ... 22 dB	16 ... 28 dB

Tabla 4 - Camino óptico entre R y S para las señales de línea STM-4 (arriba) y STM-16 (abajo)

Amplificador principal

Este amplificador, totalmente a medida, sigue al preamplificador y tiene dos salidas de nivel constante, una hacia la recuperación del reloj y otra hacia el circuito regenerador de datos.

El nivel de salida constante se obtiene utilizando un tipo de amplificador limitador (SL1664) o un amplificador de ganancia controlada con un doble atenuador de diodo PIN (SL1654).

Recuperación del reloj

Esta subunidad deriva la señal de línea del reloj desde los datos, utilizando un resonador de microondas (SL1664) ó un LSI a medida con PLL asociado (SL1654). La señal de reloj

derivada tiene que cumplir los requisitos de fluctuación de fase G.958 del CCITT.

Regenerador de datos

Para suprimir el ruido y el ruido de fase en la señal de datos procedente del amplificador principal esta señal se regenera en tiempo y amplitud por un biestable de alta velocidad. La señal derivada del reloj debe ajustarse en fase por muestreo de datos y dividirse en dos ramas, una de ellas que sirve al biestable y otra a utilizar como señal del reloj de interfaz relativa a la señal de datos.

Supervisión del nivel de entrada

El nivel óptico de entrada se supervisa midiendo la corriente del APD ó del

diodo PIN. El correspondiente voltaje analógico se envía al convertidor A/D en el procesador de la placa.

Además, se detecta la pérdida de señal de entrada óptica para proporcionar conmutación de protección rápida.

Características del interfaz óptico

Los parámetros ópticos se especifican para los puntos de referencia S y R según la norma G.957 del CCITT.

Los valores de los parámetros especificados son los valores del caso peor, suponiendo que se alcanzan en el margen de las condiciones de operación estándar, e incluyen los efectos de envejecimiento.

Los parámetros de la norma G.957 del CCITT se especifican para el caso de compatibilidad transversal (sistema multidistribuidor). En su propio sistema genérico, Alcatel especifica balances de potencia superiores a los de G.957. Para expresar esta diferencia, los códigos de aplicación originales de G.957 se han modificado ligeramente en la aplicación Alcatel disponible (Tablas 2, 3 y 4).

Para cumplir los diferentes requisitos de longitudes de vanos a manejar, se definen dos tipos de interfaz de receptor por cada longitud de onda: dos para corta distancia (S.16.1, S.16.2) y dos para transmisión de larga distancia (L.16.1, L.16.2).

Además, se dispone de una versión, realizada en conjunto con ingeniería, con un balance de enlace de 28 dB.

Proceso interno

Por medio de un sistema de procesamiento interno distribuido que comprende controladores de placa, tres buses de supervisión diferentes (transmisión, recepción y central) y dos potentes procesadores principales, se asegura que se ejecutan todas las tareas necesarias. Estas son:

- iniciación y configuración

- recogida y evaluación de las alarmas y estados del sistema
- supervisión de línea
- proceso de datos de calidad G.821 del CCITT
- administración de los datos de inventario remoto
- manejo de protocolos del interfaz terminal manual/PC
- manejo de protocolos de interfaz de gestión de red (NMI) QB3 ó ANV-Q2
- proceso y encaminamiento del ECC (canal de comunicación interno) para gestión de red
- actualización de las dos bases de datos en un sistema protegido
- proceso de conmutación en un sistema protegido (automático/forzado, uso del octeto K1/K2)
- señalización de central.

Las tareas relacionadas con el hardware como el preproceso del cálculo de B1 ó el control de los ASIC las realizan controladores de placa con firmware asociado.

Gestión de red

El mantenimiento integrado de Alcatel SL1654 y SL1664 consiste en la detección de los fallos manualmente o automáticamente bajo control software.

La búsqueda de un fallo implica una serie de etapas de diagnóstico, realizadas manual o automáticamente, para localizar la unidad defectuosa. Esta operación no afecta al servicio. Se puede utilizar un sistema de prueba de fallos para verificar el equipo después de la reparación: la verificación del bit de paridad intercalado o el estado de los octetos G1 se puede utilizar en tráfico.

La observación en servicio de la línea se lleva a cabo por un canal de supervisión usando el canal de comunicación DCC_R, que recoge los datos de estado

de cada equipo de la línea y lo envía a la unidad de supervisión ALC.

La historia de las alarmas de cada equipo se almacena en la unidad ALC y está disponible al abonado por medio de un OS (sistema operativo), un PC (ordenador personal) o un terminal portátil.

Con los mismos medios se proporciona también el suministro de muchos parámetros del sistema.

El interfaz de gestión del sistema se logra por un interfaz exclusivo Q2 unido a un dispositivo de mediación. Este interfaz se puede mejorar a los llamados "B2" ó "B3", definidos en la norma G.773 del CCITT. En ese caso el canal de comunicación interna (ECC) se proporciona por medio del DCC.

Tecnología

Las tecnologías CMOS, ECL, y AsGa se utilizan para realizar los diversos niveles de multiplexación. La aplicación de diferentes tecnologías se optimiza en consumo de potencia, velocidad, coste y complejidad con respecto a tamaño. El número total de puertas en el terminal de línea SL1664 de Alcatel es de aproximadamente 990000 puertas equivalentes.

En la parte de alta velocidad, se utilizan LSI totalmente a medida para regenerar y amplificar las señales.

Según sea la velocidad binaria y la longitud de onda se emplean láseres BH (hetero enterrados) ó DFB (realimentación distribuida), producidos por Alcatel, para obtener una señal óptica libre de parásitos que permita su funcionamiento incluso con fibras de dispersión no desplazada, a una longitud de alcance razonable.

Dependiendo de la sensibilidad requerida y del margen dinámico del receptor óptico, se incorporan diodos PIN, Ge-APD (fotodiodo de avalancha de Germanio) ó 3/5 APD (fotodiodo de avalancha de arseniuro de galio e indio) integrados, también fabricados

por Alcatel. Todos los dispositivos se alojan en una conexión y encapsulado tipo TO.

Aplicaciones especiales

Sistemas submarinos STM-4 de Alcatel

En paralelo con los sistemas de línea JDS descritos, Alcatel tiene en estudio sistemas de líneas submarinas, cuyas principales características se derivan de los terrestres. Uno de estos sistemas, a instalar este año en el mar Mediterráneo, se puede unir a sistemas terrestres con interfaces G.703 (140 ó 155 Mbit/s).

El sistema submarino de transmisión es un sistema de líneas punto a punto compuesto por dos terminales, que usan las mismas unidades tributarias y placas de supervisión que los sistemas de líneas terrestres.

Este sistema se utiliza para transmitir señales de 4x140 Mbit/s ó de 4x155 Mbit/s en una fibra óptica monomodo (dispersión desplazada o no) sobre una distancia de 200 Km.

La prestación requerida por este sistema implica el uso de componentes adicionales para códigos de corrección de errores y módulos ópticos de alta calidad.

Se ha diseñado un ASIC CMOS para corregir los errores con, como consecuencia, un ligero incremento de la velocidad de la línea.

Como resultado el código de línea es exclusivo, lo que significa que la recomendación "encuentro a mitad de vano" no puede cumplirse entre dos terminales de diferentes suministradores.

El transmisor óptico utiliza un láser DFB elevador muy potente para asegurar un balance garantizado de 40 dB para un BER de 10^{-10} (incluyendo fluctuaciones de temperatura y envejecimiento).

La disposición mecánica del sistema es muy parecida a la de su 'hermano' terrestre, siendo la principal diferencia

la separación de los interfaces ópticos en cuatro placas en vez de en dos.

El comportamiento del sistema se mejorará utilizando un amplificador óptico en la siguiente generación.

Conclusiones

El desarrollo durante los diez últimos años ha mostrado que es posible aumentar las velocidades binarias y alcanzar más de 100 Km por sección con transmisión óptica. Pero sólo la JDS, que usa el principio del contenedor, combinada con ópticas de altas prestaciones, da la flexibilidad de gestionar y asignar diferentes velocidades binarias en cualquier punto dentro de una red a un coste razonable. Se puede realizar fácilmente una futura ampliación y la mejora de la red aumentando la velocidad binaria (p. ej., STM-64 con 10 GBit/s) o añadiendo equipo adicional con su sistema de gestión de red común e interfaces ópticos síncronos normalizados.

S. Barstch nació en 1945 en Reutlingen, Alemania. Después de graduarse como ingeniero electrónico en la universidad de Stuttgart, se incorporó a SEL en Stuttgart en 1972. Después de ocho años en desarrollo de transmisiones llegó a ser jefe del departamento de preparación de pruebas. Desde 1985 ha sido jefe de proyecto y ahora es responsable de varios sistemas de transmisión óptica dentro de Alcatel.

P.M. Thepaut nació en 1943 en Paimpol, Francia. Después de graduarse como ingeniero en la Escuela Superior de Electrónica del Oeste en Angers, se incorporó a LTT en 1968 para trabajar en modems y sistemas de transmisión coaxiales. En 1985 se incorporó a Alcatel CIT para trabajar en sistemas de transmisión óptica. Desde 1988, el Sr. Thepaut ha sido jefe de proyectos, principalmente en sistemas de transmisión JDS.

La optoelectrónica en el bucle del abonado

L. Adnet
H. Mionet
W. Schmid

Alcatel Line Transmission Systems, Zaventem, Belgica
 Alcatel CIT Cable Transmission Department, Nozay, Francia
 Alcatel SEL, Stuttgart, Alemania

La fibra es claramente una inversión a prueba de futuro que proporcionará al abonado servicios digitales integrados de banda ancha, pero primero hay que disponer de las soluciones tecnológicas adecuadas y a un coste correcto.

Introducción

Es evidente que a largo plazo será necesaria una red toda de fibra para soportar la introducción de los servicios de RDSI-BA, aunque la tecnología de la fibra óptica no sea tecnológicamente necesaria para proporcionar la mayoría de los actuales servicios. Sin embargo, tres factores claves están favoreciendo una temprana introducción de la fibra óptica en la red de acceso.

En primer lugar, la fibra permite compartir la red de acceso entre los servicios actuales y los a corto plazo. Los servicios de telecomunicaciones y de CATV usan redes diferentes, lo que

conduce a una inversión adicional si se compara con una red única. Solamente la tecnología de la fibra óptica puede dar una solución eficaz a este problema.

En segundo lugar, la tecnología de la fibra óptica estará pronto lista para un despliegue competitivo en coste. La tecnología de la fibra óptica se puede considerar como madura para aplicaciones de largas distancias y entre centrales, en la cuales se ha instalado ampliamente y con éxito.

También se ha comprobado la viabilidad técnica para aplicaciones de acceso. Sin embargo, su aplicación completa necesita de varias evoluciones tecnológicas, debido a los requisitos específicos de las redes de acceso:

- volumen muy alto comparado con las aplicaciones actuales
- distancias cortas que conducen a una proporción relativamente alta de componentes activos y pasivos

(láseres, receptores, conectores, empalmes, etc..) en la estructura de costes

- mayor atención en los costes (del sistema, de instalación y de mantenimiento) pero con un posible compromiso limitado en calidad y prestaciones.

Por último, la fibra es la única solución a prueba de futuro.

La red de acceso representa una parte importante de las inversiones de los operadores de telecomunicaciones (hasta un 50% del coste total de la red) y tiene un tiempo de vida relativamente alto (típicamente 20-30 años). En este margen de tiempo, evolucionará la demanda y los servicios del abonado.

Así, desde el punto de vista de los costes de los futuros servicios y del tiempo de vida de la red, la preparación de la infraestructura de la red

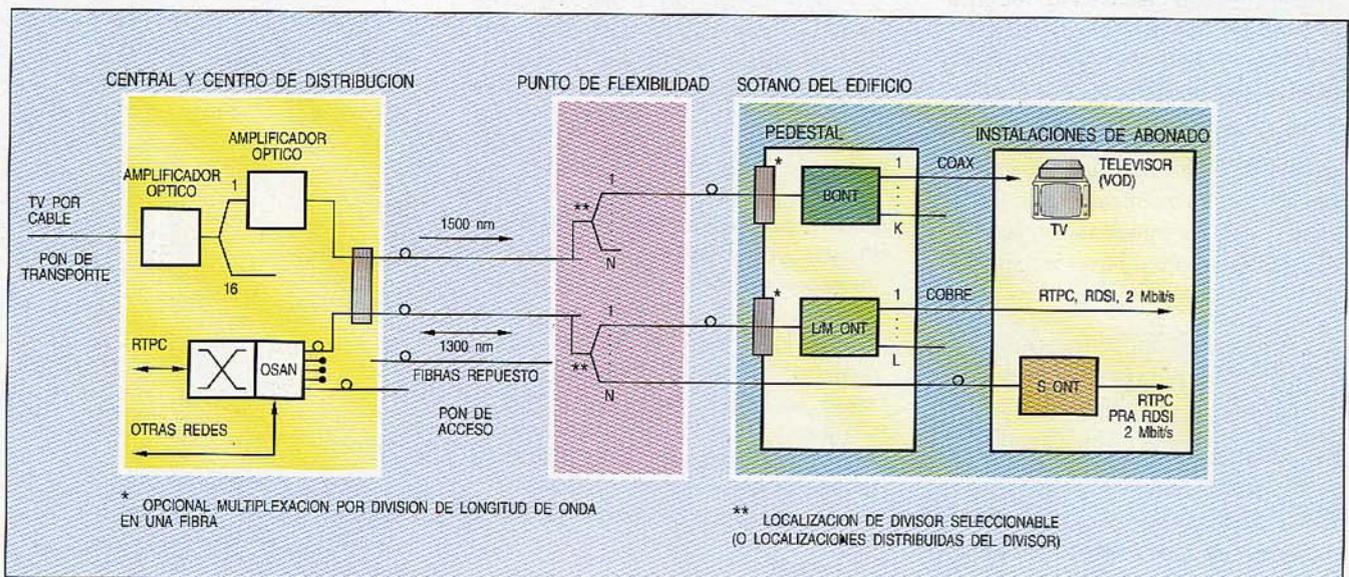


Figura 1 - Arquitectura general FTTC/FTTH.

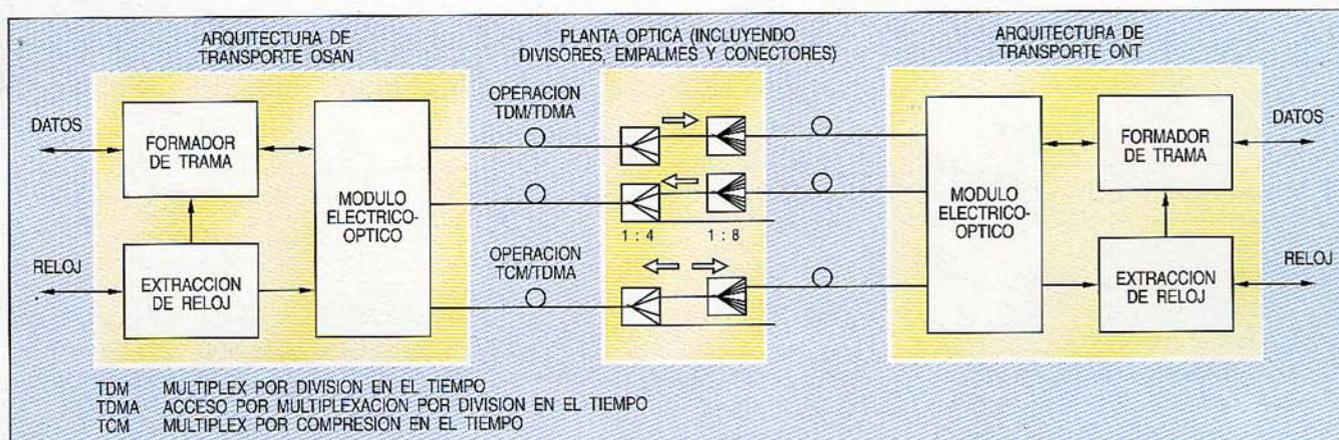


Figura 2 - Arquitectura de transporte.

para pasar los actuales servicios a la tecnología de la fibra óptica, tan pronto como sea viable económicamente, se hace crítica respecto a los beneficios.

Considerando todo esto, Alcatel ha realizado grandes esfuerzos de I+D en tecnologías y componentes que han dado como resultado el producto FTTL 1570: fibras ópticas, cables de elevado número de fibras, componentes optoelectrónicos activos y pasivos de bajo coste, técnicas de instalación de bajo coste y a gran escala. La meta de este esfuerzo es conseguir o un bajo coste en una implantación de gran volumen o las altas prestaciones necesarias específicas de las aplicaciones de distribución. Se espera que todos estos desarrollos alcancen su madurez para el despliegue masivo a comienzos de 1993-1994, aunque se prevén posteriores evoluciones en las futuras generaciones de sistemas a implantar a finales de los 90.

FITL 1570

La Figura 1 muestra el esquema del FTTL 1570. El sistema se divide en los subsistemas de banda estrecha y de banda ancha. Aunque descritos como dos subsistemas, su integración respecto a planta de cable, práctica de equipo, alimentación y parcialmente OYM permite una implantación mas económica que la de dos sistemas independientes.

Los detalles de funcionalidad que soporta y los conceptos de implantación se pueden encontrar en (1). En lo que sigue sólo se dan los principios, enfocados a las funciones relacionadas con la óptica.

Sistema de banda estrecha

Los tres componentes básicos del subsistema de banda estrecha son:

- un elemento de red de acceso (OSAN: nodo de acceso de abonado óptico), al que se le añade un sistema óptico de transporte para desplegar fibra en la red de acceso del abonado
- una arquitectura de red óptica pasiva (PON) en el sistema de transporte en la red de acceso
- una terminación de red óptica (ONT), haciendo énfasis en el bajo coste.

Los principios del sistema de transporte, que está parcialmente integrado tanto en el nodo de acceso como en la ONT (Figura 2), son:

- elección de una arquitectura compartida para permitir el ahorro de equipo en la central y en la planta de cable. El factor de compartimiento es de hasta 32
- uso de fibra monomodo
- posibilidad inicial de despliegue de un sistema de una fibra usando

una técnica de multiplexación por compresión en el tiempo (TCM), o ping pong, o de dos fibras (una por cada dirección) para competir con éxito con la evolución desconocida hacia componentes ópticos de bajo coste. Ambos sistemas operan en la ventana de 1300 nm y solo son marginalmente diferentes, salvo en el módulo electroóptico (EOM), en:

- disponibilidad de una carga útil, totalmente dúplex, de 240 ó 480 DS₀ equivalentes para abonados conectados a un árbol de fibra de la PON
- velocidad de transmisión efectiva de 51,84 Mbit/s
- requisitos no específicos para la planta de cable, lo que tendría un impacto de coste negativo (p. ej., conectores con baja pérdida de reflexión)
- diseño de una planta de cable flexible, lo que es posible no poniendo restricciones a la posición física de los puntos de derivación
- balance del retardo ida y vuelta del sistema, que no requiere el uso de un cancelador de eco en el sistema.

Más adelante se muestran en detalle los requisitos del módulo electroóptico (EOM) y de los componentes pasivos de la planta óptica.

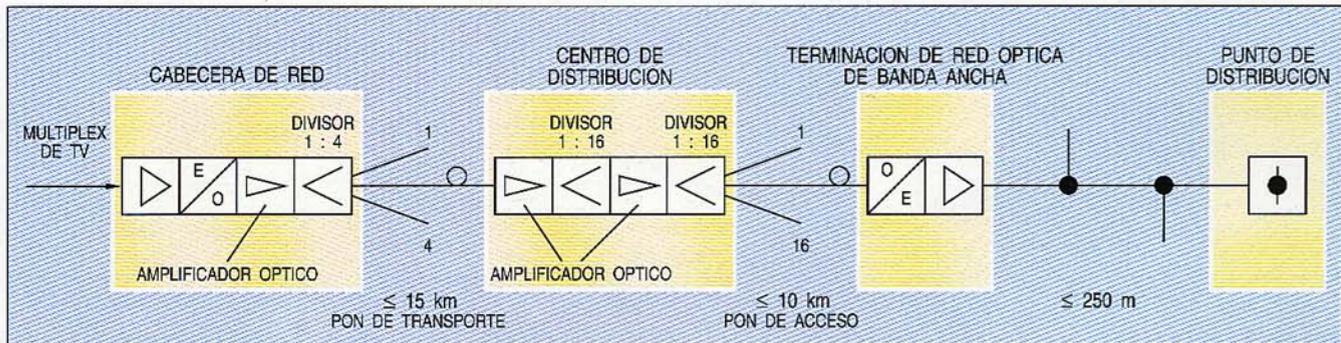


Figura 3 - Sistema del enlace de acceso y transporte en cascada para CATV de banda ancha.

Sistema de banda ancha

El sistema de banda ancha está configurado de la misma manera que el sistema de banda estrecha:

- en la central principal, un multiplex de CATV se convierte directamente en señal óptica y se amplifica ópticamente para su distribución, a través de una primera planta de fibra óptica PON (PON de transporte), a los centros de distribución
- en el centro de distribución, la señal óptica se reamplifica ópticamente por una cascada de hasta dos amplificadores ópticos. Una segunda PON (PON de acceso) se utiliza para dar servicio a las terminaciones de red óptica de banda ancha (BONT)
- la BONT convierte la señal óptica a eléctrica compatible con los estándares actuales de TV.

En cuanto a las características del sistema que tienen impacto en el compo-

nente óptico, el sistema se basa en (Figura 3):

- uso de fibra monomodo en la ventana de 1550 nm para permitir compartir la fibra con el sistema de banda estrecha (NB) mediante la utilización de multiplexación por división de longitud de onda (WDM) en el PON de acceso
- uso del mismo factor de división de planta de cable para el PON de acceso, en el caso de una arquitectura de red compartida con el sistema NB
- empleo de amplificación óptica en la central principal y en los centros de distribución (amplificadores elevadores de potencia)
- uso del esquema de modulación AM VSB para ser compatible con los estándares de la TV actual dentro de la banda VHF/UHF (47 - 862 MHz).

Inicialmente, el coste de los componentes ópticos justificará solamente las BONT que se comparten por cierto número de abonados. Gradualmente, con la reducción del coste de estos componentes y, eventualmente, por añadir servicios como el video bajo demanda (VOD), que proporcionarán beneficios adicionales al operador, será posible un esquema de fibra al hogar (FTTH).

Optoelectrónica activa para el sistema de banda estrecha

Consideraciones de costes

Respecto al coste la introducción de la tecnología de la fibra óptica en el área del abonado tiene que cumplir dos requisitos importantes:

- debe de ser competitiva en coste frente a una tecnología que esté en su fase madura y que haya sido objeto de varias fases de reducción de costes tanto a nivel de diseño como industrial
- la introducción de funcionalidad adicional no necesaria en las tecnologías convencionales.

Alcatel introdujo su primera generación de circuitos de líneas analógicas al principio de los ochenta y actualmente está instalando su cuarta generación de circuitos de línea. La densidad ha evolucionado desde seis líneas por PBA a 16 aumentando el nivel de integración, lo que ha dado como resultado la utilización de un total de solamente 22 ASIC por 16 líneas.

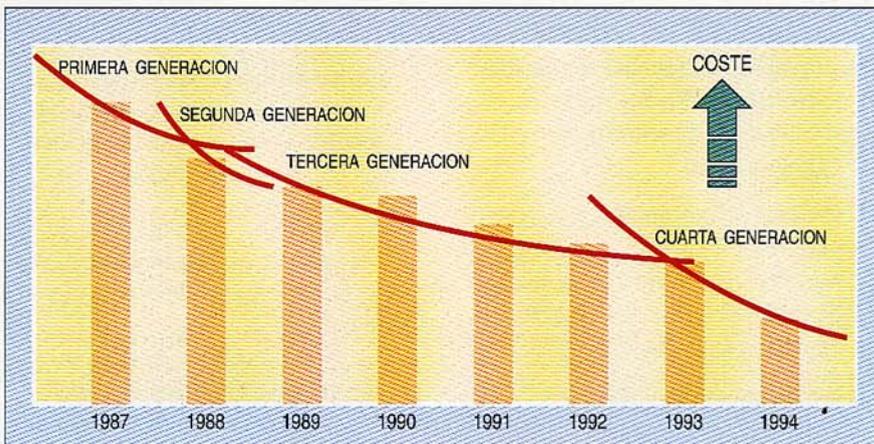


Figura 4 - Tendencias de los costes del circuito de línea analógico.

Además, la mayoría de esta generación se ha soportado dentro de Alcatel con un plan industrial y de compras especial para asegurar la incorporación de mejoras, optimización de programas de pruebas y suministros múltiples, dando como resultado un sistema de muy bajo coste. La evolución se muestra en la Figura 4, la cual indica una reducción del coste del hardware en más de dos veces en un período de cinco años.

Igualmente, los estrictos objetivos de coste deben tener en cuenta el esfuerzo extra requerido para el despliegue en el campo de la tecnología óptica.

Idealmente, el servicio telefónico clásico (POTS) debería implantarse usando una conversión óptica/acústica directa, pero como todavía no es viable se requieren convertidores ópticos/eléctricos intermedios. La Figura 5 muestra el coste relativo de la función de conversión E/O en comparación con el coste del circuito de línea. La aplicación de una arquitectura compartida reduce el coste adicional en la central. Sin embargo, el coste adicional en los nodos lejanos se mantiene. De todo esto se deduce que es necesario adoptar otros medios para alcanzar un coste económico de manera global. Es necesario combinar redes (telex, datos, RDSI, CATV) teniendo en cuenta la inversión de capital en la planta instalada. El diseño y la fabricación de módulos ópticos lo contempla Alcatel como factores claves del éxito del FITL, que está soportado por programas de la división de componentes ópticos².

Fiabilidad

Los sistemas FITL no deben cambiar la esperada disponibilidad del servicio telefónico de tiempo de fuera de servicio de 50 a 60 minutos por línea y año, lo que significa una disponibilidad aproximada del 99,99%.

Para determinar la tasa de fallos y su distribución, el procedimiento utilizado es:

- fijar el objetivo de indisponibilidad: 50 a 60 min/año

- establecer la tasa de fallos (MTBF) y el tiempo de reparación de la planta externa (MTTR)
- aplicar el proceso de Markov Rec. G. RAV. del CCITT-XV (Nov.89) para obtener el objetivo de tasa de fallos de los equipos electrónicos y electroópticos.

Para medir el efecto de los fallos sobre la disponibilidad del subsistema de una línea de abonado, se consideran tres partes del sistema:

- nodo de acceso de abonado óptico (OSAN)
- planta externa
- terminación de red óptica (ONT).

A partir de aquí, se ha asignado una tasa de fallos aproximada de 5000 FIT (10⁹ fallos en el tiempo) en el módulo láser, incluyendo encapsulado, duplexores y conexiones de fibras. El receptor óptico no se ha considerado como un elemento crucial ya que los diodos receptores actuales tienen un alto grado de fiabilidad (15 a 20 FIT)³. Se estima que el diodo láser en el módulo pueda tener una tasa de fallos entre 100 y 1000 FIT, por lo que el resto de la tasa de fallos, alrededor de 4000 FIT, se pueda asignar al alineamiento de la fibra y al encapsulado, incluyendo el envejecimiento. Como el conseguir estos objetivos de tasa de fallos tiene una importancia estratégica, Alcatel está activamente trabajando en dos campos: análisis de fallos de los primeros prototipos en la fase de diseño de componentes y puesta a punto de los programas de pruebas y cualificación representativos.

Balance de potencia en un sistema de transporte de banda estrecha

La arquitectura de doble estrella pasiva mostrada en la Figura 2 es la considerada para despliegue por la mayoría de las compañías que operan en Europa. La comunicación entre nodos remotos y la central se realizará mediante acceso por división en el tiempo (TDMA). Para la flexibilidad de la red máxima, esta arquitectura

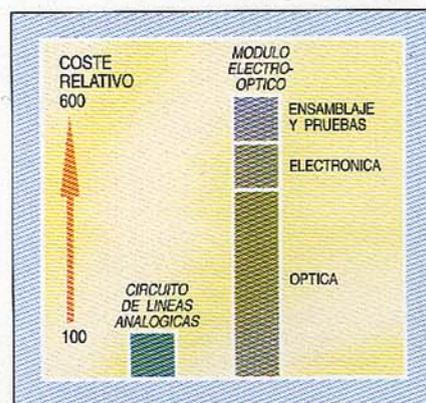


Figura 5 - Coste relativo del circuito de línea en relación con el módulo electro-óptico de banda estrecha.

requiere la colocación de un divisor pasivo en varios lugares del bucle de abonado. Adicionalmente, la relación de división variará desde un mínimo de 1:4 a un máximo de 1:32. Las redes basadas en PON de una y dos fibras necesitan diferentes balances de potencia, debido a que las redes de una fibra necesitan duplexores adicionales. En la Tabla 1 se muestra un ejemplo de balances ópticos de potencia típicos para redes de una y dos fibras. Es importante apuntar que el diferencial máximo del balance de enlaces (diferencia entre el balance de un enlace correspondiente a un nodo remoto con una relación de división mínima y localizado muy cerca de la central y el de un nodo remoto con relación de división máxima y situado a la distancia máxima de la central) es de aproximadamente 25 dB.

Debido a que la transmisión desde un nodo remoto a la central se hace en modo de ráfagas, no será posible utilizar los módulos electroópticos económicos disponibles actualmente y, por consiguiente, será necesario desarrollar módulos específicos para el bucle de abonado. Para permitir la deseada flexibilidad de la red será necesario desarrollar receptores en modo ráfaga y láseres en los cuales la potencia se pueda controlar desde la central. Los requisitos de estos módulos fueron discutidos previamente⁴, y aquí solamente se insiste en el requisito principal, que es el tener una sensibilidad

Elemento de red	Potencia (dBm)		Pérdidas (dB)	
	PON 1 fibra	PON 2 fibras	PON 1 fibra	PON 2 fibras
Potencia del láser	0,6	- 7,0		
Duplexor			3,8	
Conector (central)			0,5	0,5
WDM 1300/1500 nm			1,0	1,0
Conector (caja distribución)			0,5	0,5
Divisor 1:4			7,8	7,8
Divisor 1:8			11,7	11,7
Pérdidas de la fibra *			5,0	5,0
WDM 1300/1500 nm			1,0	1,0
Margen del sistema			3,0	3,0
Margen del modo ráfaga **			3,0	3,0
Conector (remoto)			0,5	0,5
Duplexor			3,8	
Potencia óptica recibida	- 41,0	- 41,0		

* Calculadas a partir de una atenuación de fibra de 0,4 dB/km y empalmes, 0,1 dB/km

** Margen estimado para modo de operación en ráfagas

Tabla 1 - Balance de potencia óptica típica para PON de bucle de abonado.

de - 41 dBm a 51,84 Mbit/s en modo de ráfaga con un margen dinámico mayor de 15 dB. Se considera que la potencia del láser se pueda controlar remotamente desde la central en un margen de 10 dB.

Para obtener componentes económicos que puedan operar en modo de ráfaga es necesario desarrollar módulos ópticos integrados basados o en soluciones híbridas discretas o en ASIC analógicos de silicio. Son posibles soluciones iniciales basadas en componentes discretos y tales soluciones se pueden hibridar para mejorar las prestaciones y los costes. Sin embargo, será eventualmente necesario desarrollar módulos electroópticos económicos para sistemas FTTL TDMA, que son altamente integrados, y que contienen el transmisor (láser), circuito de control del transmisor, fotodiodo y amplificador de modo de ráfaga. Además, el duplexor, para el caso de redes de una fibra, necesita estar integrado.

Componentes ópticos activos para sistemas de transmisión TV analógica de banda ancha

La transmisión óptica de banda ancha analógica de señales TV AM VSB, FM y audio digital en el margen de frecuencias RF original, es decir la banda completa de VHF y UHF, requiere

componentes ópticos con unas altas características de ruido y linealidad.

La optimización de los circuitos transmisor y receptor respecto a la linealidad y al ruido hacen que el diseño sea más crítico que en los sistemas de transmisión digital. Además, se necesitan unas pérdidas de retorno muy buenas en cada interfaz óptico para que el camino de la transmisión no se degrade debido a las reflexiones ópticas.

En (5) se da más información sobre el estado de la investigación de componentes dentro de Alcatel.

Diodos láser para sistemas de transmisión de TV analógica de banda ancha

Los láseres para transmisión de señal TV analógica AM VSB deben cumplir unas demandas específicas en potencia de salida, linealidad, variación de la longitud de onda con la corriente de excitación (chirp), ruido de intensidad relativo (RIN) y respuesta en frecuencia.

Las aplicaciones actuales están basadas principalmente en láseres DFB a 1300 nm. Al principio se utilizaron láseres Fabry Perot que requieren circuitos de predistorsión complejos, pero este tipo de láser juega actualmente un pequeño papel. Los láseres DFB que operan a 1550 nm se han hecho cada vez más importantes debido a la disponibilidad de amplificadores de fibra dopada de erbio (EDFA)

dentro de dicha ventana. Para utilizar productos de 1550 nm en fibra mono-modo estándar (1300 nm), se deben tomar precauciones debido a que el efecto combinado del chirp y de la dispersión de la fibra⁵ degradará las características de linealidad del sistema mucho más que las alinealidades intrínsecas del láser.

En la ventana de 1550 nm, los valores actuales del chirping están en un margen de varios GHz/mW y la dispersión cromática de la fibra tiene un valor medio de 17 ps/nm.km. Con estas características no se alcanza el necesario rendimiento del sistema (C/N, CSO, CTB) para el balance de potencia requerido. Hay algunas posibles soluciones a este problema:

- disminuir la dispersión cromática de la fibra usando una fibra de dispersión desplazada. Esta solución no es satisfactoria porque requiere un despliegue de fibra especial
- reducir el efecto chirping del láser a valores por debajo de 500 MHz/mW. Es la solución preferible pero requiere un desarrollo del láser muy significativo
- compensación eléctrica no-lineal en el transmisor para disminuir el efecto chirping. Esta solución requiere un circuito de respuesta muy rápida y tiene una prestación limitada en una arquitectura punto a multipunto, donde cada una de las distancias entre transmisor y receptor son diferentes y pueden variar varios kilómetros.

La solución final tiene que ser un compromiso entre la reducción del chirping del láser y la compensación eléctrica. Actualmente, el trabajo en los láseres DFB a 1550 nm muestra la posibilidad de alcanzar la requerida linealidad y comportamiento de ruido para un sistema que trabaje hasta 862 MHz.

Para garantizar el requerido comportamiento del sistema se necesita la siguiente especificación del láser:

- potencia de salida óptica > +3 dBm
- CSO y CTB < - 62 dBc



Amplificador de fibra óptica usado en la red de acceso de CATV.

- RIN < -155 dBc/Hz
- respuesta en frecuencia de ± 1 dB (47 a 862 MHz)

Este tipo de láser está disponible para la segunda ventana óptica. En aplicaciones a 1550 nm se requieren láseres DFB de bajo chirp con prestaciones de linealidad y RIN comparables a los de láseres DFB de 1300 nm. Alcatel está en posición de ofrecer este tipo de láser para aplicaciones de EDFA a 1550 nm de CATV.

Receptores ópticos para transmisión analógica de banda ancha de TV

La optimización de los receptores ópticos con respecto a linealidad por una parte y al ruido por otra, hacen que su diseño sea más crítico que el de los sistemas de transmisión digital.

En aplicaciones de receptores con alto nivel de potencia de entrada y buen comportamiento de linealidad, el fotodiodo PIN ternario tiene ventajas sobre el fotodiodo de avalancha (APD).

El diodo PIN es menos crítico a los niveles altos de potencia de entrada y es más lineal que los APD. El no necesitar un alto voltaje ni un circuito de regulación y el ser capaz de operar en

la segunda y tercera ventanas son ciertamente ventajas adicionales.

Los módulos de diodo PIN aplicables en sistemas analógicos ópticos deben de tener las siguientes características:

- sensibilidad del diodo (1300 nm y 1550 nm): >80%
- capacidad total: < 0,4 pF
- voltaje de ruptura PIN: > 15 V
- pérdida óptica de retorno: > 50 dB
- linealidad CSO y CTB: > -70 dB
- margen de temperatura: -10 a +70°C

Se han probado cuatro estructuras diferentes de receptores con diferentes diodos PIN optimizados, suministrados interna y externamente, para aplicaciones analógicas.

Los resultados, dados en la Tabla 2, nos muestran que un diodo PIN junto con una red de adaptación pasiva y un amplificador híbrido de CATV satisfará los requisitos de distribución óptica de señal de CATV.

Amplificadores ópticos

Los amplificadores de fibra dopada de erbio jugarán un papel dominante en los sistemas de transmisión digital de larga distancia e incluso en las redes regionales de distribución de señal analógica.

Se puede cubrir un área de un diámetro aproximado de 60 Km. El uso de dos tipos de amplificadores ópticos, elevador de potencia y amplifica-

dor de línea (Figura 3), es necesario en aplicaciones de transporte y acceso para garantizar el requerido comportamiento del sistema con un balance de potencia mejor que 55 dB con potencias de salida superiores a +13 dBm y unas buenas características de ruido en el amplificador de acceso a líneas⁶.

Componentes ópticos pasivos

Los tres componentes pasivos básicos que se utilizan en la red son los empalmes, los conectores y los divisores. Cada uno es importante porque tiene su impacto en la calidad de la transmisión y en el coste general del bucle de abonado.

En un sistema de distribución analógica AM VSB de banda ancha, la pérdida de retorno es un parámetro esencial. Se requiere un valor del sistema de 50 dB para mantener el valor del RIN del láser por debajo de -150 dB/Hz y así garantizar que no se generen, por el láser o por el amplificador de fibra dopada de erbio, distorsiones adicionales de la señal (CSO/CTB).

En el subsistema digital de banda estrecha no se han definido requisitos específicos para la pérdida de retorno.

Utilizando láseres, conectores, empalmes y divisores actuales se ha calculado el balance de potencia óptica de la Tabla 1. Sin embargo Alcatel ha puesto en los componentes unos objetivos más ambiciosos, para permitir una disposición más flexible del cable en función del número permitido de conectores y empalmes y del margen del sistema.

Tipo	Frente al ruido	Linealidad CSO y CTB	Complejidad
PINFET de transimpedancia	Muy bueno	Buena	Alta
PINFET con amplificador push-pull (balanceado)	Muy bueno	Muy buena	Muy alta
PINFET con amplificador bipolar Darlington y realimentación externa	Malo	Buena	Baja
Diodo PIN con red de adaptación e híbrido de CATV	Bueno	Muy buena	Muy baja

Tabla 2 - Tipos de receptor y comportamiento.

A continuación se da una descripción del estado de las prestaciones. Más detalles se pueden encontrar en (7).

Empalmes

Se pueden utilizar diferentes tipos de empalmes:

- empalmes individuales de fusión
- empalmes individuales mecánicos
- empalmes de fusión múltiples
- empalmes mecánicos múltiples.

Con los empalmes individuales de fusión o mecánicos y con operarios muy cuidadosos y dedicando un largo tiempo en empalmar fibras es posible obtener una alta fiabilidad y unas pérdidas de retorno mejores que 60 dB. Dicha práctica de trabajo es viable en enlaces de larga distancia, pero no en la red de abonado donde es necesario empalmar fibras en un corto tiempo.

Con los empalmes mecánicos se deben analizar cuidadosamente las pérdidas de retorno y para obtener unos valores mejores que 50 dB es necesario cortar las fibras con un ángulo o usar una preparación especial de la cara del extremo de la fibra.

La calidad de los empalmes múltiples (por fusión o mecánicos) necesarios en los cables de fibra de cinta depende de las tolerancias geométricas de la fibra. La pérdida de retorno es muy buena con empalmes por fusión múltiple, pero es difícil conseguir unos valores muy buenos con empalmes mecánicos múltiples.

Conectores

Debido a que las pérdidas de retorno del conector deben de ser muy buenas (50/55 dB), su elección está limitada. Actualmente, solo unos pocos tienen dichas características. En la Tabla 3 se muestran valores típicos para diferentes tipos de conectores.

Divisores

Los divisores se pueden localizar en la central, al final del extremo de la fibra

Tipo	SC		EC		FC/PC		MT *	
	Media	Máx.	Media	Máx.	Media	Máx.	Media	Máx.
Pérdidas de inserción (dB)	0,25	0,5	0,22	0,37	0,27	0,5	0,4	1,4
Desviación típica (dB)		0,1						0,29
Pérdidas de retorno (dB)	-35	-45	-60	-63	-35	-45	-38	-50

Valores para la conexión de una misma fibra

* Con capa de polímeros

Tabla 3 - Prestaciones de los conectores.

o en algunos casos en una caja de empalmes. Se consideran dos clases de divisores:

- de tecnología de fusión
- de tecnología de óptica integrada.

Desde un punto de vista técnico y económico, los divisores de fusión son óptimos para pequeñas relaciones de división (1x2 y quizás 1x4), mientras que los de óptica integrada son mejores para relaciones de división mayores (1x8 y 1x16). Los divisores de óptica integrada son acromáticos y se pueden utilizar en las ventanas de 1300 y 1550 nm.

Conclusiones

El éxito de la tecnología de "bucle de abonado óptico" dependerá en gran manera de la disponibilidad de la optoelectrónica a la adecuada prestación técnica y a un coste apropiado.

Alcatel está trabajando tanto a nivel de investigación como a nivel de industrialización para hacer los necesarios progresos. Los centros de investigación están trabajando principalmente en la mejora de las prestaciones de los láseres analógicos, del nivel de salida de amplificación óptica y en los procesos y estructuras para la fabricación de alto rendimiento y bajo coste de todos los componentes activos y pasivos.

Adicionalmente, las divisiones de Componentes Ópticos con los componentes activos y de Alcatel Cable con los pasivos están colaborando estrechamente con los Centros de Investi-

gación para implantar los resultados de las investigaciones y aplicar los conceptos de sistemas asociados. Como resultado de esta cooperación, a partir de 1994 se instalarán sistemas que proporcionarán soluciones económicas para una gama de diferentes topologías y servicios de abonados.

Referencias

- 1 R. Burkhardt, R. Dierckx, J. de Vitry, "Enfoque evolutivo de la tecnología de la fibra óptica en el bucle de abonado", Revista técnica de Alcatel, Volumen 64, nº2/3, 1990.
- 2 J.P. Pestie, Mr. Isert, "Diseño y fabricación de componentes optoelectrónicos activos", Comunicaciones Eléctricas, 4º trimestre 1992, en este número.
- 3 James L. Spencer, Burton A. Onger, "A Laser for all seasons: the challenge for Fiber in the Loop reliability", ISSLS 91, Amstertam.
- 4 C. Eldering, S. Allaire, A. Martin, R. Martin, F. Marcel "Transmitter and receiver requirements for Time Division Multiplex Access Passive Optical Networks", Tokyo 1991.
- 5 O. Hildebrand, M. Enman, "Componentes optoelectrónicos activos en preparación en Alcatel", Comunicaciones Eléctricas, 4º trimestre 1992, en este número.
- 6 J. C. Chesnoy, R. Boirat, A. Weygang, "Progresos en Amplificación Óptica", Comunicaciones Eléctricas, 4º trimestre 1992, en este número.
- 7 R. Jocteur, J.P. Dumas, "Diseño y fabricación de componentes pasivos para optoelectrónica", Comunicaciones Eléctricas, 4º trimestre 1992, en este número.

Lionel Adnet nació en 1963 en La Celle Saint Cloud, Francia. Se graduó por la Ecole Centrale de Lyon (1986) y obtuvo el grado de Master en ciencias en Electrical Engineering, Columbia University, Nueva York (1988). En 1988 ingresó en Alcatel CIT donde trabajó activamente en el Alcatel Fiber To The Home Trial con Bell Atlantic, EE.UU. (1989) y en la primera generación de redes de fibras al hogar en Francia. Ingresó en Alcatel Network Systems, Zaventem, en 1991 y está actualmente trabajando con componentes ópticos y fibra en el bucle.

Hubert Mionet nació en 1942 en Francia. Obtuvo el diploma de ingeniería de la Ecole d'Electronique de l'Ouest. En 1968 ingresó en Alcatel, donde ocupó sucesivamente diferentes puestos técnicos con énfasis especial en el tratamiento de señales para la transmisión de televisión. Actualmente está en el desarrollo de redes de distribución multiservicio que emplean fibras ópticas.

Wolfgang Schmid nació en Esslingen en 1949. En 1976 se graduó en Fachhochschule für Technik Esslingen. El mismo año ingresó en SEL tomando parte en el desarrollo de sistemas de transmisión digitales y analógicos. Desde 1985 ha sido jefe del departamento de desarrollo de sistemas de transmisión digitales y analógicos. En la actualidad el Sr. Schmid es responsable del desarrollo de sistemas de CATV para aplicaciones de fibra en el bucle y sistemas de transmisión ópticos.

Aplicación de la optoelectrónica a las radiocomunicaciones

J. Chesnoy Alcatel Alsthom Recherche, Marcoussis, Francia
R. Heidemann Alcatel SEL, Stuttgart, Alemania
J. Joseph Alcatel Espace, Toulouse, Francia

V. Kumar Alcatel Radiotéléphone, Colombes, Francia
D. Lemaître Alcatel Telspace, Cergy, Francia
A. De Place Alcatel Telspace, Nanterre, Francia

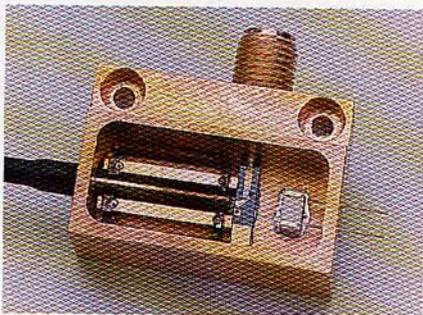
A corto plazo, la aplicación de la optoelectrónica en radiocomunicaciones de microondas tiene un interés prometedor en campos tales como sistemas de telecomunicaciones móviles, estaciones terrestres y de microondas, y equipos de satélites. Este artículo presenta las características necesarias de los componentes básicos y analiza sus posibles ventajas en cada uno de los campos.

Introducción

En los últimos años, la fibra óptica ha provocado una revolución técnica en diferentes campos, desde la transmisión de largo alcance al cableado de placas.

Este artículo indica la aplicación de estas técnicas en la transmisión de microondas para sistemas de comunicaciones de radio.

Dentro de Alcatel, la existencia de grupos de expertos tanto en transmisión por fibra óptica como en sistemas que utilizan altas frecuencias (desde UHF a la banda X y por encima), colocan a la compañía en una buena posición para explotar las posibles sinergias y, en particular, para promover la introducción de alimentadores ópticos



Módulo láser de microondas.

de microondas en sistemas de radiocomunicaciones.

En este artículo se presenta en primer lugar las características claves de los componentes optoelectrónicos, después brevemente sus aplicaciones en alimentadores de transmisión, estaciones terrenas y de microondas, sistemas de telecomunicaciones de radio móvil y, finalmente, en sistemas espaciales.

Componentes

En los alimentadores ópticos de microondas, la señal de microondas de entrada se convierte, utilizando una fuente de luz modulada, en una señal óptica modulada en amplitud que, tras su propagación, se convierte de nuevo al dominio eléctrico mediante un detector óptico ultrarrápido. Por ello, los componentes activos claves son los emisores de luz modulada y los detectores ópticos, mientras que las propiedades pasivas de la fibra determinan las características de propagación. El emisor de luz de microondas puede ser un diodo láser modulado directamente, empleando el mismo electrodo para polarizar y modular la unión, o un láser seguido de un modulador óptico externo. El encapsulado de los componentes, el cableado de las fibras y el diseño de los conectores tienen una gran importancia en campos de aplicación donde el entorno puede ser hostil.

El láser y su encapsulamiento

Los láseres de semiconductores se han desarrollado, de forma creciente, en tecnología de arseniuro de galio (longitud de onda de 0,8 μm) para los discos compactos (CD) y en tecnología del fosforo de indio (longitudes de onda de 1,3 y 1,5 μm) en telecomunicaciones.

Debido a su corta longitud, los láseres de semiconductores son intrínsecamente muy rápidos, pero su utilización en aplicaciones de microondas no es directa por las limitaciones de banda en el acceso eléctrico: además de con el propio chip del láser, hay que tener un cuidado especial con su encapsulado para conseguir una respuesta en frecuencia plana, de banda ancha. Por ejemplo, un láser de CD está limitado por su encapsulado a 1 ó 1,2 GHz. Un láser encapsulado para telecomunicaciones digitales puede requerir una anchura de banda muy grande (comercialmente por encima de 5 GHz), pero la respuesta en frecuencia no es lo suficientemente plana para aplicaciones de microondas de banda ancha. Por lo tanto, se necesita un diseño especial del encapsulado como el mostrado en la foto de la izquierda.

Debido a que el láser debe usarse por debajo de su frecuencia de resonancia, la modulación por encima de 4 GHz necesita de una optimización del propio chip del láser. Los últimos progresos en semiconductores de pozos cuánticos han elevado la posibilidad de modulación directa de microondas del láser hasta los 15 GHz.

El factor de ruido y la linealidad interna son características críticas de los láseres en las prestaciones de los sistemas. Los últimos avances en el diseño de los componentes de telecomunicaciones dan ahora la posibilidad de usar estas características en ingeniería, especialmente, en aplicaciones de microondas.

Moduladores ópticos

La modulación directa de los láseres proporciona una forma muy fácil de generar haces ópticos de microondas

de hasta 10 GHz. Los moduladores externos, que se pueden insertar en la fibra después del láser, pueden modular la luz a una frecuencia mucha mayor. Se dispone de moduladores comerciales (niobato de litio) para modulación de banda estrecha de hasta 20 GHz, alcanzándose en laboratorio valores superiores. La utilización de los moduladores externos es delicada y, por tanto, no son muy atractivos para aplicaciones de campo. La solución más prometedora vendrá con el progreso de los moduladores integrados (fabricados junto con el chip del láser en el mismo proceso).

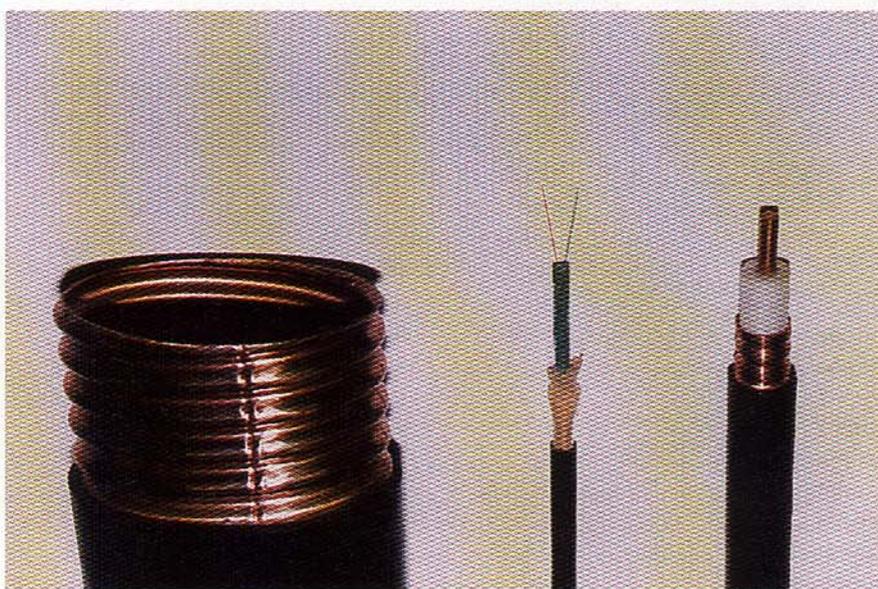
Defectores ópticos

La anchura de banda intrínseca de los detectores de semiconductores puede superar ampliamente a la de los láseres, pero, de nuevo, el encapsulado es crítico para conseguir una respuesta de frecuencia plana, necesaria en aplicaciones de microondas. En la actualidad, se dispone comercialmente de detectores muy eficaces, con una anchura de banda que pasa de los 12 GHz.

Fibras y cables

Se dispone en la actualidad a bajo coste de fibras monomodo de óxido de silicio, desarrolladas para telecomunicaciones, con propiedades como la atenuación y la anchura de banda cercanas al límite teórico. Estas fibras pueden propagar luz a 1,5 μm por más de 15 Km, con solo un 50% de pérdida de energía y no presentar, prácticamente, limitaciones de anchura de banda, ya que su margen se extiende por encima de miles de GHz. Estas fibras se emplean directamente en aplicaciones de microondas.

Los cables de fibras están ya bien dispuestos para la comunicaciones digitales. Además, se han diseñado requisitos específicos, como cables mixtos con hilos de cobre para equipos de potencia ó cables muy compactos diseñados para entornos hostiles, y que pueden usarse en sistemas de microondas.



Tamaños comparativos de alimentadores de microondas.

Acoplamiento y conectores

Debido al pequeño tamaño del núcleo de la fibra monomodo, son aspectos críticos el acoplamiento de componentes optoelectrónicos y la conexión del núcleo de la fibra. Además, hay que poner especial atención en las pérdidas de retorno de las aplicaciones de microondas. Sin embargo, actualmente se dispone de conectores ópticos de cables de fibra para su utilización en el campo, e incluso han aparecido recientemente en el mercado conectores tácticos para trabajar en condiciones ambientales difíciles.

Posterior integración

Todos estos componentes básicos permiten desarrollar sistemas de comunicaciones ópticas de microondas. Sin embargo, la optimización de costes debe requerir una posterior investigación para integrar componentes eléctricos tales como MMCI, excitadores básicos o detectores, conectores de bajo coste, etc..

Interés de los alimentadores ópticos de microondas (AOM)

Ventajas principales

Las características de los cables de fibra óptica que chocan, a primera vista, al diseñador de sistemas son sus

pequeñas dimensiones y su flexibilidad en comparación con los alimentadores eléctricos usuales (foto de arriba), y sus bajas pérdidas por unidad de longitud, junto a las posibilidades de aislamiento galvánico y a la insensibilidad a la radiación de radiofrecuencias.

Las dimensiones físicas y la flexibilidad de las fibras son razones para su éxito en cableados complejos que sean sensibles al peso y al volumen. Sus capacidades de transmisión abren el camino de la distribución de señales en antenas compuestas, las cuales no se podrían construir de otra manera. Para un cableado más simple, la reducción del peso y de las dimensiones dirigen la evolución del equipo hacia soluciones más compactas y ligeras.

Las muy bajas pérdidas por unidad de longitud permiten diseñar sistemas independientes de la longitud del alimentador entre componentes o subsistemas.

Introducción de los AOM

Con esta perspectiva tan atractiva, Alcatel comenzó a analizar la manera de introducir los AOM en diferentes campos. Rápidamente se vio que, en general, los AOM no reemplazarían directamente a sus equivalentes eléctricos de los sistemas actuales; no obstante, su introducción debe ser consi-

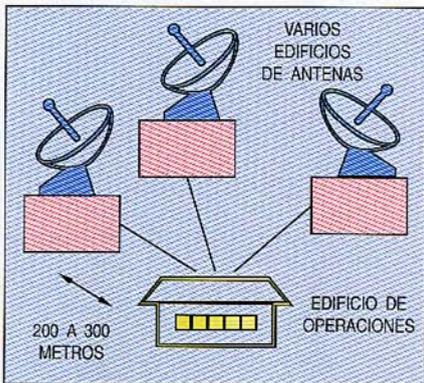


Figura 1 - Estación terrena muy grande.

derada desde la fase de diseño de los sistemas de nueva generación. Se deben tener en cuenta dos importantes factores:

- que la necesidad de transductores optoelectrónicos en ambos extremos de los alimentadores ópticos lleve a la instalación de elementos activos próximos a la antena (amplificadores de bajo ruido o de potencia),
- que las funciones asociadas viables con los alimentadores eléctricos, tales como transmisión de potencia, se deben realizar de forma diferente con los AOM.

La integración de los AOM en la fase de diseño de un nuevo sistema implica el convencer al diseñador y a los posibles usuarios de estos sistemas que esta técnica está lo suficientemente madura.

El trabajo multidisciplinario realizado en Alcatel para familiarizar a los posibles usuarios con todos los aspectos de los futuros AOM hace posible el proponer una gama de soluciones a medida, según requisitos específicos.

Estaciones terrenas

Hay dos tipos diferentes de estaciones terrenas que se pueden aprovechar de los AOM:

- las estaciones internacionales muy grandes para enlaces entre el edificio de operaciones y las posiciones de las antenas (Figura 1).

- los VSAT (terminales de apertura muy pequeña) para enlaces entre la unidades internas, situadas en las instalaciones del usuario, y unidades externas asociadas a las antenas (Figura 2).

Estaciones muy grandes

Las distancias entre los edificios son de unos pocos cientos de metros y las señales transmitidas son bien frecuencias intermedias (IF 70/140 MHz), bien frecuencias radio (RF 4/6 ó 12/14 GHz). Los alimentadores eléctricos requieren guíaondas para enlaces de RF, mientras que los AOM son más fáciles de instalar y permiten situar los convertidores en el edificio de operaciones.

VSAT

El VSAT es un terminal de satélite de bajo coste diseñado para proporcionar servicios de datos interactivos entre miles de estaciones remotas. Las unidades internas y externas se sitúan usualmente dentro del mismo edificio, siendo las señales transmitidas de banda ancha (500 MHz) en el margen de frecuencias de 0,9 a 1,475 GHz.

Actualmente, se utilizan grandes cables coaxiales con amplificadores de línea y conectores de cables; su sustitución por los AOM daría lugar a una gran mejora en la facilidad de la instalación.

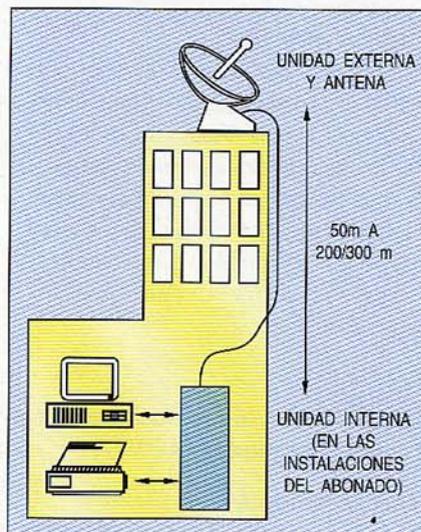


Figura 2 - Terminal de apertura muy pequeña (VSAT).

Interés de los AOM

En las aplicaciones anteriores, el AOM proporciona mayor flexibilidad, permite independencia de la distancia, elimina los conectores de cables, abre nuevas posibilidades de operación y podría reducir el coste del equipo.

Sin embargo, los AOM no deben degradar la calidad global del enlace y, por consiguiente, tienen que cumplir especificaciones estrictas relacionadas con las respuestas de amplitud y fase, el ruido introducido por el enlace y la linealidad. En la Tabla 1 se dan características típicas para la banda C.

Sistemas de radio móvil

Los futuros sistemas de radio móvil, tales como el DCS 1800 (sistema de comunicación digital a 1800 MHz) y el UMTS, utilizarán una estructura microcelular para conseguir un alto grado de reutilización de frecuencias y para reducir la potencia requerida del transmisor en el terminal móvil. Sólo esta arquitectura, combinada con técnicas de radio eficaces, podrá soportar la enorme densidad de tráfico necesaria en estos sistemas. Consecuentemente, se incrementará el número de estaciones base y, adicionalmente, aumentará rápidamente el número de procesos de búsqueda desde microcélulas a picocélulas. Para superar estos problemas y disminuir el coste de la infraestructura tiene que reducirse la complejidad de las estaciones base y centralizarse en un equipo controlador muchas funciones necesarias para el proceso de señal, la generación de radiofrecuencias y, en especial, para la ejecución de una búsqueda, equipo que a su vez controla a un grupo de estaciones base de baja complejidad.

Arquitectura del sistema

Debido al rápido progreso de la tecnología de comunicaciones ópticas, está planificado implantar interconexiones entre equipos controladores y estaciones base con AOM, lo que permite la fácil transmisión de señales de microondas a través de grandes distancias. En la Figura 3 se presenta el diagrama

de bloques de dichos enlaces. Todas las funciones de proceso de señal, como codificación, generación y modulación de portadoras de microondas en el transmisor y las funciones inversas del receptor están localizadas dentro del mencionado equipo controlador. Las señales de microondas se dirigen, vía fibra óptica, al amplificador de potencia del transmisor (de 10 a 100 mW) en la estación base y, posteriormente vía duplexor, a la antena. Las señales que son recibidas en la estación base se amplifican en un preamplificador de bajo ruido, que modula directamente al láser de un enlace óptico situado junto a un equipo controlador. Allí, la potencia de salida del receptor óptico se procesa en el receptor convencional de microondas.

Tendencias técnicas

Se han considerado diferentes tecnologías ópticas de transmisión y su interés económico depende de las bandas de frecuencias, las cuales pueden variar desde 1,8 GHz (teléfono sin hilos digital europeo DECT y DCS 1800) a las microondas, entre 37 y 60 GHz para sistemas de banda ancha. Como es probable que las fibras ópticas monomodo,

Características	Unidad	Valor típico
Banda pasante a ± 1 dB	GHz	3,6 - 4,2
Rizado en una banda de 36 MHz	dB	$\pm 0,15$
Nivel nominal de entrada	dBm	+ 5
Pérdida de inserción	dB	10 ó 0
Precisión	dB	± 3
Estabilidad	dB	± 1
Retardo de grupo	ns	± 1
Desviación de fase lineal	grado	± 4
Ruido inducido por enlace (densidad espectral de ruido)	dBm/Hz	diferencia
Intermodulación de 3er orden (punto de intercepción IM3)	dBm	> 145 dB/Hz
Conversión AM/PM	grado/dB	1

Tabla 1 - Ejemplo de características en banda C.

ya utilizadas en cables de comunicaciones, sean la solución preferida para todas las frecuencias, la única incógnita importante es la elección de la longitud de onda.

La reducción de costes será de primera importancia. Se han analizado las posibilidades ofrecidas por los láseres del tipo CD (para reproductores de discos compactos) que trabajan en la primera ventana óptica (alrededor de 0,8 μm de longitud de onda). Alcatel ha construido, para una longitud de onda de 1,3 μm , un equipo de pruebas de laboratorio que ha muestra-

do que esta ventana puede ser utilizada con éxito.

No se puede utilizar la modulación directa del láser en sistemas de banda ancha, por lo que Alcatel está estudiando la combinación óptica de portadoras ópticas, las cuales convierten la señal útil a una frecuencia que es igual a la diferencia de frecuencias ópticas.

En cualquier caso, la selección de los componentes ópticos clave impactará en las especificaciones del sistema, siendo importante que el diseño del sistema tenga en cuenta las características de dichos componentes.

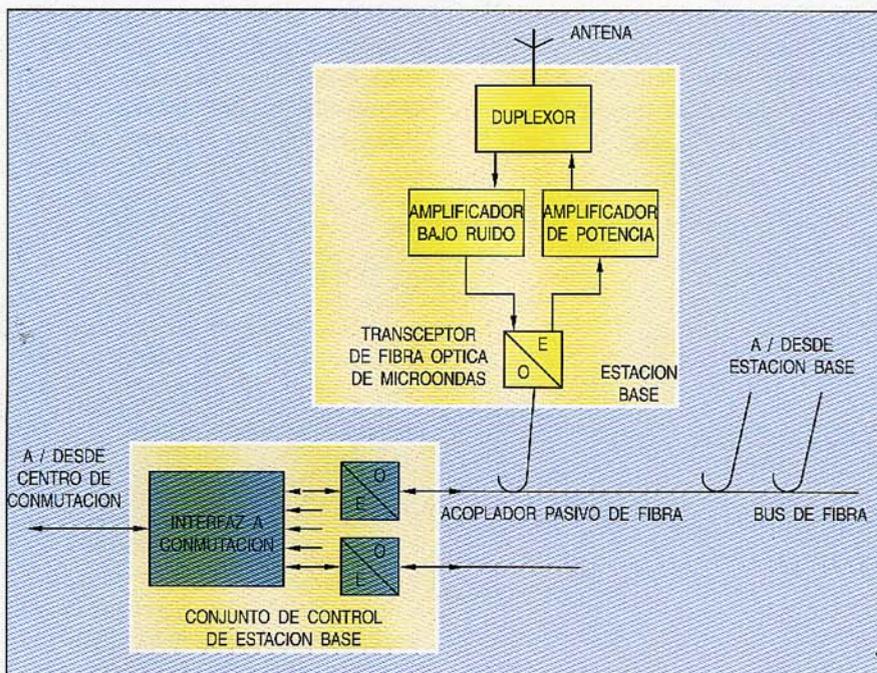


Figura 3 - Fundamentos y características de la infraestructura de fibra para el sistema de radio móvil celular.

Equipo de satélite

En Alcatel se está considerando la aplicación de la optoelectrónica en los satélites de comunicación y de radar, donde se utilizan antenas de microondas. En estas dos aplicaciones, la óptica de microondas es atractiva para las baterías de antenas de fase que necesitan transportar y controlar un elevado número de señales de microondas (Figura 4). Los principales objetivos de aplicación de la optoelectrónica son el obtener satélites de menor peso, ya que los cables de fibra óptica son más ligeros que los cables eléctricos de microondas, y el simplificar el hardware del concentrador de haz utilizando la inmunidad electromagnética intrínseca (EMI), que es importante cuando existen numerosas señales entre los elementos cercanos de la antena

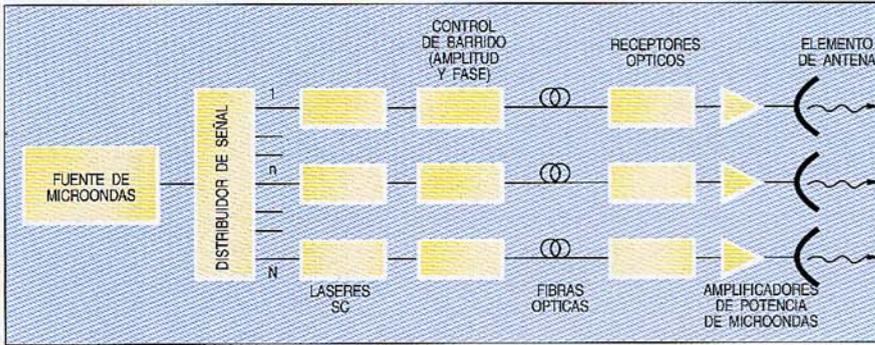


Figura 4 - Disposición en batería de antenas ópticas de fase.

Óptica de microondas en una red concentradora de haz

Como se muestra en la Figura 5, existen diferentes enfoques para usar la optoelectrónica de microondas en los concentradores de haz. Se pueden considerar dos familias de concentradores de haz, bien con óptica de ondas guiadas para procesamiento individual de las señales de microondas, bien con óptica de elementos convencionales para procesamiento global del concentrador de haz. Cuando se utiliza la óptica de guíasondas, se pueden transportar simplemente haces de microondas a los elementos mediante alimentadores de antenas tras el concentrador eléctrico de haz o utilizar dispositivos de onda guiada para realizar la propia concentración del haz (mediante el proceso óptico de las señales de microondas). Las otras posibilidades son usar óptica convencional en el concentrador de haz bien por transformación óptica de Fourier (basada en el hecho de que la difracción realiza de forma natural una transformación de Fourier), bien por concentración discreta de haz mediante matrices de moduladores que operan sobre un único haz de área grande. Estos métodos basados en la óptica convencional son, en principio, muy atractivos pero se basan en componentes como matrices de moduladores de fase y amplitud, en la infancia en la actualidad. La amplificación óptica también puede ser atractiva para compensar las pérdidas en una red con divisores ópticos pasivos.

Antenas de telecomunicación y de radar

En las antenas multielementos de telecomunicaciones con un pequeño

número de elementos radiantes (típicamente menos de cien), el concentrador de haz es relativamente fácil de conseguir por medios eléctricos y los ópticos no serán fácilmente competitivos. El menor peso del cable de fibra óptica tiene poca importancia ya que la distancia entre el núcleo de satélite y la antena es pequeña. Aunque la inmunidad EMI es un argumento de peso a favor de la óptica, se debe confrontar con el aumento de consumo y la más baja fiabilidad de los elementos ópticos activos. Posiblemente, el acoplamiento óptico podría ser interesante en el caso de proyectos futuristas en los que la antena esté mecánicamente desacoplada del satélite, que llevaría a interconexiones más largas.

En el caso de un mayor número de elementos radiantes, para antenas de telecomunicaciones multihaz (200 elementos) o antenas de radar futuras (varios miles de elementos), la com-

plejidad del concentrador de haz aumenta y la óptica puede abrir nuevas soluciones. El argumento del EMI y el evitar un peso y volumen excesivo son factores de peso a favor de la óptica. El procesamiento de las señales de microondas llega a ser, adicionalmente, atractivo en los enlaces ópticos por fibras. Estas técnicas están siendo consideradas en Alcatel.

Existen otras áreas de interés de la óptica para su aplicación en satélites. En un plazo relativamente corto, las redes ópticas de control electrónico son muy prometedoras para satélites de telecomunicación y de radar. El control directo de los componentes electrónicos (p. ej., por acceso óptico fotosensible) será, entonces, una extensión directa de dichas redes. El concentrador de haz óptico se aplicará más tarde.

Conclusiones

Las áreas de aplicación de los AOM están siendo detalladamente investigadas dentro de Alcatel. Se están considerando tanto los fundamentos de la óptica como los sistemas.

Para asegurar la viabilidad técnica, ya se ha realizado la mayor parte del trabajo de investigación. Sin embargo, se necesitan aún esfuerzos de desarrollo para cumplir los objetivos de coste de estos sistemas.

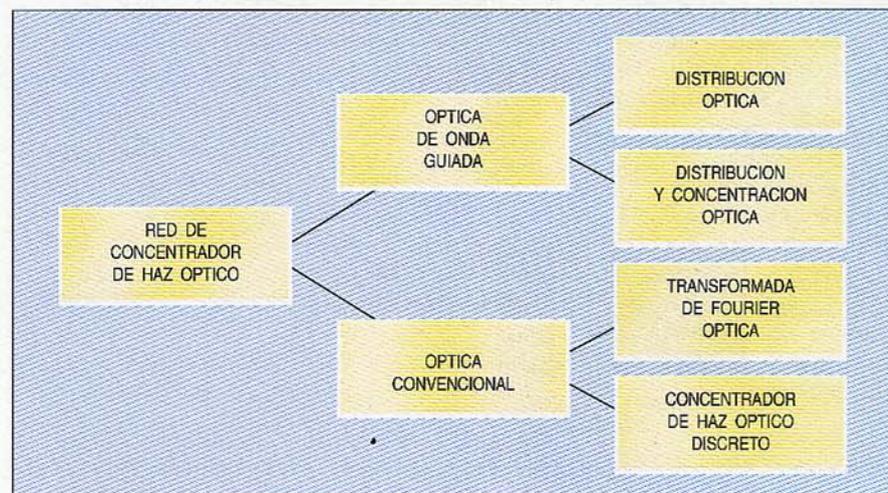


Figura 5 - Óptica de microondas en la red concentradora de haz.

Los AOM no son directamente sustitutos de sus equivalentes eléctricos, pero ofrecen arquitecturas de sistemas prometedoras y nuevas en las áreas de estaciones terrenas, radio móvil, antenas multielemento y equipo de satélite.

José Chesnoy nació en 1954. Es antiguo alumno de la Ecole Polytechnique y Doctor por Orsay (1981). Estuvo inicialmente involucrado en actividades de investigación en el CRNS, tras lo cual pasó a Alcatel Alsthom Recherche en 1989. El Dr. Chesnoy está en la actualidad a cargo de la división de Fotónica y Electrónica de Alcatel Alsthom Recherche, donde se estudia la viabilidad de los sistemas de conmutación y transmisión óptica, y en donde la amplificación óptica juega un importante papel.

Rolf Heidemann recibió su diploma de graduado y el doctorado en Física en el instituto de física aplicada Westfälische Wilhelms Universität Münster en 1976 y 1983, respectivamente. Entre 1976 y 1983 fue ayudante de investigación en Münster. En 1983 ingresó en Alcatel SEL Research Center, siendo jefe de la división de sistemas de transmisión óptica en 1985. En la actualidad, el Dr. Heidemann está trabajando en sistemas CATV analógicos y multigigabit digitales y en la aplicación de tecnologías fotónicas en sistemas de transmisión de microondas por fibra óptica.

Jacques Joseph nació en Francia en 1950. Se graduó en la Ecole Polytechnique y en la Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications. Ingresó en 1973 en Thomson CSF como ingeniero de diseño, haciéndose cargo de un grupo de investigación sobre procesamiento de señal, procesamiento de imagen y propagación acústica. En 1983 pasó a la División de Espacio de Thomson CSF, más tarde convertida en Alcatel Espace. Actualmente es director de I+D en Alcatel Espace y de la división espacial de Alcatel Radio, Space and Defense, así como director del Centro de Investigación de Alcatel Espace.

V. Kumar es graduado BSC en ingeniería por el Punjab Engineering College, India y MS y Doctor en ingeniería de comuni-

caciones por la Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris, Francia. Tras doctorarse trabajó para SAT-Paris en el campo de procesamiento de señales digitales para su aplicación en la codificación de voz y ecualización de datos en modems de líneas telefónicas. Ingresó en BEL en India, donde trabajó en el diseño y desarrollo de técnicas de radio para aplicaciones de radar. En los últimos cuatro años, trabajando en Alcatel, ha participado en la normalización de GSM y en el diseño de sistemas celulares digitales. El Dr. Kumar tiene diferentes patentes y publicaciones técnicas en los campos anteriores.

Alain De Place nació en 1983 en Aix-en-Provence, Francia. Obtuvo el grado de ingeniero en la Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris, en 1961. A continuación ingresó en la división de microondas de Thomson CSF donde trabajó en la investigación y desarrollo de diferentes temas, que van desde los transistores a las hiperfrecuencias. Publicó hace quince años un artículo sobre la óptica de las fibras en revista de Thomson. El Sr. De Place trabaja en la actualidad en el departamento de sistemas militares de Alcatel Telspace en proyectos avanzados, particularmente en los efectos electromagnéticos de las explosiones nucleares. Es especialista de Telspace en IEMN-HA.

D. Lemaître nació en 1951 en Neuilly-sur-Seine, Francia. Empezó a trabajar en 1971 en Thomson CSF como técnico electrónico, participando en el estudio de frecuencias intermedias para enlaces de microondas. En 1984 obtuvo el diploma ENSEA en ingeniería, trabajando después en el diseño de modems analógicos y digitales en Telspace. El Sr. Lemaître es en la actualidad jefe de la actividad de modems de estaciones terrenas en Alcatel Telspace.

El futuro de la conmutación fotónica

J. Dupraz
J.-M. Gabriagues
J.-B. Jacob
P. Speier

Alcatel CIT, Vélizy, Francia
Alcatel Alsthom Recherche, Marcoussis, Francia
Alcatel CIT, Lannion, Francia
Alcatel SEL, Stuttgart, Alemania

Una vez normalizada la transmisión óptica en la red de enlaces y comenzada a introducir en el área de abonados, se está considerando con gran interés la posibilidad de usar la conmutación óptica. En particular, se añade una nueva tecnología — la conmutación de longitud de onda — a las ya tradicionales de conmutación de tiempo y espacio. Esto debería hacer posible el aprovechamiento total de la enorme anchura de banda de las señales ópticas y el mantenimiento de la continuidad en el camino óptico.

Introducción

La transmisión óptica está ya firmemente establecida en la red de enlaces y próximamente comenzará a introducirse en el bucle de abonado para proporcionar servicios de banda estrecha y ancha. En la actualidad, los nodos de conmutación (unidades de distribución de línea, transconectores, conmutadores) trabajan con señales electrónicas obtenidas de señales ópticas por demodulación (p. ej., la conversión fotón/electrón). La siguiente etapa lógica debería ser el conmutar fotones en vez de electrones usando la *conmutación fotónica*, que tiene la gran ventaja de conservar la continuidad extremo a extremo del camino óptico.

Se suscitan tres preguntas, la primera es si la conmutación fotónica es viable y que tecnologías serían necesarias. La segunda es que cuales son los beneficios reales en coste, y la tercera es que es lo que debería hacerse para adaptar las normas de transmisión y procedimientos de gestión de red existentes y así beneficiarse de la introducción de las técnicas de conmutación óptica. En este artículo solo se contempla la pri-

mera, dándose una visión general de técnicas y aplicaciones de conmutación fotónica.

La conmutación óptica actúa sobre señales multiplexadas, modulando portadoras ópticas a longitudes de onda normalmente en intervalos alrededor de 1300 nm y 1550 nm. Como las señales se deben demultiplexar para ser conmutadas, hay que considerar las técnicas de multiplexación empleadas en transmisión. En una conmutación fotónica pura, la demultiplexación tiene que realizarse directamente sobre los fotones, sin demodulación.

En línea con las actuales normas de transmisión, las portadoras ópticas también se modulan con señales que no tienen que ser conmutadas, pero que tienen que demodularse en cada nodo para ser procesadas localmente. Un ejemplo es SOH/POH (tara de sección/tara de trayecto) del esquema de multiplexación JDS (jerarquía digital síncrona). Tras la demodulación, todas las señales están disponibles en forma electrónica, incluyendo aquellas a conmutar, de tal forma que parecería natural la aplicación de la conmutación electrónica. Las ventajas de utilizar la conmutación fotónica tienen que ser cuidadosamente investigadas y justificadas caso a caso.

Actualmente se utilizan dos técnicas básicas de conmutación con señales electrónicas: la conmutación espacial y la temporal. En óptica, se puede usar también la longitud de onda de la portadora de señal en conmutación, para poder añadir posteriormente la conmutación de longitud de onda¹.

Primero se revisan brevemente, a nivel de transporte, los principales aspectos de las técnicas de conmutación fotónica.

Conmutación espacial fotónica: Esta técnica implica, durante un determinado período de tiempo, la desviación transparente de un flujo de fotones desde una dirección (haz en espacio libre) a otra, o desde una línea (guía-onda) a otra, es decir conmutación 3D y 2D. Se puede conseguir con espejos móviles, prismas o fibras, puntos de cruce físicos, hologramas, etc.

Conmutación de longitud de onda fotónica: Esta técnica se basa en cambiar la longitud de onda de la señal sobre la misma línea y en el mismo intervalo temporal. Se puede conseguir con fuentes de longitud de onda sintonizable (ágiles), filtros pasabanda ópticos sintonizables y convertidores de longitud de onda.

Conmutación temporal fotónica: Se realiza pasando la señal desde un intervalo temporal a otro (síncrono o asíncrono) sobre la misma línea y con igual longitud de onda. Esto requiere registros y memorias ópticas.

Naturalmente, todas estas técnicas se pueden usar conjuntamente.

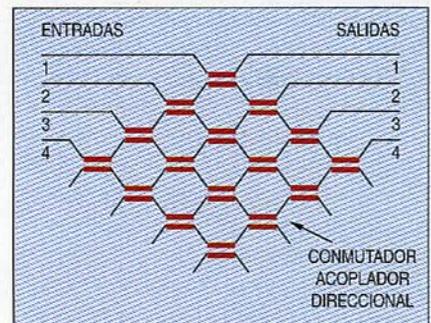


Figura 1 - Etapa de conmutación espacial basada en acopladores direccionales 2x2.

Tipos de conmutación fotónica

Aplicaciones de conmutación espacial

Además de usar etapas de conmutación espacial en una estructura de conmutación fotónica, están previstas dos aplicaciones importantes de productos independientes — la distribución y la protección de líneas. En el caso de distribución de líneas, una línea o haz entrante se conecta a una o muchas (emisión y/o difusión) líneas o haces salientes. La protección de líneas se emplea para proteger el equipo de transmisión, incluyendo las fibras, contra los fallos. Esto es particularmente importante en el lado del abonado donde las fibras no están duplicadas. La conmutación espacial se utiliza para reemplazar el dispositivo en fallo (transceptor óptico, línea óptica) por un dispositivo de repuesto.

En las aplicaciones de distribución y protección de líneas, las señales de control no necesitan ser sincronizadas con el flujo de datos o con las señales a conmutar. Por ello el tiempo de conmutación no es crítico y puede ser del orden de unos pocos segundos. Sin embargo, este no es el caso en una etapa espacial que trabaje concurrentemente con etapas temporales en una estructura de conmutación. Aquí, la conmutación espacial se debe realizar en un tiempo que es pequeño si se compara con la duración del bit.

Técnicas de conmutación espacial

Conmutadores mecánicos: Usan espejos móviles, prismas o fibras de cristal

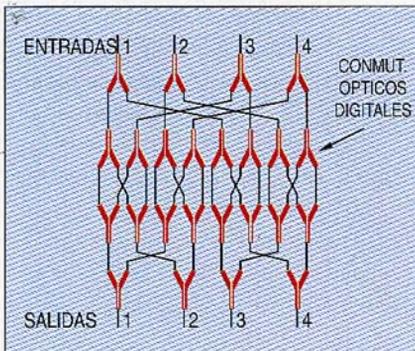


Figura 2 - Etapa de conmutación espacial basada en conmutadores ópticos digitales.

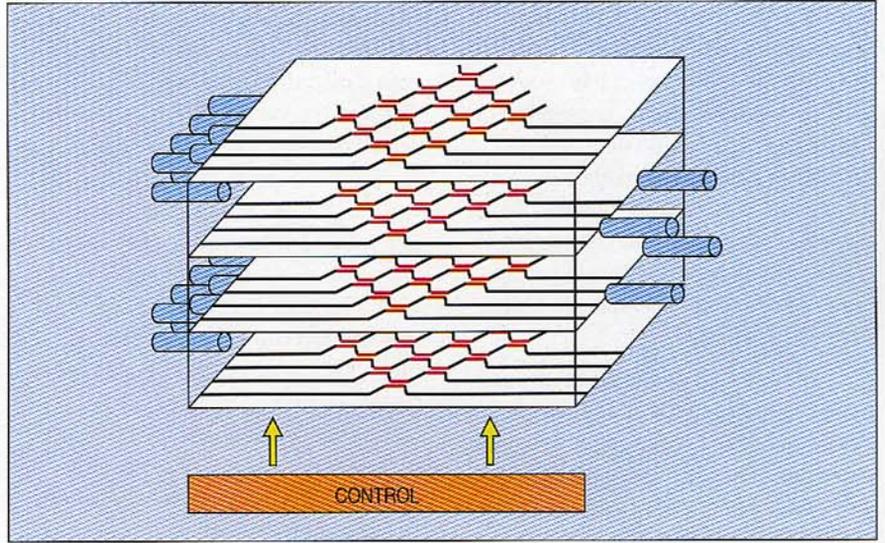


Figura 3 - Matrices 2D integradas con conmutadores verticales proporcionando una estructura de conmutador cuasi 3D.

móviles para interconectar las entradas y salidas ópticas. Una sola fibra saliente se puede conectar a varias fibras entrantes, o viceversa, mediante lentes GRIN (índice gradual) giratorios.

Matrices de conmutación 2D/3D: El método más sencillo para realizar la etapa de conmutación espacial es una matriz planar construida a partir de acopladores direccionales 2 x 2 (Figura 1) o digitales 1 x 2 (Figura 2). Sin embargo, el método de guíaonda planar requiere mucho más espacio que los dispositivos electrónicos equivalentes. Por otro lado, la óptica hace posible realizar la interconexión en espacio libre sin necesidad de guíaondas en la zona central de la interconexión, aprovechándose así la ventaja de la conmutación tridimensional. Esto es, por supuesto, una solución atractiva, pero necesita aún bastante investigación y solo se debe considerar como una posibilidad a largo plazo. Las realizaciones cuasi-3D, que emplean planos de conmutación apilados, ofrecen unas soluciones intermedias atractivas (Figura 3), apropiadas para su uso a corto y medio plazo.

Conmutadores holográficos: La dirección de propagación de un haz de luz se puede controlar por difracción desde una rejilla de fase holográfica, como se

muestra en la Figura 4. Esta rejilla se puede grabar en un cristal fotorefractivo (p. ej., óxido de bismuto germanio) por dos rayos láser interferentes. Aunque el grabado y borrado de la muestra sea relativamente lento, ésta técnica permite el direccionamiento de un número elevado de canales de salida (> 100 x 100).

Aplicaciones de la conmutación de longitud de onda

La conmutación de longitud de onda se puede utilizar, por ejemplo, en MTA para resolver la contienda de n células que tienen que ser conmutadas en el

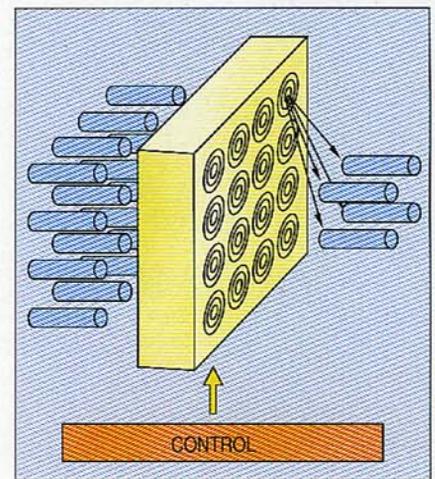


Figura 4 - Estructura de conmutación 3D usando hologramas reconfigurables.

mismo intervalo temporal para una misma salida. Un conjunto de n longitudes de onda — una por célula — se multiplexan entonces en la memoria de salida. La conmutación tiene que sincronizarse con la velocidad de la célula y el tiempo de conmutación debe de ser pequeño comparado con la duración del bit, salvo cuando se toman precauciones para insertar tiempos de protección entre células.

La conmutación de longitud de onda puede usarse también en señales de encaminamiento de aplicaciones de distribución de líneas o con células MTA de encaminamiento dentro de un conmutador MTA. En éste caso, la longitud de onda entrante se conmuta a otra indicada en el puerto de salida. Como resultado de éste *autoenrutamiento preestablecido*, el camino de las señales o de las células a través de la estructura del conmutador se determina por filtrado y distribución pasiva. En el caso de conmutación de células, son aplicables las mismas limitaciones del párrafo anterior en la sincronización.

Técnicas de conmutación de longitud de onda

En la conmutación de longitud de onda, la longitud de onda de la señal entrante se cambia a otro valor predeterminado.

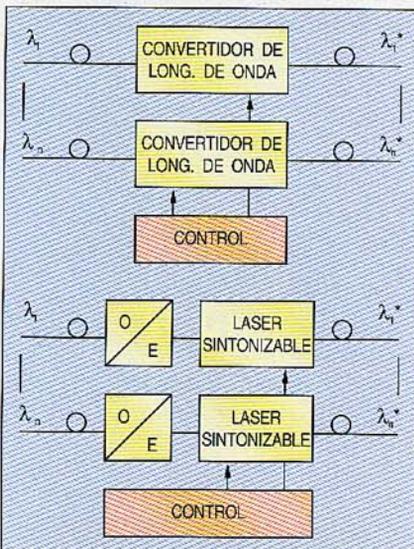


Figura 5 - Uso de convertidores de longitud de onda y láseres sintonizables en conmutación de longitud de onda.

Esto se puede hacer electrónicamente por demodulación de la portadora recibida y modulación de una fuente óptica sintonizada con la longitud de onda preseleccionada. La ventaja de éste método es que no existe relación entre las dos longitudes de onda, las cuales pueden tomar por tanto cualquier valor. Sin embargo, esto no es conmutación fotónica. Una solución puramente óptica usaría convertidores de longitud de onda disparados por las señales ópticas recibidas. Con un convertidor de estructura resonante, la longitud de onda de la señal de disparo debe ser una frecuencia de resonancia. Los convertidores no resonantes no tienen ésta limitación (Figura 5).

Aplicaciones de conmutación temporal

Actualmente, las redes de telecomunicación modernas usan multiplexación síncrona por división en el tiempo para transportar información digital a velocidades binarias que aumentan continuamente y aprovechar la enorme anchura de banda de las líneas de fibra óptica actuales. La multiplexación asíncrona por división en el tiempo, que será introducida en breve, ha sido seleccionada por el CCITT (Comité Consultivo Internacional Telegráfico y Telefónico) como modo de transferencia universal de la futura RDSI-BA (red digital de servicios integrados de banda ancha). La conmutación fotónica tendrá por tanto que realizar la conmutación temporal tanto en modo síncrono como asíncrono.

Las aplicaciones incluyen nodos de distribución de líneas, nodos de transconectores, concentradores y conmutadores reales (es decir, con marcación de llamadas). Obviamente, en todos los casos, la conmutación temporal tiene que sincronizarse con las señales a conmutar y debe realizarse en un tiempo pequeño comparado con la duración del bit.

Técnicas de conmutación temporal

En la conmutación temporal síncrona, el componente básico es la memoria (RAM) que se usa para almacenar la señal (octeto) en un período fijo de

tiempo, igual como máximo a la duración de la trama.

En la conmutación temporal asíncrona se proporciona una memoria FIFO (primero en entrar, primero en salir), donde la señal (célula) puede esperar antes de su transmisión para resolver conflictos con otras señales que accedan al mismo medio. Se usa también un registro de desplazamiento para calcular el síndrome del chequeo de redundancia cíclica de cabecera (HEC: cabecera de corrección de error) y así validar la dirección de la célula.

Tecnología

Componentes fundamentales

La conmutación fotónica en el dominio espacial explotará las técnicas ópticas integradas planares, incluyendo posiblemente implantaciones 3D, para dirigir los datos ópticos desde una entrada física a una salida física de la red de conmutación. Como requisito general, los puntos de cruce elementales deben tener una pérdida de inserción baja (< 1 dB), una velocidad de operación alta (compatible con la velocidad de los datos) y ser insensibles a la polarización. Los parámetros claves de la red de conmutación son el tamaño de la matriz elemental (más de diez puertos de entrada/salida) y la fácil interconectividad de los bloques de conmutación espacial.

Actualmente se están estudiando conmutadores espaciales elementales con diferentes estructuras, como el acoplador direccional 2×2 (Figura 1), el conmutador óptico digital (Figura 2) y el acoplador vertical 2×2 . También se están investigando diferentes tecnologías para la construcción de éstas estructuras, siendo las más importantes las de niobato de litio, fosfato de indio y materiales polímeros. Todas las técnicas son capaces real o potencialmente de operar a Gbit/s en condiciones de control eléctrico atractivamente razonables (por debajo de un voltaje de alimentación de 10 V ó una corriente de 100 mA).

Las matrices de conmutación se formarán con conmutadores elementales en cascada, siguiendo bien el método

de integración híbrido (es decir, conmutadores elementales basados en fosfato de indio hibridados con una red de interconexión pasiva de óxido de silicio sobre silicio, o polímeros) o el de integración monolítica. Todos los esquemas de implantación tienen ventajas y desventajas específicas, pero hay que apuntar que los dispositivos basados en fosfato de indio integrados monolíticamente ofrecen la interesante posibilidad de la compensación *in-situ* de las pérdidas de inserción al integrar secciones de amplificación en las guíaondas.

La conmutación fotónica en el dominio de la longitud de onda se basará en láseres y/o filtros de sintonización rápida y/o en convertidores de longitud de onda. El requisito fundamental de los dispositivos de longitud de onda ágiles es que deben de ser capaces sintonizarse sobre un número significativo (más de 10) de longitudes de onda, con un tiempo de respuesta pequeño respecto a la duración del bit. Actualmente se usan dos modos de implantación de láseres y filtros.

En la primera solución se combinan láseres de sintonización rápida con filtros de longitud de onda fija (Figura 6). Se pueden implantar filtros puramente pasivos basados en el principio tradicional de Fabry-Perot Etalon, con un ancho de onda arbitrario pequeño, para permitir la multiplexación densa de canales multiplexados en longitud de onda (más de un canal por nanómetro). La mayoría de láseres sintonizables disponibles, el tipo DBR (reflector Bragg distribuido) sobre 10 nm^2 , el tipo TTG (guía gemela sintonizable) sobre 30 nm^3 ó el tipo Y-interferométrico sobre 38 nm^4 pueden proporcionar más de diez (y posiblemente hasta cien) canales.

En la segunda solución, se pueden utilizar filtros sintonizables conjuntamente con láseres de longitud de onda fija, siguiendo el principio de operación de *emisión y selección*. En lo referente a las capacidades de sintonización, los resultados disponibles de filtros basados en fosfato de indio son menos atractivos que los obtenidos con láseres debido a la pobre resolución y a la natu-

raleza sensible a la polarización de estos dispositivos. No obstante, se han obtenido resultados prometedores usando una estructura de acoplador direccional de tipo vertical⁵. Además, todos los tipos de filtros sintonizables ofrecen una sencilla implantación de las conexiones de emisión y difusión en sistemas de conmutación de longitud de onda. Sin embargo, ambas implantaciones podrán competir en el futuro desde el punto de vista de su velocidad de operación. Debido a limitaciones físicas de los mecanismos de sintonía, la velocidad de sintonización de los láseres y filtros parece estar limitada al margen de los nanosegundos.

El papel del convertidor de longitudes de onda debe ser resaltado ya que parece claro que será el componente fundamental de los sistemas de conmutación de longitud de onda. En particular, será el interfaz ideal entre las etapas de redes de conmutación de longitudes de onda multietapa. Este dispositivo debe tener una entrada óptica, una salida óptica y una (ó varias) entrada(s) eléctrica(s) de control. Su función es cambiar directamente la longitud de onda portadora de la señal óptica modulada on/off recibida, siendo la longitud de onda de salida determinada por la entrada eléctrica de control. Se ha probado la operación de un convertidor monolítico de control usando o el proceso de absorción saturable del

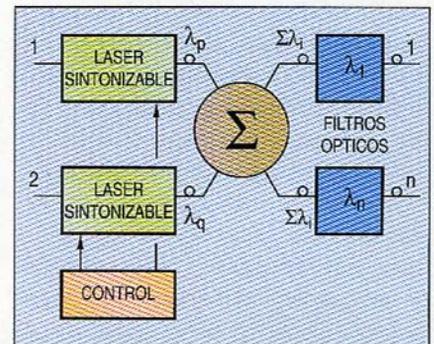


Figura 6 - Conmutación de longitud de onda basada en láseres sintonizables rápidos y filtros ópticos pasivos.

material activo en el fosfato de indio, usado en láseres⁶ y amplificadores⁷, o un láser tipo-Y⁴. Aunque los resultados son esperanzadores, aún se necesita mucho trabajo para alcanzar una operación de velocidad alta sobre un amplio intervalo espectral.

En lo relacionado con la conmutación temporal, la función básica a realizar es almacenar las señales ópticas para permitir el intercambio de intervalos de tiempo. Desafortunadamente, los elementos de memoria biestable fotónica están aún en una etapa de desarrollo inicial y son solo aceptables en sistemas de espacio libre debido a su organización como matrices bidimensionales. Consecuentemente, todas las soluciones existentes (SEED — dispositivo de efecto auto electroóptico —, VSTEP — dispositivo electrofotónico de transmi-

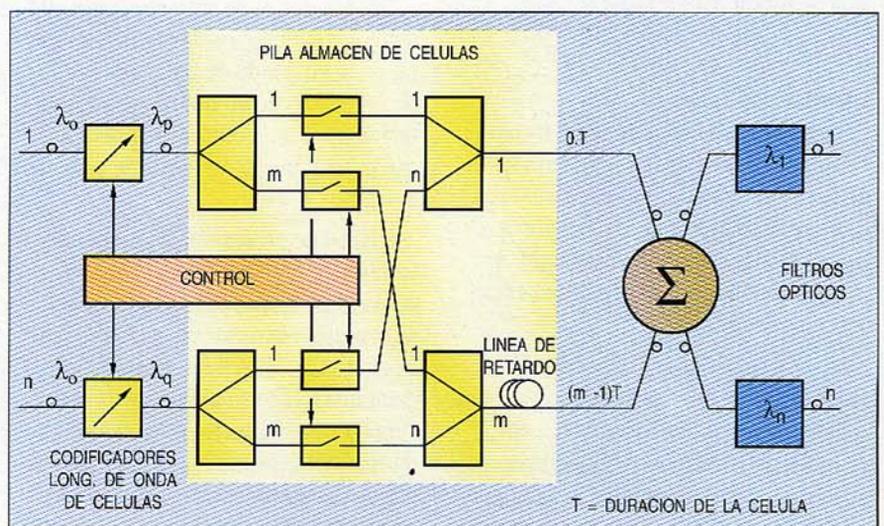


Figura 7 - Memoria de tiempos MTA implantada utilizando líneas de retardo ópticas.

sión vertical a superficie —, y microresonadores) presentan los mismos problemas de implantación práctica en sistemas de transporte de fibra óptica. En la conmutación de paquetes o de células, las líneas de retardo de fibra parecen ser en la actualidad la única solución práctica, ya que aprovechan el tiempo de propagación de las señales a lo largo de la fibra (5 ns/m) como alternativa al almacenamiento real de datos.

Las ventajas de las líneas de retardo de fibra son su total transparencia a las señales, su casi nulo consumo de potencia, y su capacidad para manejar simultáneamente señales multiplexadas en longitud de onda. Los principales inconvenientes son el tiempo de almacenamiento fijo, la relación entre duración del intervalo de tiempo y velocidad binaria, y el significativo tamaño de su implantación.

Un ejemplo de almacén de tiempos MTA⁸ con m tiempos de espera, implantado utilizando m líneas de retardo, se muestra en la Figura 7. La multiplexación y filtrado de las longitudes de onda (n valores $\lambda_1, \dots, \lambda_n$) se usa para encastrar las células entre n entradas y n salidas. El número de líneas de retardo depende únicamente de la calidad del servicio en términos de probabilidad de pérdida de célula, mientras que el número de longitudes de onda es igual al número de puertos de acceso. Es interesante señalar que multiplexando la longitud de onda se puede usar una sola memoria para n salidas.

Interconexión óptica

En un sistema de conmutación fotónica, los elementos de conmutación se deben interconectar ópticamente. Para proporcionar una solución económica y técnicamente aceptable, habrá que desarrollar nuevas tecnologías para estas interconexiones.

La interconexión por fibras ópticas monomodo se considera solamente una solución temporal debido al elevado volumen de empalmes o conectores requerido y al alto coste del ensamblaje y alineamiento de la fibra. Serán necesarias guíaondas definidas litográfica-

mente sobre sustratos de gran extensión y una práctica de equipo *óptico* para permitir acoplamientos ópticos múltiples autoalineados y densidades de interconexión elevadas.

Las guíaondas de óxido de silicio sobre sustratos de silicio pueden ser usadas en pequeñas unidades (creando una especie de módulo multichip óptico), mientras que las guíaondas de polímero serán preferibles en unidades más grandes debido a su compatibilidad con las placas de circuito impreso de polímero, que son necesarias en las interconexiones eléctricas y alimentación de los elementos activos.

Se requiere una matriz de microlentes planar con una inclinación dada para enfocar la luz reflejada de la superficie de entrada o salida sobre los elementos del conmutador. Esto permitirá el acoplamiento simultáneo de muchas de las entradas y salidas del elemento de conmutación con las placas ópticas, siempre que todas las posiciones laterales estén bien definidas y reproducidas precisamente durante la fabricación. Consecuentemente, es esencial que todos los elementos (elementos de conmutación, series de lentes y placas ópticas) se fabriquen con alta precisión usando etapas litográficas de alta resolución similares a las usadas en el procesamiento de semiconductores. Esto es también necesario en las técnicas de alineamiento, tales como las ranuras en V grabadas y los microtopes galvanizados.

Las funciones de reencaminamiento lento y conmutación se pueden implantar en la guíaonda de polímero añadiendo secciones de un polímero óptico no lineal, cuya temperatura se puede controlar usando calentadores de película delgada.

Dentro de un sistema de conmutación e interconexión fotónica, las guíaondas ópticas tienen que conectarse al mundo exterior de las fibras ópticas individuales o a otras matrices de guíaondas. Esto se puede realizar por acoplamiento directo o por algún tipo de elemento imagen. El acoplamiento directo es apropiado para una pocas conexiones individuales. Los elementos imagen pueden ser sistemas de lentes

normalizadas u hologramas más sofisticados, que proporcionan la imagen de cada guíaonda, incluyendo los cambios del perfil de campo próximo y la forma de la guíaonda individualmente para un gran número de conexiones de guíaondas, usando una estructura compleja generada por ordenador de las zonas de absorción o del índice de refracción.

Conclusiones

Un breve seguimiento de las técnicas aplicables a la conmutación fotónica ha mostrado que ofrece un nuevo método — multiplexación de longitud de onda —, que tiene posibilidades interesantes de conmutación, las cuales no existen en los sistemas electrónicos.

La conmutación espacial bidimensional se utiliza actualmente en matrices ópticas integradas de pequeña capacidad, siendo los polímeros la tecnología del futuro prometedora. La conmutación tridimensional que usa hologramas es una atractiva posibilidad a largo plazo.

La evolución es rápida en el área de la conmutación de longitud de onda. Una amplia investigación está llevando a desarrollar láseres y filtros sintonizables rápidamente y convertidores de longitud de onda. El objetivo es aumentar el número de longitudes de onda disponibles (canales) y su agilidad, es decir la velocidad de sintonización del dispositivo.

Aún se necesita mucha investigación para desarrollar las memorias y registros de desplazamiento adecuados para la conmutación óptica temporal. Antes de que estén disponibles, las memorias se pueden implantar con líneas de retardo ópticas para redes de conmutación MTA de tamaño pequeño a mediano.

Idealmente, la conmutación fotónica pura implica que no haya demodulación de la señal, y por tanto ningún corte en la continuidad del camino óptico. Sin embargo, las normas de transmisión y los procedimientos de gestión de red existentes requieren la demodulación de las señales ópticas recibidas. Así como esto no evitará el

que se utilicen técnicas ópticas en los conmutadores (para interconexión de placas y paneles), solo se alcanzará el total aprovechamiento de las técnicas ópticas en las telecomunicaciones con un método global que requerirá algunas adaptaciones de las normas y procedimientos actuales.

Referencias

- 1 J. Dupraz y G. Le Roy: Introduction of Optics in Switching Systems: *Onde Electrique*, Noviembre/Diciembre 1990, volumen 70, n° 6, págs 41—45
- 2 T.L. Koch, U. Koren, B.I. Miller: Continuously Tunable 1,5 μm Multiple-Quantum-Well InGaAs P/InP Distributed-Feedback- Reflector Lasers: *Electronic Letters*, 1988, volumen 24, págs 1431—1433.
- 3 S. Ilek, W. Thulke, B. Borchert y M. Amann: Broadband Electronic Wavelength Tuning by Codirectionally Coupled Twin- Guide Laser Diode: *Postdeadline Paper, Technical Digest of European Conference on Optical Communications (ECOC/IOOC 91)*, 21 páginas.
- 4 O. Hildebrand, M. Schilling, E. Idler, D. Baums, G. Laube y K. Wüstel: The Integrated Interferometric Injection Laser (Y-laser): One Device Concept for Various System Applications : *Invited Paper, Technical Digest of European Conference on Optical Communications (ECOC/IOOC 91)*, 39 páginas.
- 5 R.C. Alferness, L.L. Buhl, U. Koren, B.I. Miller, M. Young, T.L. Koch: Broadly Tunable InGaAs P/InP Buried Rib Waveguide Vertical Coupler Filter: *Technical Digest of the IEEE-LEOS Topical Meeting on Integrated Photonics Research*, 9/11 de Abril de 1991, Monterrey, PD 8-1.
- 6 D. De Bouard, G. Da Loura, C. Chauzat, J. Jacquet, J. Benoit, D. Leclerc, J.M. Gabriagues, J.B. Jacob, G. Le Roy: Fast Optical Triggering and Wavelength Switching Using a Distributed Bragg Reflector Laser with a Saturable Absorber: *Proceedings on Photonic Switching*, Optical Society of America, 1991, pág 133. (H.S. Hinton y J.W. Goodman, editores).
- 7 T. Durhuus, B. Fernier, P. Garabedian, F. Leblond, J.L. Lafrayette, B. Mikkelsen, C.G. Jorgensen, K.E. Stubkjaer: High Speed All-Optical Gating Using Two Section Semiconductor Optical Amplifier Structure: *Technical digest of Conference on Lasers and Electro-optics (CLEO 92)*, pág 50.
- 8 J.B. Jacob y J.M. Gabriagues: Photonic Technology for an Access Node in ATM—ISDN: *Telecom 91 Forum Proceedings*, Session 2.2, pág 111.

Jacques Dupraz nació en 1932 en Chaumont, Francia. Se graduó en la Escuela Nacional Superior de Telecomunicaciones de Paris y fue galardonado con un MS en matemáticas aplicadas en la Universidad de Paris; posteriormente trabajó sucesivamente en CNET, el centro de investigación de CSF, y en el Laboratorio Central de Telecomunicaciones. Actualmente el Sr. Dupraz es director de la línea de producto de banda ancha en Alcatel CIT. Desde 1968 ha compartido su trabajo como profesor de la Escuela Superior de Aeronáutica y del Espacio de Toulouse y en la Escuela Superior de Electricidad de Paris.

J.M. Gabriagues nació en 1957 en Nevers, Francia. Recibió la Maestría en Física (1979) y el Doctorado de Tercer Ciclo (1982) de la Universidad de Paris Sur (Orsay). Entró en los Laboratorios de Marcoussis en 1983. Sus actividades de investigación se han realizado sucesivamente sobre fenómenos óptico no-lineales en fibras ópticas y sobre caracterización de fibras avanzadas y transmisión coherente. Desde 1987 ha sido responsable del grupo de Redes Ópticas de Alcatel Alsthom Recherche, ocupándose en la actualidad de la investigación de la aplicación de técnicas fotónicas al conmutador de banda ancha.

Jean-Baptiste Jacob se graduó como ingeniero en la Escuela Nacional de Telecomunicaciones de Paris en 1957. Desde 1960 a 1966 trabajó en CNET (Centro Nacional de Estudios de Telecomunicaciones, France Telecom) en Lannion, Bretaña. Entró en Alcatel CIT, Lannion en 1966 donde estuvo encargado del desarrollo de la primera central digital del sistema Alcatel E10 y segui-

damente se responsabilizó de las especificaciones y arquitecturas para los sistemas RDSI de banda ancha y estrecha. El Sr. Jacob está actualmente encargado de la especificación de la arquitectura de un sistema de conmutación óptica y del estudio de los proyectos asociados.

P. Speier nació en Friburgo, Alemania, en 1958. En 1977 comenzó a estudiar física en la Universidad de Stuttgart. En 1983 entró en la división de Optoelectrónica del Centro de Investigación de Alcatel SEL, siendo el primer responsable del desarrollo de estructuras de detectores PIN y APD utilizando LPE. En 1984 tomó como responsabilidad adicional los procesos MOVPE. En 1987 se responsabilizó del grupo MOVPE y en 1989 llegó a director de epitaxia en la división de Optoelectrónica. Desde 1989 ha sido también el director del programa estratégico corporativo sobre conmutación óptica dentro del Grupo de Investigación de Alcatel. El Sr. Speier está encargado de varios proyectos nacionales y europeos en el área de la optoelectrónica, y es autor/coautor de más de 50 publicaciones.

Los sistemas y componentes optoelectrónicos del futuro

H. Ohnsorge, H. Haupt
P. Desombre

Alcatel SEL Research Center, Stuttgart, Alemania
Alcatel Alsthom Recherche, Marcoussis, Francia

Ha transcurrido un cuarto de siglo desde que se concibió la idea de obtener comunicaciones ópticas a través de una fibra de vidrio. En este período de tiempo el progreso ha sido enorme llegando a los umbrales de la aplicación en masa. Pero aún queda un largo camino por delante antes de que se pueda explotar todo el potencial ofrecido por este medio.

Introducción

El veinticinco aniversario de la transmisión mediante fibra óptica y optoelectrónica se celebró en 1991 en los Standard Telephone Laboratories de Londres, ya que en 1966 Charles Kao, que trabajaba en STL, publicó su famoso artículo¹, en el cual proponía el utilizar la luz para transmitir la información a través de fibras de óxido de silicio. En el mismo año Manfred Börner, que trabajaba en Telefunken, editó una patente sobre "utilización de un láser semiconductor, una fibra de vidrio y un fotodiodo para transmitir señales MIC"². También en 1966, A. Werts propuso la transmisión mediante fibras ópticas³. Estos tres científicos, independientemente, tuvieron la misma idea en el mismo año. En esa época la atenuación de la fibra era del orden de los 1000 dB/Km, y otros científicos pronosticaron que "un láser de semiconductores nunca trabajaría a temperatura ambiente debido a la enorme densidad de corriente necesaria". Pero en 1970 se consiguió el hito crucial: Corning publicó una medida de atenuación de fibra de 20 dB/Km⁴ y Hayashi informó sobre el primer láser capaz de trabajar a temperatura ambiente⁵.

La idea de la transmisión mediante fibra óptica, con la enorme anchura de banda, primero calculada y luego confirmada mediante medidas⁶, del orden de los 140 teraherzios en la ventana de fibra de 0,9 a 1,6 μm inició el concepto de comunicaciones de banda ancha^{7,8} utilizando arquitecturas de sistemas tales como las LAN, MAN y WAN (redes de área local, metropolitana y de zona ampliada).

La transmisión mediante fibra óptica se aplicó en primer lugar a los sistemas de enlaces antes que a las redes de acceso de abonado. En la actualidad, la fibra óptica ha reemplazado por completo a los cables coaxiales en los enlaces de las nuevas instalaciones.

Desde 1970 el progreso de la fibra óptica y de los dispositivos optoelectrónicos ha sido impresionante: en 1980, casi se alcanzó el límite teórico de atenuación (dispersión Rayleigh) y se llegó a tiempos de vida de los láseres de cien millones de horas, deducidos por el método de degradación a alta temperatura.

La previsión de abaratamiento de los precios⁹ se demostró como una realidad en los láseres de los discos compactos, y precios de fibras de 0,25 ECU/m son normales en la actualidad.

El actual estado del arte en la tecnologías de fibras y componentes optoelectrónicos, especialmente debido a los logros tan excelentes conseguidos con amplificadores de fibra dopada de erbio en los últimos años¹⁰, prueba que ha llegado el momento adecuado para introducir a gran escala los sistemas de acceso de abonado que usan la transmisión óptica.

Estado actual

Se dispone en la actualidad de fotodiodos PIN y fotodetectores de avalancha, con estructuras de tipo planar y mesa, con una anchura de banda alrededor de los 20 GHz, y un producto ganancia-anchura de banda del orden de los 100 GHz (APD). La realización de láseres DFB de banda ancha, extremadamente lineales y de alta velocidad (10 a 16 GHz) ha permitido desarrollar modelos de laboratorios de 5, 10 y 20 Gbit/s (utilizando MDT óptica a 20 Gbit/s¹¹), productos en fabricación de sistemas de 2,5 Gbit/s y sistemas de distribución de TV mediante fibra óptica con anchura de banda de hasta 860 MHz¹².

Con los amplificadores ópticos dopados de erbio se ha logrado un progreso revolucionario, ya que ofrecen una ganancia de unos 40 dB (dos bombeos), una salida de 170 mW (cuatro bombeos), y una anchura de banda de cuatro teraherzios, con longitud de onda y amplificación independientes de la temperatura. En 1990 fue posible realizar vanos de 115 Km a 20 Gbit/s sin regeneradores, utilizando un EDFA como dispositivo amplificador de potencia y otro como amplificador en línea¹¹. En ECOC 1991 se mostró como se podían encadenar 26 EDFA, consiguiéndose un vano de 1316 Km a 2,5 Gbit/s^{13,14,15}. La posibilidad de transmitir 10 Gbit/s sobre distancias de un millón de kilómetros utilizando solamente los EDFA conjuntamente con tecnología de solitones se mencionó en ECOC 1991¹⁶. ¡Esto significa que ya no se deberían necesitar los regeneradores en línea!

Los sistemas de distribución de TV basados en fibra óptica que utilizan los EDFA para compartir la costosa fuente de luz - un láser de alta linealidad - y la

fibra entre muchos abonados ya han sido realizados en modelos de laboratorios. Los factores de compartición son de un láser por cada 16000 abonados analógicos ó 265000 digitales¹⁷. Estos sistemas tienen una estructura en triple estrella, pero se pueden adaptar fácilmente a configuraciones de estrella sencilla o de doble estrella, si se requiere por razones de seguridad o técnicas. De esta forma se abre la perspectiva de instalar una infraestructura de fibra económica para las futuras comunicaciones integradas de banda ancha, utilizando sistemas de fibra al hogar (FTTH) para la distribución de la televisión y los POT (terminal simple de teléfono).

Existen transeptores para sistemas de línea de abonado de banda ancha de altas prestaciones, que funcionan a 155/622 Mbit/s y a distancias superiores a los setenta kilómetros, con multiplexación por división de longitud de onda (1300/1550 nm)¹⁸ usando un láser DFB. Una versión "económica", que utiliza láseres de impresora o de discos compactos, tiene un alcance de unos dos kilómetros. Sin embargo, en la actualidad, el mercado aún es muy pequeño como para pensar en una producción de bajo coste.

Básicamente, las líneas de abonado de banda ancha se utilizan en proyectos piloto como Biarritz Field Test^{19,20}, BIGFON²¹, BERKOM²² ó BASKOM (instalado en Basilea), y en el único sistema público de banda ancha capaz de ofrecer servicios conmutados de 140 Mbit/s a nivel nacional, el VBN (pre-runner broadband network) de Alemania. Estos sistemas se basan en el MTS (modo de transferencia sincrónico).

El advenimiento de los EDFA ha hecho decrecer el interés en la transmisión coherente: la ganancia en el balance de potencia que se puede obtener mediante la detección coherente se puede fácilmente conseguir con un alimentador o preamplificador de tipo EDFA. Por otro lado, se ha conseguido realizar láseres sintonizables, bien como láser de tres secciones²³ con una banda de sintonía del orden de 4 nm,

bien como láser del tipo Y²⁴ con una banda de sintonía de 50 nm aproximadamente. No solo se pueden aplicar estos elementos en la investigación mundial en el campo de la conmutación óptica, campo actualmente en pleno desarrollo²⁵, sino que también a sistemas coherentes multicanales^{26,27}.

Se dispone de unos primeros resultados²⁸ en componentes optoelectrónicos integrados (láser/excitador y fotodetector/preamplificador), pero hasta ahora no son demasiado prometedores.

Disponemos de componentes y sistemas de fibra óptica, ampliamente probados en prueba de campo, para la introducción de fibra hasta el hogar y de comunicaciones de banda ancha, que pueden ser fabricados a gran escala tan pronto como el mercado lo demande. Por otro lado, estamos todavía bastante lejos de alcanzar los límites de los componentes de fibras ópticas y optoelectrónicos: podemos esperar mejoras sustanciales en el futuro basadas en el potencial inherente de estas tecnologías.

El futuro

Tendencias del mercado

Como se ha indicado, la tecnología para las redes de acceso de los abonados mediante fibra óptica y los enlaces de banda ancha se encuentra disponible en la actualidad. Existen indicios según los cuales el momento más adecuado para una aplicación masiva de la fibra óptica no está tan lejano:

- NTT ha anunciado²⁹ la sustitución de todos los pares de cobre y de todos los cables coaxiales en las redes de telecomunicación de Japón para el año 2015, lo que significa un promedio de dos millones de abonados por año.
- El DBP Telekom ha hecho pública³⁰ la decisión de instalar 1,2 millones de conexiones de fibra de abonado (FTTH) en la parte oriental de Alemania para el año 1995 (200000 el año próximo, y 500000 en cada uno de los años siguientes).

- En EE.UU., las compañías operadoras Bell han iniciado la tendencia FTTH y están muy motivadas en obtener sistemas de fibra óptica económicos, debido a la competencia generada por los operadores privados.
- Las comunicaciones audiovisuales, los terminales multimedia, y los sistemas de transmisión y comunicación de banda ancha fueron el máximo exponente del Telecom 91 de Ginebra.

Todos estos signos abren la esperanza de poder recuperar lo que se ha invertido en transmisiones ópticas en los últimos 25 años. Con seguridad los sistemas de distribución de TV serán competitivos con los sistemas coaxiales en dos ó tres años si los operadores deciden la aplicación masiva de la fibra óptica. La combinación de TV y POT en estas redes será económica, y al mismo tiempo proveerá la infraestructura necesaria para la comunicación integrada de banda ancha.

El programa RACE tiene como objetivo la introducción en Europa de comunicaciones de banda ancha en el año 1995³¹ y, tal como se ha podido ver en Telecom 91, todas las compañías de telecomunicación se están preparando para confirmar las previsiones del European Community Commission (ECC). La instalación de sistemas de banda ancha basados en MTA (modo de transferencia asíncrono) ha comenzado ya en algunas MAN (redes de área metropolitana), y antes de 1995 se instalarán conmutadores piloto MTA, año en el cual los productos MTA estarán en pleno vigor.

En general, se puede observar que un servicio de telecomunicación sigue un crecimiento exponencial una vez alcanzada una "masa crítica" de abonados. Existe un deseo humano de unirse a la gente que ya tiene ese servicio (de otra forma se quedará fuera), tal como se ha evidenciado con los ejemplos del teléfono, telex y fax. Este umbral de las aplicaciones masivas sólo podrá alcanzarse en las comunicaciones de banda ancha hacia final del siglo, cuando

do la estructura central de las fibras ópticas ya se habrá establecido perfectamente gracias al empuje de los sistemas FTTH. Así, la aplicación masiva de la fibra óptica podría ocurrir hacia 1995, utilizando los EDFA como "puerta de entrada".

Tendencias tecnológicas

Así, la fotografía de la implantación de servicios de banda ancha se hace más clara y sus ventajas esenciales mas y mas evidentes. Aunque disponemos de tecnología muy preparada para su implantación en el mercado actual, aún se requieren enormes mejoras para una aplicación real en masa en:

- velocidad de transmisión
- vano de los enlaces (a altas velocidades)
- flexibilidad
- fiabilidad
- y, principalmente, coste.

El aspecto técnico mas importante es seguramente la velocidad. La sustitución de los servicios RDSI de 64 Kbit/s por los servicios de banda ancha de 140 Mbit/s incrementarán la velocidad requerida 2000 veces en la red de transporte y conmutación. Esto no es un problema real para las líneas de abonados ya que pronto estarán disponibles comercialmente detectores y láseres de 10 Gbit/s, y dicha velocidad sería suficiente aún para la distribución multicanal de TVAD.

Pero en las líneas de enlaces la velocidad media deberá ir desde 565 Mbit/s hasta aproximadamente un terabit/s (10^6 Mbit/s), manteniendo el mismo número de fibras. Por ello, se necesita un drástico incremento de la velocidad por fibra para evitar la costosa "multiplexación de fibras"³². Por ello hay que considerar algunas funciones básicas de los componentes y sus límites físicos.

Generación de velocidades ópticas altas

Es posible la modulación directa de los láseres con muestras de bits aleatorias para líneas de abonados de hasta

10 Gbit/s. En las esenciales altas velocidades y largos vanos de enlaces, la requerida reducción del chirp necesita una separación de la emisión del láser (luz cw ó pulsos periódicos) y una modulación/selección de pulsos aleatoria. Aunque ya se han conseguido, con láseres de semiconductores mode-locked III-V, trenes de pulsos periódicos de hasta 350 Ghz (con anchura de pulso de 640 fs)³³, la clave son los moduladores para la selección de pulsos con secuencias aleatorias de pulsos de alrededor de 20 Gbit/s conseguidas. Debido a la corta duración del pulso, la velocidad de la señal de una fibra se debería incrementar al menos hasta 200 Gbit/s por ODTM (multiplexación óptica por división en el tiempo), entre mezclando por ejemplo diez trenes de 20 Gbit/s ópticamente en una fibra.

Este enfoque debería ayudar a superar los límites de los circuitos excitadores electrónicos. Las frecuencias de tránsito mas altas obtenidas hasta ahora en los transistores discretos InP son del orden de 250 GHz³⁴, pero aunque se integren en IC sólo se alcanzarían velocidades de operación entre 50 y 80 Gbit/s. No se ve en la actualidad una posterior mejora con los superconductores a alta temperatura; solamente serían factibles si son capaces de funcionar a elevadas temperaturas ambiente.

En el lado receptor, pin-fotodetectores de InGaAs/InP funcionan hasta 30 ó 40 Gbit/s, con un potencial posterior de hasta 100 Gbit/s con una cuidadosa optimización estructural³⁵. Se puede lograr una nueva ampliación del margen de velocidades con detectores MSN de AsGa, en donde los pulsos reducidos a menos de 1 ps se han convertido en señales eléctricas³⁶. Pero esto se consigue solamente a cambio de pérdidas integradas, por lo que se requiere una potencia de señal recibida muy elevada. Los preamplificadores ópticos basados en EDFA deben de ser los apropiados para superar este problema. Se ha demostrado que los pulsos se pueden amplificar sin detrimento de la amplitud de los pulsos para velocidades muy superiores a 100 Gbit/s^{37,38}.

De acuerdo a estas consideraciones los dispositivos optoelectrónicos serán factibles para velocidades de transmisión cercanas a 100 Gbit/s en los próximos cinco o diez años.

Vano de los enlaces a altas velocidades

La pregunta es que como dichas velocidades se pueden manejar sobre la fibra, con la dispersión de pulsos como aspecto crítico. La mínima anchura espectral de 2 ps dada por el teorema de Fourier es $\Delta\lambda=1,5$ nm. Para una disposición óptima de un laser en el punto de dispersión cero de una fibra de dispersión desplazada hay que considerar un valor de dispersión efectivo de $\approx 0,05$ ps/km-nm, lo que permite un vano máximo (para una anchura de pulso de $\Delta t=2$ ps) de

$$L = \Delta t / D \cdot \Delta\lambda \\ = 2 \text{ ps} / 0,05 \text{ ps/nm} \times \text{km} + 1,5 \text{ nm} \approx 26 \text{ km}$$

cuando se requieren de 30 a 100 km para sistemas de líneas terrestres. La fibras de dispersión aplanada con una pequeña inclinación alrededor de la dispersión cero abren el camino para la ampliación del vano entre tres y cinco veces, lo apropiado para los sistemas de líneas terrestres.

Parece posible un incremento posterior en el vano de los enlaces empleando las técnicas de solitones, con el inconveniente de que se necesita una potencia de pulsos alta. Sin embargo, en las líneas transoceánicas (≈ 10000 Km), aún con los solitones, la velocidad está limitada entre 10 y 20 Gbit/s, debido a la acumulación de ruido en las largas distancias con amplificadores ópticos cada 30 Km³⁹. Es posible un incremento de la velocidad si se emplea WDM (multiplexación por división de la longitud de onda) con cuatro longitudes de onda dentro de un margen espectral de aproximadamente 3 nm. Con enlaces terrestres se han transmitido 32 Gbit/s sobre 90 Km⁴⁰. Puede ser posible un aumento a 100 ó 200 Gbit/s con WDM, pero de nuevo ampliamente limitado por la dispersión de las fibras.

Igualmente, en los sistemas de dispersión lineal el empleo de WDM no

ayuda a incrementar la velocidad limitada por la dispersión debido a la mayor dispersión de la fibra relativa a los canales de longitud de onda externos. La WDM, por otro lado, tiene sus ventajas (si es suficiente por debajo de los límites de dispersión) o para un suministro flexible de los servicios a los abonados, siendo cada servicio ofrecido en una longitud de onda diferente, o en sistemas multicanal que usan electrónica de "baja velocidad".

Sistemas de multicanal coherente (CMC)

Sin embargo parece posible un colosal incremento de la anchura de banda cuando se combinan WDM y esquemas de detección coherentes, las técnicas de multicanal coherente.

El potencial de un canal de fibras ópticas (144 teraherzios ó 20 millones de canales de TV) no se puede usar en transmisión a alta velocidad sobre una única portadora que use, por ejemplo, multiplexación por división en el tiempo. Pero la multiplexación por longitud de onda ofrece una alternativa de aplicación de este enorme ancho de banda. La televisión de alta definición (TVAD) necesita alrededor del Gbit/s para transmitir sin utilizar técnicas de compresión. Utilizando una simple modulación de amplitud de la portadora de luz se requiere, para esta velo-

cidad, un ancho de banda inferior al GHz, de manera que se podría dedicar una portadora por cada uno de los casi 140000 abonados conectados a una única fibra óptica. Sin embargo, aún con un tráfico de 0,1 erlangs, la energía a transportar a través de la fibra entre un gran número de abonados podría inducir fuertes efectos no lineales y, por tanto, diafonía. Desde el punto de vista del balance de potencia es posible obtener alrededor de 10000 abonados con 1000 conectados a la vez. Esta red de fibra se puede realizar como una red con derivadores⁷ o como una red de mallas, que da como resultado una capacidad de transconmutación sin ninguna central, capaz de proveer un canal transparente de 1 Gbit/s a cada uno de los más de 100000 abonados. Usando los EDFA para compensar la atenuación, podríamos tener un sistema de comunicaciones "totalmente óptico" con capacidad de conmutación distribuida para cada una de las terminaciones de red óptica (ONT).

Un canal de señalización se puede usar, por ejemplo, por todos los abonados para establecer una conexión punto a punto. Un nodo transfiere llamadas desde una red a otra como en una central. Puede ser la "solución final" de las redes de telecomunicaciones totalmente ópticas usando todos

los componentes descritos hasta ahora y sustituyendo, probablemente, todos los circuitos electrónicos de la red, salvo el transceptor de abonado o la ONT.

Conmutación óptica

Para obtener un total beneficio de la potencia de la óptica en el futuro, será necesaria la conmutación óptica en dos áreas:

- en pequeñas funciones de conmutación no centralizadas dentro de un entorno totalmente óptico
- más tarde, en grandes unidades de conmutación cuando haya que conmutar generalmente a velocidades muy elevadas.

Los conmutadores electrónicos emplean dos dimensiones: tiempo y espacio. Los conmutadores ópticos añaden una nueva: la longitud de onda. Esto se puede aplicar de forma pasiva como se mostró previamente en los sistemas CMC para enrutamiento, o activamente direccionado una parte mediante una longitud de onda conmutada. Ya se dispone de dispositivos básicos para conversión o conmutación de longitud de onda: los láseres multisección²³ y los dispositivos de láseres en Y²⁴. Su velocidad de

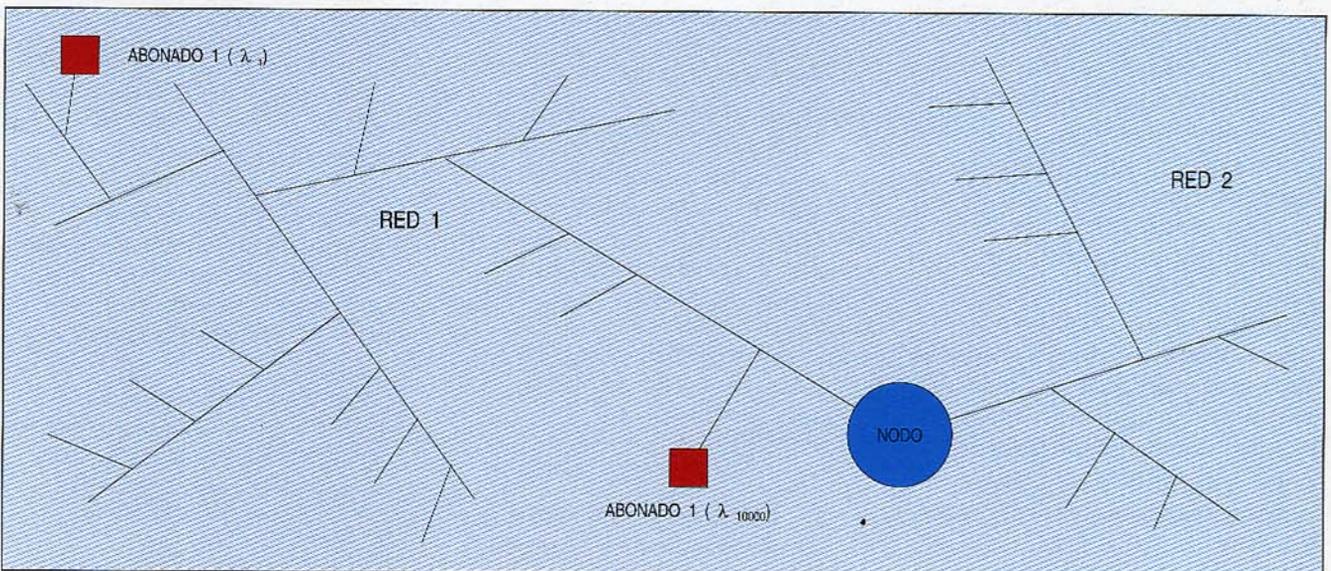


Figura 1 - Sistema coherente multicanal.

conmutación, en la actualidad entre dos y cinco Gbit/s, puede ser aún incrementada esencialmente. El principal inconveniente es la falta de las celdas de almacenamiento óptico apropiadas. Los bucles de fibras son muy voluminosos y caros. Los dispositivos de biestables ópticos, como se ha demostrado básicamente con láseres en Y y multisección o con SEEDS para los cuales se han realizado matrices de hasta 32 k^4 , darían un enfoque mejor. De cualquier forma, se debería evitar la necesidad de un almacenamiento de masas óptico en un sistema óptico, diseñando sistemas de conmutación óptica en una arquitectura que emplee las ventajas específicas de la óptica en lugar de intentar convertir las estructuras de conmutación electrónica actuales en ópticas. Se espera que las primeras aplicaciones sean del tipo de los transconectores, en los que el enrutamiento será hecho de forma óptica y el control de manera electrónica. Una estructura de conmutación MTA óptica no estará disponible antes de final de siglo.

Optoelectrónicas integradas

Hoy, todos los componentes optoelectrónicos que se fabrican son componentes de una sola función, como láseres y fotodetectores. Pero las mejoras en la tecnología abre el camino de los componentes multifunción.

El objetivo es ahorrar costes, obtener mejores prestaciones y crear nuevas funciones fotónicas. Una posibilidad es integrar dispositivos electrónicos y optoelectrónicos (junto a mezcladores/divisores pasivos) para conseguir un transceptor integrado monolíticamente, lo que permitirá reducir considerablemente el coste de la línea de abonados de banda ancha. Esto se deberá en gran parte al mejor uso del área de substrato InP y a la eliminación de muchas de las costosas interconexiones entre dispositivos discretos. Pero aún pasará una década antes de disponer de posibles productos de esta clase.

Otra posibilidad es la integración de diferentes funciones ópticas, tanto activas como pasivas. Se han realizado diferentes dispositivos de este tipo en los laboratorios⁴², incluyendo laser mas diodo supervisor, láser mas modulador (emisor de chirp bajo), matrices de láseres con multiplexores de guíaondas y matrices de conmutación 4x4. La integración monolítica de amplificadores de semiconductores ópticos en dichos componentes multifuncionales mejorará su potencial en conmutación y transporte de señal, extendiendo su funcionalidad, por convertidores de longitud de onda, enrutamiento y puertas ópticas, a funciones lógicas y procesamiento de señal.

Conclusiones

La importancia del papel de la optoelectrónica en telecomunicación no se debe subestimar. En primer lugar, la optoelectrónica tiene el potencial de poder mejorar enormemente las redes existentes. En segundo, hará evolucionar las redes existentes actuales hacia una red digital de servicios integrados de banda ancha, empezando con la instalación de fibra hasta el hogar. En tercer lugar, evolucionará hasta llegar a ser una red de transmisión y conmutación completamente óptica. Se espera que la aplicación masiva de componentes optoelectrónicos comience con los sistemas de fibra al hogar. Incluso, la tecnología de silicio pueda quedar obsoleta, si la terminación de red óptica llega a materializarse mediante un circuito optoelectrónico con tecnología InP. Pero en cualquier caso esto hay que considerarlo solo para el próximo siglo.

Referencias

1 Kao, K.C.; Hockham, G.A.: Dielectric-fibre Surface Waveguide for Optical Frequencies. Proc. IEEE, vol. 133, no. 7, Julio 66, págs. 1151-1158.

2 Börner, M.: Mehrstufiges Übertragungssystem für in Pulsmodulation dargestellte Nachrichten. Brevet: DBP-Nº. 1254 513, 21 Dic. 1966 (transmisión MIC sobre fibra de vidrio).

3 A. Werts: Propagation de la lumière cohérente dans les fibres optiques, *L'onde Electrique*, vol. 46 (1966), págs. 967-980.

4 Kapron, F.P.; Keck D.B.; Maurer R.D.: Radiation losses in glass optical waveguides, *IEEE conference publication 71* (1970), págs. 148-153.

5 Hayashi, I.; Panish, M.B.; Foy P.W.; Sumski, S.M.: Junction lasers which operate continuously at room temperature: *Applied Physics Letters 17*, 1970, págs. 109-111.

6 Moriyama, T.; Fukuda, O.; Sanada, K.; Inoda, K.; Tanaka, S.; Chida, K.; Edahiro, T.: Fabrication of Ultra-low-OH Content Optical Fibres with VAD Method. *Proc. of the Sixth European Conference on Optical Communications*, York, UK, Sept. 1980, págs. 18-21.

7 Ohnsorge, H.; Börner, M.: Breitbandige Übertragungskanäle aufweisendes Nachrichtenübertragungssystem mit einer Vielzahl von Teilnehmern. German Patent applications P 1801 999.3, 1968 (red de comunicaciones de banda ancha).

8 Ohnsorge, H.: New Possibilities for Telecommunication Systems Based on Laser-Fibre Channels. *NTZ Report 17*, VDE-Verlag GmbH, Berlin, 1973 (red de área metropolitana de banda ancha).

9 Ohnsorge, H.: Probleme und Lösungen der Glasfasertechnologie im Hinblick auf die Einführung der optischen Nachrichtenübertragung. *Konferenzbericht der Professorenkonferenz im Fernmeldetechnischen Zentralamt (FTZ)*, Darmstadt, 1981, S. 39-60.

10 Mears, R. J.; Reekie, L.; Jauncey, I.M.; Payne, D. N.: Low Noise Erbium doped Fibre Amplifier Operating at 1.54 μm . *Electronic Letters*, 10 Sept. 1987, vol. 23, no. 19, págs. 1026-1028.

11 Wedding, B.; Pfeiffer, Th.: 20 Gbit/s optical pattern generation, amplifica-

- tion and 115 km fibre propagation using optical time division multiplexing. *Proc. ECOC'90*, Amsterdam, 1990, págs. 453-456.
- 12 Heidemann, R.; Junginger, B.; Krimmel, H.; Otterbach, J.; Schlump, D.; Wedding, B.: Simultaneous Distribution of Analogue AM-TV and Multigigabit HDTV with Optical Amplifier. *Proc. 2nd Topical Meeting on Optical Amplifiers and their Application*. Snowmass Village 1991, págs. 210-213.
- 13 Saito, S.; Murakami, M.; Naka, A.; Fukada, Y.; Imai, T.; Aiki, M.; Ito, T.: 2.5 Gbit/s, 80-100 km Spaced In-line Amplifier Transmission Experiments over 2500-4500 km. *Proc. ECOC'91*, Paris, 1991.
- 14 Gabla, P.M.; Scaramucci, O.; Frorud, J.O.; Brassier, G.; Leroy, J.B.; Havard, V.; Leclerc, E.: 1316 km, 2.5 Gbit/s IM-DD Penalty Free Transmission Through 26 In-line Erbium-doped Fiber Amplifiers. *Proc. ECOC'91*, Paris, 1991.
- 15 Edagawa, N.; Taga, H.; Yoshida, Y.; Suzuki, M.; Yamamoto, S.; Wakabayashi, H.: 10 Gbit/s, 1500 km transmission experiment using 22 er-doped fibre amplifier repeaters. *Proc. ECOC'91*, Paris, 1991.
- 16 Nakazawa, M.; Yamada, E.; Kubota, H.; Suzuki, K.: 10 Gbit/s Soliton Data Transmission over One Million Kilometers. *Electr. Lett.* 27, 1991, págs. 1270-1272.
- 17 Heidemann, R.; Wedding, B.; et al: 10 Gbit/s to 260000 Subscribers using Optical Amplifier Distribution Network. Submitted to ICC Supercom, Chicago.
- 18 Kaiser, N.; Domann, G.: Red experimental BERKOM y concepto RDSI-BA con distribución de TV, Revista técnica de Alcatel, volumen 62, n°3/4, 1988, págs. 325-332
- 19 Dupire, M.M.; Marc, B.; de Panafieuf, A.: Transmission plan for the Optical Wired city of Biarritz. *ECOC 1982*.
- 20 Dupire, M.M.; Ab der Halden, Ch.; Brooke, J.: Biarritz Multiservice Subscriber Loop Plant. *ISSLS 1984*, Niza/Francia, 1-5 Oct. 1984, págs. 94-106.
- 21 Kneisel, K.E.: BIGFON- The First Stepping Stone to an Integrated Broadband Telecommunication Network. *Proc. 2nd International Conference, New System Services Telecommunication*, Bélgica, Nov. 1983.
- 22 Domann, G.: Red experimental BERKOM y concepto RDSI-BA con distribución de TV, *Revista técnica de Alcatel*, volumen 62, n°3/4, 1988, págs. 235-332.
- 23 Leclerc, D.; et al: Three-electrode DFB Wavelength Tunable Laser at 1.53 μ m. *Electronic Letters*, 5 de Enero de 1989, volumen 25, n° 1.
- 24 Hildebrand, O.; Schilling, M.; Idler, W.; Baums, D.; Laube, G.; Wuenstel, K.: The Integrated Interferometric Injection Laser (Y-laser): One Device Concept for various system applications, *ECOC'91*, Paris, 1991, paper TuA5.1.
- 25 Dorn, R.: What Does Electronic Industry Expect from Photonics? *Annales de Physique*, Colloque no. 1, Suplemento al n° 1, volumen 16, Febrero 1991.
- 26 Yamazaki, S.; Omo, T.; Shimizu, H.; Kitamura, Emura, K.: 2.5 Gb/s CPFASK Coherent Multichannel Transmission Experiment toward over 100 Gb/s Communication System. *Proc. OFC'90*, San Francisco, 1990, PD12.
- 27 Gnauck, A.H.; Linke, R.A.: High Capacity Coherent Lightwave Systems. *Journal of Lightwave Techn.*, vol. 6, no. 11, 1988, págs. 1750-1769.
- 28 Bland, S.W.: InP Based Optical Receiver OEICs for Telecommunications. Vimercate, Italy, Marzo 18-19, 1991.
- 29 Miki, T.; Yamashita, I.: PDS Network Development and Japanese Applications. *Proceedings ECOC'91*, Paris, 91.
- 30 German TELEKOM Press Information: Erster Glasfaseranschluss in Leipzig. (Primera línea de abonado por fibra óptica en Leipzig). Bonn, 22 Nov. 1991.
- 31 RACE II Workplan '91, Dec. 1990 and RACE '91 (OTR 402), 27 Marzo, 1991.
- Commission of the European Communities, Brussels.
- 32 Haupt, H.: Towards Terabit/sec, *ECOC/IOOC '91*, Paris, 12 sept., 1991, Panel Discussion Th A 10.
- 33 Wu, M.; Chen, Y.; Tanbun-Ek, T.; Logan, R.: Femtosecond monolithic CPM quantum well lasers: *OSA/IEEE Meeting "Picosecond Electronics and Optoelectronics"*, Salt Lake City, 13-15 Marzo, 1991, Technical Digest, págs. 122-124.
- 34 Nguyen, Loi: Recent advances in ultrafast high electron mobility transistor technology: *OSA/IEEE Meeting "Picosecond Electronics and Optoelectronics"*, Salt Lake City, 13 au 15 mars, 1991, Technical Digest, pp. 114 - 117
- 35 Eisele, H.: Alcatel SEL-RC: Private information, 1991.
- 36 Keil, U.; Dykaar, D.; Levi, A.; Kopf, R.; Pfeifer, N.; Darack, S.; West, K.: Ultrafast signal propagation on coplanar strip lines and loops: *OSA Meeting*, Albuquerque, 1992.
- 37 Izadpanah, H.; Chen, D.; Lin, Chinlon; Saifi, M.; Way, W.; Yi Yan, A.; Gimlett, I.L.: Distortion-free amplification of highspeed test patterns up to 100 Gbit/s with EDFAs: *Electronics Lett.* 27, no. 3, Enero 1991, págs. 196 - 197.
- 38 Ainslie, B.; Blow, K.; Gouveia-Neto, A.; Wiglay, P.; Sombra, A.; Taylor, J.: Femtosecond soliton amplification in erbium doped silica fibre: *Electronics Lett.* 26, no. 3, Febrero.1990, págs. 186-188.
- 39 Hamaide, J.P.; Adouin, O.; Prigent, L.; Brun, E.: Transoceanic optical communications with optical amplification: *Proc. EFOC/LAN '92*, Paris, 24-28 Junio 1992, págs. 184-188.
- 40 Andrekson, P.: *IEEE/OSA Meeting: Optical amplifiers and their applications*.
- 41 Lentine, A.L.; Tooley, F.A.P.; Walker, S.L.; McCormick, F.B.; Morrison, R.L.; Chirovsky, L.M.F.;

Focht, M.W.; Freund, J.M.; Guth, J.D.; Leibenguth, R.E.; Przybylek, G.J.; Smith, L.E.; D'Asaro, L.A.; Miller, D.A.B.: Integrated SEED Photonic Switching Nodes, Multiplexers, Demultiplexers, and Shift Registers: OSA Proc. on Photonic Switching, *H.S. Hinton and Joseph W. Goodman eds.* (OSA Washington DC, 1991), vol. 8, págs. 60-66.

- 42 Hildebrand, O.: Recent trends in InP-based optoelectronic components: *Proc. 20th ESSDERC*, Nottingham, Sept. 1990, págs. 505 - 514.

Horst Ohnsorge nació en 1933 en Waldenburg. Obtuvo el grado en ingeniería en el Polytechnicum Giessen en 1955. Pasó dos años como ingeniero de desarrollo en Telefunken, Ulm. Más tarde estudió en la Technical University Darmstadt, obteniendo el diploma de ingeniero en 1961. En 1967 se doctoró en la Technical University de Aachen. Entre 1961 y 1974 trabajó en el centro de investigación de AEG-Telefunken, donde fue jefe de Telecom Systems Research en 1968. Desde 1974 a 1980 fue director científico del Heinrich Hertz Institute, Berlín. Desde 1980 ha sido jefe del centro de investigación de Alcatel SEL, y en 1985 fue designado Senior Executive de SEL AG. Entre 1987 y 1991 fue director de investigación y tecnología de Alcatel NV, París. Las actividades profesionales del Dr. Ohnsorge han girado entre filtros, reconocimiento de voz, codificación de video, transmisión de datos, códigos de corrección de errores, transmisión por fibra óptica y sistemas de comunicaciones de banda ancha. Ha presentado artículos sobre Teoría de la información y codificación en las universidades técnicas de Erlangen, Berlín y Stuttgart.

Herbert Haupt nació en Schwenningen a.N. en 1938. Se diplomó y graduó en la universidad técnica de Berlín en el área de la física del estado sólido (fenómenos de luminiscencia). En 1974 ingresó en el centro de investigación de SEL como jefe de proyecto de fibras ópticas y optoelectrónica. Desde 1980 ha sido jefe de división de materiales, tecnología y componentes y desde 1986 director adjunto de investigación de Alcatel SEL.

El Dr. Haupt es miembro de la Asociación alemana de tecnología de la información y de la European Conference Optical Communication (ECOC). Organizó ECOC'84 en Alemania.

Patrice Desombre nació en 1940 en Périgueux, Francia. Es ingeniero desde 1961 por la Ecole Polytechnique. Entre 1964 y 1987 ha ocupado diferentes cargos dentro del departamento de transmisión de Alcatel CIT. En 1981 ingresó en Alcatel Alsthom Recherche, donde es Director general adjunto.

Patentes recientemente solicitadas por compañías del grupo Alcatel

(la lista no incluye registros equivalentes en otros países.)

INVENTORES	TITULO REGISTRADO	NUMERO DE SOLICITUD
Solicitudes de patentes en Australia		
R.C.S. Fox	Method of automatically adjusting side-tone in a telephone subset	88264
Solicitudes de patentes en Austria		
H. Strasser J. Wolfgang K. Doring	Einrichtung zum Anschalten von Teilnehmerendgeräten mit optischer Übertragung	2113/90
H. Strasser J. Wolfgang K. Doring	Optischer Verteilerstecker	2112/90
H. Strasser J. Wolfgang K. Doring	Einrichtung zum Anschalten von Teilnehmerendgeräten mit optischer Übertragung	2114/90
M. Baumruck	Hydraulikeinheit	88/91
J. Eiweck F. Trimmel	Gestell mit modularem Aufbau zur Aufnahme von Leiterplatten und Baugruppen der Nachrichtentechnik	241/91
Solicitudes de patentes en Bélgica		
H.R.N. De Vuyst R. De Bruycker	Elektrische contactinrichtung	09001167
L.R.H. Willems G. Van Koetsem	Frekwentie-afstemmingsinrichtung	09001114
E.M. Heirbaut J.R.J.M.T. Taeymans	Magnetische Kaart	09100255
F.J.C. Leyssens	Warmtegeleidingsverbinding	09100362
Solicitudes de patentes en el Reino Unido		
R.J. Herbert T.D. Williams	Ink ribbon feed	90 28 224.5
R.J. Herbert	Thermal printing apparatus	90 25 412.9
D.T. Gilham	Document processing	90 25 413.7
T.D. Williams	Ink ribbon feed	90 28 226.0

INVENTORES	TITULO REGISTRADO	NUMERO DE SOLICITUD
Solicitudes de patentes en Dinamarca		
K.B. Hansen	Telefonapparat med en mikrotelefon	0509/91
Solicitudes de patentes en Francia		
B. Biotteau J. Chesnoy B. Clesca	Procédé et système de transmission optique à saut de phase	90 15 770
H. Rinié F. Kleiber G. Dounet	Terminal de télécommunication d'utilisateur	90 15 949
G. Thomas A. Mascarello	Système de localisation de personnes et/ou d'objets dans une zone surveillée	90 15 524
P. Hanser F. Kleiber B. Lepenven Duval	Installation de télécommunication numérique privée à commutation interne directe	90 15 300
J. Hoff R. Graouer	Commutateur temporel à architecture éclatée et modulée de raccordement pour la constitution d'un tel commutateur	90 14 525
G. Douhet	Agencement de câblage pour installation de communication multiservice	90 14 213
G. Douhet F. Kleiber P. Millon H. Rinié M. Sulyan C. Toularastel	Agencement de raccordement d'un terminal analogique à un réseau numérique à intégration de services et adaptateur pour un tel agencement	90 14 527
E. Bressan	Dispositif de test d'équipements en mouvement	90 13 729
M. Sauvage X. Le Polozec	Mélangeur hyperfréquence symétrique	90 14 626
P. Vinel	Méthode de transmission d'information de contrôle pour liaison de transmission de cellules à multiplexage temporel asynchrone	90 14 212
C. Sauval J.L. Use	Une méthode et un dispositif de récupération d'une porteuse	90 16 117
J. Allouis	Procédé de transmission multi-protocole et appareil mettant en oeuvre le procédé	90 13 728
C. Freychet	Procédé de raccordement par moulage entre un connecteur métallique et un câble gainé, et raccordement moulé ainsi obtenu	90 16 016

INVENTORES	TITULO REGISTRADO	NUMERO DE SOLICITUD
Solicitudes de patentes en Francia (sigue)		
A. Gressier P. Sehier	Système récepteur pour le traitement de signaux resus sur des voies de diversité	90 16 114
V. Kumar F. Robbe E. Rousseau L. Dartois	Dispositif pour annulation de bruit acoustique Circuit de traitement du signal pour le système de radiotéléphone cellulaire numérique européen	90 16 316 90 14 211
L. Dartois E. Rousseau	Dispositif prévu pour le traitement de l'algorithme de Viterbi comprenant un processeur et un opérateur spécialisé	90 14 230
R. Lenormand D. Rene C. Rigal	Antenne émission reconfigurable	90 14 941
J.L. Cazaux G. Naudy M. Pouysegur D. Roques	Déphaseur variable analogique pour signaux	90 16 468
A. Youssef J.B. Ducrocq A. Mayer	Méthode de protection de composants électroniques d'un circuit contre les radiations et dispositif utilisant cette méthode	90 13 802
A. Youssef J.B. Ducrocq A. Meyer	Circuit électronique contrôlé en température	90 13 803
M. Hamadallah	Antenne offset avec radome	90 16 467
G. Douhet	Terminal principal pour réseau numérique à intégration de services	90 13 804
G. Douhet F. Kleiber H. Rinié M. Sulyan	Adaptateur de raccordement d'au moins un terminal de données à un réseau numérique à intégration de services	90 14 301
J. Riviere D. Jamet	Boîtier de protection contre les perturbations électromagnétiques, pour dispositif de connexion électrique	90 15 041
P. Saint-Ellier	Arbitre de priorité entre au moins deux dispositifs demandeurs à priorités dans un système à microprocesseur	90 14 048
D. Cyne P. Harivel	Procédé et dispositif de mesure de niveau de signal	90 16 317
A. Veillon	Procédé de développement de logiciels	90 14 298
P. Frieden D. Prudhon V. Da Silva	Câble électrique à vitesse de propagation élevée	90 14 171

INVENTORES	TITULO REGISTRADO	NUMERO DE SOLICITUD
Solicitudes de patentes en Francia (sigue)		
Y. Lumineau D. Sullerot M. Faure B. Floch	Dispositif de détection des irrégularités du diamètre	90 16 112
E. Vasseur	Procédé pour faire adhérer des résines d'éthylène et de propylène sur une surface de plomb	90 13 855
A. Joye	Dispositif de fabrication de fils méplats et de feuilards, fils méplats et feuilards fabriqués à l'aide de ce dispositif	90 14 806
A. Joye	Dispositif de tréfilage multifilaire et mèche obtenue à l'aide de ce dispositif	90 16 113
C. Pigault D. Doublet D. Raynaud	Ensemble connecteur infraudable et clé d'actionnement	90 15 700
C. Pigault G. Perrot	Ensemble de connexion infraudable	90 15 701
F. Audeval E. Chezy	Réglette de raccordement précâblable	90 15 214
G. Routa M. Andre	Contre-molette universelle notamment pour marqueuse à encre	90 15 839
C. Deniel Y. Martin T. Trentesaux	Procédé et dispositif d'étamage de plages étamables d'un boîtier de composant électronique	90 16 318
D. Perrillat-Amede	Vanne manuelle étanche	90 14 751
C. Saulgeot L. Mathieu	Vanne d'isolement automatique fonctionnant à la dépression et installation utilisant cette vanne	90 14 299
J.M. Crinquette	Machine, telle que pompe à vide ou compresseur du type volumétrique ou à entraînement	90 16 116
C. Cordonnier R. Gass	Procédé destiné à assurer la permanence de la synchronisation des nœuds d'un réseau privé de télécommunications sur la meilleure des horloges disponibles et réseau correspondant	90 15 496
O. Audouin J.M. Gabriagues M. Sotom	Procédé et dispositif de positionnement relatif d'une fréquence notamment optique	91 00 792
O. Audouin J.M. Gabriagues M. Sotom	Procédé et réseau de transmission de messages dans des canaux fréquentiels	91 00 793

INVENTORES	TITULO REGISTRADO	NUMERO DE SOLICITUD
Solicitudes de patentes en Francia (sigue)		
O. Audouin J.M. Gabriagues M. Sotom	Procédé et réseau de communication à allocation de fréquences	91 00 794
D. Bonnevie F. Brillouet L. Goldstein J.L. Lievin F. Poingt	Procédé de réalisation d'un laser semiconducteur planaire à ruban enterré	91 01 470
F. Zamkotsian	Dispositif électro-optique à guide d'onde	91 01 155
E. Gaumont-Goarin J.L. Lievin F. Poingt	Procédé de lithogravure sur saillie notamment sur substrat semiconducteur	91 00 505
J. Doncker G. Leclerc	Dispositif de transposition de fréquence avec commande automatique de fréquence	91 02 415
E. Tonello C. Herbere	Démodulateur à boucle de phase	91 02 817
C. Herbere E. Tonello	Récepteur de signaux modulés en fréquence à bande d'accrochage contrôlée	91 02 816
M. Darmon J. Eudes P. Sadot B. Thebault	Procédé de démodulation cohérente pour modulation à déplacement de phase et dispositif de mise en œuvre de ce procédé	91 01 079
M. Pouysegur D. Roques J.L. Cazaux	Amplificateur à transistors à effet de champ	91 00 880
M. Darmon J. Eudes P. Sadot B. Thebault	Procédé de détection de signal perturbateur pour démodulateur de données et dispositif de mise en œuvre d'un tel procédé	91 01 078
J. Allouis J.c. Führer	Procédé et agencement de concentrateurs en mode paquet pour terminaux de données desservis par un réseau RNIS	91 02 819
J. Allouis J.C. Führer	Agencement de communication entre des terminaux de données d'une installation numérique à intégration de services et d'autres terminaux de données desservis par un réseau téléphonique commuté et procédé correspondant	91 02 026
C. Cordonnier	Module de commutation temporelle et procédé d'exploitation correspondant	91 02 623
J.B. Jacob G. Le Roy J.M. Gabriagues	Centre satellite photonique	91 00 977

INVENTORES	TITULO REGISTRADO	NUMERO DE SOLICITUD
Solicitudes de patentes en Francia (sigue)		
J.B. Jacob G. Le Roy J.M. Gabriagues	Matrice de commutation photonique	91 00 978
J.B. Jacob G. Le Roy J.M. Gabriagues	Multiplexeur temporel photonique, et demultiplexeur temporel photonique	91 00 979
J.B. Jacob G. Le Roy J.M. Gabriagues	Concentrateur photonique	91 00 980
B. Biotteau J. Chesnoy B. Clesca	Procédé et système de transmission optique à saut de phase	90 15 770
Solicitudes de patentes en Alemania		
B. Wedding	Übertragungssignal	40 40 170
W. Koch	Demultiplexer für ein digitales Nachrichtübertragungssystem	40 37 416
D. Ohnesorge	Einrichtung zur Prüfung von Baugruppen in digitalen elektronischen Systemen	40 37 687
W. Klenner	Fernabfrage-Einrichtung für ein Netzwerksystem	40 37 600
R. Heidemann T. Pfeiffer M. Kaiser	Optischer Verstärker	40 41 760
R. Heidemann	Verfahren und Vorrichtung für den Überlagerungsempfang von Signalen	40 36 468
R. Heidemann	Optisches Nachrichtenübertragungssystem mit einem faseroptischen Verstärker	40 36 327
H. Krimmel	Optischer Empfänger	40 36 411
R. Dorn A. Göth P. Kersten W. Rehm U. Seyfried J. Springer	Optischer Farbdruckkopf	40 41 542
E. Gmelin	Vorrichtung zur Halterung eines zylindrischen Bauelements	40 38 689
C. Haouy J. Kappel W. Rohrmann	Gehäuse mit HF-dichter Kabeldurchführung	40 38 690

INVENTORES	TITULO REGISTRADO	NUMERO DE SOLICITUD
Solicitudes de patentes en Alemania (sigue)		
N. Keim K. Görner M. Käß	Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung einer Vorform für Glasfaser-Lichtwellenleiter	40 37 751
D. Weber	Verfahren zum Herstellen einer Lichtwellenleiter-Vorform	40 41 153
D. Weber	Verfahren zum Herstellen einer Lichtwellenleiter-Vorform	40 41 152
D. Weber A. Göth	Vorform für die Herstellung von Lichtwellenleitern	40 41 151
W. Rehm A. Göth	Vorrichtung zur Wiedererwärmung eines Lichtwellenleiters	40 41 150
N. Keim K. Görner M. Käß	Brennerkopf für Gasbrenner	40 35 502
N. Keim K. Görner M. Käß	Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung einer Vorform für Glasfaser-Lichtwellenleiter	40 38 207
N. Keim K. Görner M. Käß	Anordnung zur Herstellung einer Vorform für Glasfaser-Lichtwellenleiter	40 39 578
H.H. Wiemeyer D. Zimmer	Vorrichtung zum Anbringen eines Teils eines elektrischen Steckverbinders an einer Leitung	40 41 783
H. Harbot D. Werz	Verfahren und Vorrichtung zur Längenmessung von strangförmigem Gut	40 37 843
H. Rüster R. Göblmaier	Verfahren zum Erfassen und Markieren von Isolationsfehlern während der Herstellung eines elektrischen Kabels	40 38 041
H. Rüster R. Göblmaier	Verfahren zum Erfassen und Markieren von Isolationsfehlern während der Herstellung eines elektrischen Kabels	40 38 040
W. Heitmann E. Becker W. Guba	Vorrichtung zum Verbinden von zwei optischen Fasern	40 38 503
K.H. Marx	Abzweigmuffe für Niederspannungskabel	40 41 781
F. Schauer	Elektrische Steckvorrichtung	40 41 782
H. Eisele	Verfahren und Vorrichtung zum Herstellen von dünnen Epitaxieschichten	40 39 829
P. Benz	Stromsenke	40 41 761

INVENTORES	TITULO REGISTRADO	NUMERO DE SOLICITUD
Solicitudes de patentes en Alemania (sigue)		
F. Schauer	Vorrichtung zur Stromübertragung zwischen zwei Endstellen	40 36 680
H. Eisele	Vorrichtung zum Halten eines Trägers einer Substratunterlage einer Flüssigphasen- und Gasphasenepitaxieanlage	40 39 828
K.H. Marx	Muffe für eine Abzweig- oder Verbindungsstelle von Kabeln	40 39 242
A. Neth	Gesicherte Datenübertragung	40 38 409
A. Neth	Überwachungsschaltung für Mikroprozessoren	40 40 571
K.H. Marx	Verfahren zur Herstellung von fasererstärkten Kunststoffteilen	40 35 323
Solicitudes de patentes en Italia		
F. Paziènti	Metodo e dispositivo circuitale per trasformare un segnale numerico in un altro segnale numerico secondo una funzione non lineare, e rete neurale utilizzando tale metodo	22464-A/90
A. Bianchi G. Comito A. Fantini	Metodo per misurazione di distanze e stazione trasmittente e ricevente per realizzare tale metodo	22157-A/90
F. Guglielmi A. Spalvieri	Sistema e circuito per la stima della frequenza di portante di un segnale numerico	22444-A/90
C. Zingrini M. Oreglio G. Verderio	Telai per apparati di telecomunicazioni	MI91A000482
G. Guidotti S. Pupolin	Sistema e circuito per stima di canale ed equalizzazione veloci nella trasmissione	MI91A000711
M Bellin F. Piacentini	Gruppo di Attestazione di linee di utente telefonico con possibilità di derivazione per il test e con protezione di linea	MI91U000234
Solicitudes de patentes en Noruega		
G.E. Balog B.L. Friis K. Ronningen	Kabelinstallasjonsmetode	90 52 94
A.G. Berre J.O. Petersen	Kabelutlegningsutstyr	90 55 88

INVENTORES	TITULO REGISTRADO	NUMERO DE SOLICITUD
Solicitudes de patentes en Noruega (sigue)		
U.A. Sekkelsten	Skjotemetode og konnektor	91 05 24
E. Betten	Fiberoptisk skotehus	91 00 11
Solicitudes de patentes en España		
F. Fernandez	Método y dispositivo de multiplexación de canales de datos asíncronos	90 03 337
J. Castillo	Dispositivo de conexión de la red telefónica conmutada a una red telefónica privada	90 03 371
J. Castillo	Conector telefónico modular	90 03 700
J. Castillo	Conector telefónico modular	90 03 715
J. Castillo	Conector telefónico modular	90 03 713
A. Laguna	Caja superficial para toma telefónica	90 03 432
A. Laguna	Dispositivo antihumedad para caja de conexión telefónica	90 03 681
J. Aguillar	Circuito repetidor	90 03 330
P. Sanchez	Circuito detector de impulsos de cómputo para tarificación	90 03 336
J. Castillo	Dispositivo monocanal de control, almacenaje y cobro de monedas	90 03 314
F. Ruiz	Fuente de alimentación conmutada	90 03 331
F. Ruiz	Generador de frecuencia variable	90 03 338
Solicitudes de patentes en Suiza		
D.E. Jenny	Schaltungsanordnung zur Mustererkennung	04 046/90-7
H.U. Hoppler	Verfahren und Einrichtung zur Bestimmung des Feuchtegehaltes von Kunststoffen	03 997/90-0
Patentes en Estados Unidos		
W. Friesen J.R. Brohm	In-circuit contact monitor	07/615,496
G.C. Sanders R.R. Rzonca R.M. Czerwiec C.M. Hurlocker B.M. Rice M.J. Gingell	Telephone line unit having programmable read-only memory	07/616,175
T.W. Leonard J.E. Eide	Fiber optic sensor module	07/657,833

INVENTORES	TITULO REGISTRADO	NUMERO DE SOLICITUD
------------	-------------------	---------------------

Patentes en Estados Unidos (sigue)

S.C. Lin K.E. Su	Self-locking system for circuit board holding frames	07/675,414
G.D. Yarsunas M.L. Brennan F. Duggan	Retractable multiband antenna	07/642,195

Solicitudes de patentes europeas

P. Ampe D.F.J. Van de Pol L. Cloetens	Synchronizing circuit	90203446
J.C. Bijl J.J. Jongen H.W. Keyzer J.C.J. Smeets	Memory card and switching system suitable for using the same	91200058
P.M.J. Hellemans R.A. Verstraete H.J.M. Decuyperre	Digital telecommunication system with intelligent user terminals	90807023
J.M.J. Sevenhans J.J. Schmit	Synchronizing circuit	91200475
W. Delbare J. Vanwewege	Circuit board assembly	91200170
F.J.C. Leysens H.M.J. Rombouts	Cooling system	91200392
T.L. Van Landegem	Communication switching system	91200301
P. Ampe D.F.J. Van de Pol L. Cloetens	Synchronizing circuit	90203446

En este número

Carballes, J.-C.

El impacto de las comunicaciones ópticas

Comunicaciones Eléctricas, 4º trimestre 1992, nº4, págs. 4-11

Este artículo ofrece una introducción de los diferentes temas cubiertos en este número, dedicados específicamente a las tecnologías de comunicación óptica y a las actividades de Alcatel en este campo. Aquí sólo se considera el margen de longitudes de onda de 1,3 a 1,55 μm . La primera parte del artículo describe los primeros tiempos de las comunicaciones ópticas. Las tecnologías ópticas han progresado mucho y muy rápidamente en muy corto espacio de tiempo, y han alcanzado una fuerte posición industrial en el sector de la transmisión punto-a-punto. Después, el autor examina las etapas que han marcado el progreso de estas tecnologías y la importancia de lo último para Alcatel, respecto a los sistemas de transmisión submarina y terrestre y las redes de abonado. Este artículo concluye con una visión de futuro del impacto de estas tecnologías en los sistemas de comunicaciones futuros, no sólo respecto a las funciones de transmisión, sino también en el área de los sistemas multipunto, con particular referencia a las comunicaciones.

Hildebrand, O.; Erman, M.

Componentes optoelectrónicos en preparación dentro de Alcatel

Comunicaciones Eléctricas, 4º trimestre 1992, págs. 12-21

La evolución de las tecnologías de las comunicaciones ópticas aún está en su infancia, a pesar de su enorme progreso. La investigación actual promete sistemas de transmisión con unas prestaciones ampliamente incrementadas. Los autores describen los componentes optoelectrónicos hoy desarrollados. Se describen el funcionamiento y aplicación de los dispositivos de transmisión, que incluyen diferentes tipos de láseres. Se consideran los amplificadores ópticos y las fuentes de bombeo. Se describen dispositivos receptores, incluyendo diodos PIN y fotodetectores de avalancha. Se discuten las posibilidades y ventajas de los circuitos integrados optoelectrónicos. La sección final del artículo indica los dispositivos, como convertidores de longitud de onda, conmutadores basados en guíaondas y el láser en Y, que se pueden emplear en la conmutación fotónica.

Pestie, J.-P.

Desarrollo y fabricación de componentes optoelectrónicos activos

Comunicaciones Eléctricas, 4º trimestre 1992, págs. 22-28

El progreso de los componentes optoelectrónicos lo dirigen dos factores. Uno es la necesidad de unas mayores prestaciones en sistemas de largo alcance. El otro es la necesidad de bajar los costes en las redes locales. El artículo sigue las direcciones en que se está moviendo la tecnología de los componentes O/E para cumplir las necesidades del futuro cercano. El autor da una visión general de los productos actualmente en producción, y detalla los componentes que se necesitarán a corto plazo. Se investigan las estructuras de láseres y detectores, la evolución de módulos y encapsulados, y las tendencias tecnológicas.

Jocteur, R.; Dumas, J.-P.

Diseño y fabricación de componentes pasivos de optoelectrónica

Comunicaciones Eléctricas, 4º trimestre 1992, págs. 29-36

Las recomendaciones del ETSI definen un componente óptico pasivo como una parte componente de un sistema de transmisión que no requiere alimentación externa y tiene propiedades recíprocas en ambas direcciones, p. ej., fibras, divisores, filtro, etc.. Este artículo da una visión general de los métodos de fabricación y diseño, en las aplicaciones actuales y futuras de componentes pasivos. Se presentan desarrollos dentro de Alcatel y se intenta comparar las ventajas e inconvenientes de las diferentes tecnologías, para productos que son o serán usados en las áreas de transmisión, conmutación y cables.

Augé, J.; Chesnoy, J.; Gabla, P.-M.; Weygang, A.

Progresos en amplificación óptica

Comunicaciones Eléctricas, 4º trimestre 1992, págs. 37-44

La aparición de los amplificadores ópticos dopados de erbio ha iniciado una revolución en las comunicaciones ópticas, abriendo nuevas posibilidades en las áreas de la transmisión a gran velocidad y a grandes distancias, la distribución de video analógico y la conmutación óptica. Se describen amplificadores pre-, en línea y post- y el funcionamiento y configuración básica de los EDFA. Se detallan los resultados de pruebas de una serie de aplicaciones, que incluyen la transmisión a ultra gran distancia sin repetidores, un preamplificador digital, un amplificador digital bombeado a distancia, y pre- y post- amplificadores analógicos. También se muestra la aplicación de los amplificadores ópticos en la distribución de la TV digital.

Blanc, E.; Reinaudo, Ch.; Chabert, J.-L.; Lemaire, V.

Sistemas submarinos de transmisión óptica

Comunicaciones Eléctricas, 4º trimestre 1992, págs. 45-50

El artículo describe los actuales sistemas submarinos con repetidores S560 de larga distancia, y los futuros sistemas S 5000 A, cuya fecha de entrega de los primeros sistemas se ha anunciado recientemente. Los autores abordan después el tema de los sistemas sin repetidores (SR 140, SR 560 y SR 2500), para entrar en la descripción de las ventajas de los cables submarinos de fibra óptica. Adentrándose en el futuro, hablan sobre las técnicas de amplificación óptica que soportarán los futuros sistemas. Consciente de la importancia de este campo, y del futuro representado por el sistema S 5000 A, Alcatel ha programado ya la inversión I+D correspondiente.

Bartsch, S.; Thepaut, P.M.

Sistemas terrestres de transmisión optoelectrónica

Comunicaciones Eléctricas, 4º trimestre 1992, págs. 51-57

El desarrollo durante los diez últimos años ha mostrado que es posible ampliar las velocidades binarias y alcanzar más de 100 Km por sección en la transmisión óptica. Pero sólo la JDS, usando el principio del contenedor, combinada con ópticas de alta prestación, da la flexibilidad de gestionar y asignar diferentes velocidades binarias en cualquier punto dentro de una red a un nivel de coste razonable. El artículo describe en detalle la operación de los sistemas síncronos de línea óptica de las serie SL 16X4 de Alcatel, que ofrecen a los operadores de red una herramienta eficiente y flexible para superar las limitaciones de los sistemas coaxiales y de los sistemas ópticos plesiócronicos.

Adnet, L.; Mionet, H.; Schmid, W.

La optoelectrónica en el bucle del abonado

Comunicaciones Eléctricas, 4º trimestre 1992, págs. 58-65

Existen tres factores a favor de una temprana introducción de la "fibra en el bucle". Primero porque es la única solución a prueba de futuro para la evolución de los servicios que requieren una gran anchura de banda. Segundo porque permitirá que todos los servicios se integren en un único medio. Y finalmente, porque la tecnología ya está bien desarrollada. Sin embargo, la viabilidad económica depende de la producción en gran escala de componentes fiables, eficaces y de bajo coste usados en estructuras de sistemas flexibles que se puedan desplegar rápida y fácilmente. El autor subraya los factores críticos implicados y describe los progresos en curso de Alcatel en este área.

Chesnoy, J.; Heidemann, R.; Joseph, J.; Kumar, V.; Lemaître, D.; De Place, A.

Aplicación de la optoelectrónica a las radiocomunicaciones

Comunicaciones Eléctricas, 4º trimestre 1992, págs. 66-71

Los alimentadores óptico de microondas (AOM) ofrecen una alternativa de ser ligeros, compactos, flexibles mecánicamente y de bajo coste frente a sus equivalentes eléctricos convencionales en una serie de aplicaciones. Además, los cables de fibra óptica para la transmisión de microondas tienen la ventaja de su aislamiento galvánico y elevada inmunidad frente a las interferencias electromagnéticas inducidas. En este artículo se identifican los diferentes componentes, incluyendo láseres, moduladores, detectores, conectores, fibra y cable. Se sigue con un análisis de la aplicación de los sistemas de alimentadores ópticos por microondas en estaciones terrestres grandes y pequeñas, sistemas de radio móvil para telecomunicaciones y equipo de satélite.

Dupraz, J.; Gabriagues, J.-M.; Jacob, J.-B.; Speier, P.

El futuro de la conmutación fotónica

Comunicaciones Eléctricas, 4º trimestre 1992, págs. 72-77

Hoy, las técnicas ópticas están siendo ampliamente utilizadas en las redes de transmisión, y es por tanto natural considerar la posibilidad de introducir técnicas similares en los sistemas de conmutación con la intención de mantener la continuidad extremo-a-extremo del camino óptico. Este artículo revisa brevemente las distintas técnicas de conmutación óptica aplicables a la red de transporte de los nodos de conmutación junto con sus principales aplicaciones y tecnologías asociadas. Debido a que las señales ópticas tienen una longitud de onda portadora, ofrecen la posibilidad de la conmutación de longitud de onda además de las técnicas clásicas de conmutación espacial y temporal. Esto abre nuevas vías de aprovechamiento de la enorme anchura de banda ofrecida por los sistemas ópticos. La aplicación de técnicas ópticas a la red de control de un nodo de conmutación son incuestionables en la actualidad, pero depende de la evolución de la computación óptica, lo cual es un campo diferente.

Ohnsorge, H.; Haupt, H.; Desombre, P.

Los sistemas y componentes optoelectrónicos del futuro

Comunicaciones Eléctricas, 4º trimestre 1992, págs. 78-84

El artículo hace una revisión del progreso en las comunicaciones ópticas en los últimos 25 años, haciendo mención de los artículos más importantes publicados, los cuales han marcado hitos fundamentales en el desarrollo de esta tecnología revolucionaria. El fruto de la enorme inversión realizada en los sistemas de transmisión de fibras ópticas y en los componentes optoelectrónicos avanzados se obtendrá una vez que se alcance una masa crítica de abonados. El autor estima que este punto se alcanzará hacia la mitad de esta década, guiado por la introducción de la fibra al hogar. El artículo concluye mencionando un serie de posibilidades futuras y futurísticas.

Oficinas editoriales

Cualquier asunto relativo a las distintas ediciones de *Electrical Communication* se debe dirigir al editor adecuado (las peticiones de suscripciones se deben enviar por fax o por correo):

Edición inglesa :

Rod Hazell
Electrical Communication
ALCATEL
54, rue La Boétie
75382 París Cédex 08
Francia
Tel.: (33-1) 40.76.13.47
Fax.: (33-1) 40.76.14.26

Edición francesa:

Catherine Camus
Revue des Télécommunications
ALCATEL
54, rue La Boétie
75382 París Cédex 08
Francia
Tel.: (33-1) 40.76.13.48
Fax.: (33-1) 40.76.14.26

Edición alemana :

Theo Wichers
Elektrisches Nachrichtenwesen
ALCATEL SEL AG
Lorenzstrasse 10
7000 Stuttgart 40
Alemania
Tel.: (49) 711.821.46.90
Fax.: (49) 711.821.60.55

Edición española :

Gustavo Arroyo
Comunicaciones Eléctricas
ALCATEL STANDARD ELECTRICA
Ramírez de Prado 5
28045 Madrid
España
Tel.: (34-1) 467.30.00 ext. 1857
Fax.: (34-1) 468.78.32

Edición italiana :

Dino Callegari
Prospettive di Telecomunicazioni
ALCATEL ITALIA
Via Provinciale per Monza 33
20049 Concorezzo (Milano)
Italia
Tel.: (39) 39.60.44.350
Fax.: (39) 39.60.41.955