

**ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FISICAS, QUIMICAS
Y NATURALES DE ZARAGOZA**

AMPLIFICADORES DE FIBRA OPTICA

DISCURSO DE INGRESO LEIDO POR EL ACADEMICO ELECTO

Ilmo. Sr. D. Miguel Ángel Rebolledo Sanz

*EN EL ACTO DE SU RECEPCION SOLEMNE
CELEBRADO EL DIA 11 DE MAYO DEL AÑO 2.000*

Y

DISCURSO DE CONTESTACION POR EL

Ilmo. Sr. D. Luis Joaquín Boya Balet

ACADEMICO NUMERARIO



ZARAGOZA
2.000

Depósito legal: Z-984-2000

Imprime:

Sdad. Coop. De Artes Gráficas

Librería General

Pedro Cerbuna, 23

50009 Zaragoza

imprentalg@efor.es

AMPLIFICADORES DE FIBRA OPTICA

POR EL

Ilmo. Sr. D. Miguel Ángel Rebolledo Sanz

PREAMBULO.

A mi padre

Excmo. Señor Presidente,

Excmos. e Ilmos. Sra. y Sres. Académicos,

Señoras y señores:

En primer lugar, quiero expresar mi agradecimiento a los Señores Académicos, por haberme propuesto como miembro de esta Academia. Esto supone para mí un gran honor, por lo que trataré de llevar a cabo con el máximo empeño aquellas tareas que se me encomienden. En este momento, tan grato para mí, no puedo olvidar la ayuda que me han prestado tantas personas a lo largo de los años. Por ello, quiero expresar mi cariñoso agradecimiento a mi familia, mis amigos y a todos los profesores, compañeros de trabajo y alumnos que han contribuido a mi formación, han colaborado conmigo o me han motivado de alguna manera.

En segundo lugar, considerando que se me ha asignado la medalla cuyo número correspondió anteriormente al Profesor D. Justiniano Casas Peláez, quiero decir que constituye para mí un grandísimo honor y una tremenda responsabilidad el recibirla, que van unidos al dolor por la ausencia de quién la llevó con tanta dignidad. Siguiendo la costumbre de esta Academia, recordaré a continuación algunos datos de la biografía de mi antecesor. D. Justiniano Casas nació en Granucillo de Vidriales (provincia de Zamora) el 25 de Febrero de 1915. Estudió Magisterio, en la Escuela Normal de Palencia, desde 1931 hasta 1935 y fue Maestro Nacional, en la provincia de Palencia, desde 1934 hasta 1946. Desde 1940 hasta 1946 simultaneó este trabajo con sus estudios en Ciencias Exactas, en las Universidades de Salamanca y Madrid, obteniendo su grado de Licenciado en 1946. A partir de este año, y hasta 1952, ejerció como Profesor de Enseñanza Media en diversos colegios de Madrid. Nuevamente simultaneó esta actividad docente con otras actividades. Desde 1947 hasta 1951 fue Profesor Ayudante en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Madrid, en 1949 obtuvo el grado de Licenciado en Ciencias Físicas y en 1951 el grado de Doctor. También fue Becario en el Instituto de Optica “Daza de Valdés” (del Consejo Superior de Investigaciones Científicas) desde 1947 hasta 1949 y Colaborador Científico en el Instituto “Torres Quevedo”

(también del C.S.I.C.) desde 1949 hasta 1951. A partir de la obtención de su grado de Doctor, y hasta 1954, fue Investigador Científico en el Instituto de Optica “Daza de Valdés”.

En 1954 la Universidad de Zaragoza tuvo la fortuna de que D. Justiniano Casas ganase la Cátedra de Optica en la Facultad de Ciencias, plaza que ocupó hasta 1985, pasando a partir de entonces a ser Profesor Emérito, hasta su fallecimiento a finales de 1998. De su labor durante esos años se pueden decir tantas cosas, que desbordan la capacidad de este discurso, en el que solamente puedo resaltar las más esenciales. Ejerció la investigación en Espectrometría de Masas y Separación de Isótopos y en Optica, llevando a cabo del orden de un centenar de publicaciones, prototipos y patentes y dirigiendo más de veinticinco Tesis Doctorales en estas materias. Sólo su modestia personal ha impedido que su nombre figurara en muchas más publicaciones. Fue creador o promotor de los grupos de trabajo de “Espectrometría de Masas y Separación de Isótopos”, “Optica Instrumental”, “Optica Cuántica” y “Física del Estado Sólido”. De ellos han salido un gran número de Doctores que se han repartido por la mayor parte del país, siendo superior al medio centenar el número de discípulos directos que ocupan puestos en Universidades o Centros de Investigación. Por otra parte, la experiencia adquirida en su paso por todas las etapas de la docencia y sus excepcionales cualidades personales, hacían de él un magnífico Profesor, que sabía comunicar de forma tremendamente clara las cosas más complicadas y deleitar a quienes le escuchaban. Esto, junto con la calidad de su libro de “Optica”, le granjearon un prestigio sobresaliente en el campo de la enseñanza de la Física y especialmente de la Optica. Pero su labor docente no acaba ahí. Con su esfuerzo, consiguió que la docencia en la Sección de Físicas de la Universidad de Zaragoza ganase en calidad y extensión. En su campo de trabajo fundó la Especialidad de Optica, que ha sido cursada por un gran número de estudiantes de nuestra Universidad y de otras Universidades españolas. Fuera de su campo, consiguió atraer a nuestra Universidad a Profesores de considerable prestigio en las diferentes áreas de la Física. El resultado fue una sección de Físicas de gran calidad, tanto en las enseñanzas impartidas como en la investigación científica producida.

Pero todo lo anterior no le impidió participar en tareas de gestión. Cabe destacar que fue Director de los Departamentos de Física Fundamental y de Optica, Decano de la Facultad de Ciencias, Rector de la Universidad de Zaragoza, Presidente del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Presidente de la Academia de Ciencias de Zaragoza y Presidente de la Sociedad Española de Optica. Su labor le llevó a ser objeto de un considerable número de premios y distinciones, entre los que podría destacarse el haber sido miembro del Comité Español de Optica, del Consejo Nacional de Física y de la Comisión Internacional para la Enseñanza de la Optica, académico de la Academia de Ciencias de Madrid, de la Academia de Ciencias de Zaragoza y de la Academia de Medicina de Zaragoza, y el haber recibido la Medalla de Investigación de la Real Sociedad Española de Física y Química, la Gran Cruz de Alfonso X el Sabio, el Premio Nacional de Física, el Premio Aragón de la Investigación Científico-Técnica y la Medalla de Oro de la Universidad de Zaragoza.

En este pequeño resumen he podido solamente citar una parte de la extensísima labor que llevó a cabo D. Justiniano Casas, incluso en su etapa de Profesor Emérito, en la que desarrolló una actividad digna de todas sus etapas anteriores. Toda ella fue acompañada por una calidad humana tan excepcional que le granjeó la admiración de todos los que le conocimos (discípulos en su etapa de maestro, en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas y en la Universidad, colegas y otras muchas personas) que siempre hemos tenido a gala exhibir el cariño que le profesamos. Me siento abrumado al ocupar el lugar que correspondió en esta Academia un ser tan excepcional. Sé que por muchas cosas que haga nunca llegaré ni siquiera a acercarme a su nivel, pero emprenderé la tarea con humildad y, para ello, comenzaré con mi discurso que tratará sobre amplificadores de fibra óptica. Quisiera comenzar exponiendo las razones que me han llevado a elegir tal tema.

1.-ELECCION DEL TEMA.

Desde que inicié mis primeros contactos con la investigación científica, en 1970, mis preferencias se dirigieron claramente hacia la Óptica Cuántica. Mis trabajos en el Departamento de Física Fundamental de la Universidad de Zaragoza, dirigidos por el Profesor Eusebio Bernabeu, estuvieron en relación con la espectroscopía de átomos sometidos a campos magnéticos. Cuando, instigado por mi Maestro el Profesor D. Justiniano Casas, tuve la temeridad de firmar un concurso oposición a plaza de Profesor Agregado de Universidad, me vi obligado a estudiar muchas cosas. En aquel año largo de preparación descubrí dos grandes temas que me cautivaron: uno de ellos, dentro del campo de la Óptica Cuántica, fue la estadística de fotones y el otro, dentro de límites puramente clásicos en aquel momento, fue el relacionado con las fibras ópticas y la óptica integrada.

En 1975, después de haber conseguido la plaza a la que aspiraba, me trasladé a la Universidad de Santander y me planteé cuál de aquellos temas de trabajo que me atraían podría emprenderse. Enseguida comprendí que la financiación que podía obtener no me permitiría iniciar temas relacionados con fibras ópticas ni óptica integrada, pero si parecía ser suficiente para iniciar investigación en relación con estadística de fotones. Este fue mi tema de trabajo durante los nueve años que permanecí en aquella Universidad.

En 1984 me trasladé de nuevo a la Universidad de Zaragoza y encontré a unos cuantos buenos amigos que estaban dispuestos a unir sus esfuerzos en temas de investigación. Una parte de ellos tenían unas ideas originales sobre metrología en fibras ópticas y a este tema dedicaron su atención. Los demás seguimos dedicando la nuestra a la espectroscopía y a la estadística de fotones, sin dejar de vigilar las posibilidades que ofrecían las fibras ópticas. En 1986 se inició el proyecto europeo COST 217 sobre fibras ópticas. Comenzaron a asistir a las reuniones de este proyecto algunas de las personas dedicadas a estos temas, lo que nos permitió tener información de primera mano sobre el progreso de las diferentes técnicas.

En 1988, el comité gestor del proyecto COST 217 decidió iniciar trabajo sobre amplificadores en fibras ópticas. Parecía claro que se estaba generalizando el interés de la investigación y el desarrollo de estos dispositivos, dada la gran repercusión que podrían tener en la tecnología de comunicaciones ópticas. Para nosotros este hecho fue crucial. Encontramos en el tema de amplificadores de fibra óptica la unión de las temáticas de espectroscopía y de fibras ópticas y la posibilidad de entrar él cuando se estaba desarrollando. Iniciamos nuestros trabajos en amplificadores de fibra óptica en el año 1989. Los años que siguieron fueron los años más intensos de mi vida científica. Por una parte, tuve la dicha de ver como la ilusión nos impulsaba a todos a trabajar con fuerza, en una labor de verdadero equipo. Por otra parte, pude asistir muy de cerca, desde mi participación en los proyectos europeos COST 217 y 241, al desarrollo vertiginoso de un tema científico y tecnológico, lo que me permitió observar cómo una mezcla conveniente de modelos teóricos, experimentos físicos y objetivos tecnológicos y comerciales realistas (que no creo que estén reñidos con la ciencia) conseguían resultados insospechados.

Todo esto ha hecho que para mí el tema de amplificadores de fibra óptica sea entrañable. Esta es la razón por la que decidí que este discurso de ingreso en la Academia de Ciencias Exactas, Físicas, Químicas y Naturales de Zaragoza versase sobre dicho tema. No quisiera entrar en él sin hacer una pequeña introducción histórica que ayude a situarlo en su contexto.

2.-UN POCO DE HISTORIA.

En los amplificadores de fibra óptica se encuentran combinadas dos tecnologías: la de comunicaciones por fibra óptica y la tecnología láser. Será por tanto necesario recordar algunos hitos históricos de ambas.

Entre los diversos intentos con los que se trataron de establecer redes de comunicaciones ópticas de forma sistemática, cabe citar el llevado a cabo con los llamados telégrafos ópticos, que consistían en postes con piezas articuladas que, al adoptar diversas posiciones, permitían transmitir mensajes. En 1793, siguiendo el diseño de Claude Chappe, se comenzaron a instalar en Francia las primeras torres, que fueron incrementándose en número hasta cubrir la distancia de 230 km existente entre París y Lille. El mensaje, transmitido de torre en torre, tardaba unos 30 minutos en recorrer los 230 km. Este sistema fue un auténtico logro para su época y su uso se extendió de forma que al comienzo del siglo XIX casi toda Francia estaba cubierta por telégrafos ópticos. La idea se extendió por otros países europeos en los que se desarrollaron diferentes prototipos de telégrafos ópticos. No quedó atrás España, donde aparecieron (entre otros) los diseños de Agustín de Betancourt y Molina (1797) y de José María Mathé (1846). Concretamente, con el telégrafo de Mathé se logró, en 10 años en España, una red tan extensa como la que se consiguió en Francia en más de 50 años.

Un intento posterior para establecer comunicaciones ópticas se llevó a cabo en Inglaterra y tuvo como protagonista a Alexander Graham Bell, que apuntó la idea del

fotófono en 1878 y obtuvo los primeros resultados positivos en 1880. Así como los telégrafos ópticos lo eran solamente en el sentido de que la información se transmitía mediante la visualización de cambios en estructuras móviles, el fotófono puede decirse que era un auténtico dispositivo de comunicaciones ópticas. En el diseño de Bell la voz enviada sobre una trompetilla hacía vibrar un diafragma sobre el que incidía luz solar. La intensidad de la luz reflejada en el diafragma quedaba modulada y se transmitía por la atmósfera a lo largo de una longitud pequeña, hasta que llegaba a una célula de selenio que convertía las variaciones de intensidad luminosa en variaciones de voltaje, que se conectaban a un altavoz.

A pesar del éxito que tuvieron las pruebas, la tecnología no estaba preparada para el uso extendido del fotófono. Por una parte, estaba claro que había que prescindir de la luz del sol como portadora de los mensajes y había que sustituirla por fuentes de luz artificiales. Pero no era nada fácil conseguir haces de luz intensos y con dirección suficientemente bien definida, que permitiesen alcanzar el punto de llegada, con la intensidad necesaria para sensibilizar el detector. Hubo que esperar a la invención del láser, en el siglo XX, para conseguir esto. Por otra parte, comenzó a vislumbrarse que la transmisión de señales ópticas por la atmósfera no estaba exenta de dificultades, debido a las perturbaciones que ésta podía introducir. Hubo que esperar al desarrollo de las fibras ópticas y a su uso como guías de luz, para poder vencer estas dificultades. Todo esto, unido a la invención del telégrafo eléctrico, hizo que no se concediese al fotófono la importancia que tuvo en el proceso de desarrollo de las comunicaciones ópticas. Dado que los intentos de comunicaciones ópticas en la atmósfera, mediante luz láser, fueron anteriores al desarrollo de las comunicaciones por fibra óptica, nos detendremos por unos momentos en algunos puntos que son esenciales en la historia del desarrollo del láser.

El fenómeno físico responsable de la amplificación es la emisión estimulada, que fue introducida por Albert Einstein en 1917. A diferencia de lo que ocurre con la emisión espontánea, que se reparte por igual en todas las direcciones del espacio, la emisión estimulada solamente tiene lugar en la misma dirección y sentido del haz de luz estimulador. Además, los fotones emitidos por emisión estimulada tienen las mismas características que los fotones estimuladores, lo que los hace indistinguibles de éstos. Por ello, un haz de luz puede amplificarse, al pasar por un medio material en el que se provoquen más emisiones estimuladas que absorciones. Para ello, es preciso excitar a los átomos que componen el medio material, mediante lo que se llama energía de bombeo, parte de la cual se transfiere al haz de luz que se amplifica. Si uno de tales medios se encierra en una cavidad formada por dos superficies reflectantes enfrentadas, se puede producir un haz de luz láser, originado por el fenómeno de amplificación de la fluorescencia emitida por los átomos excitados, cuando ésta pasa múltiples veces por el medio amplificador.

La realización práctica de estas ideas no llegó inmediatamente, pues la tecnología todavía no estaba preparada y además, hubo que medir las energías y vidas medias de los niveles de muchos átomos y moléculas, para encontrar aquellos que cumplían las condiciones necesarias para obtener amplificación. Hacia 1940 la información obtenida

sobre estos parámetros era suficiente. En cuanto a las dificultades tecnológicas, éstas crecían al disminuir la longitud de onda de la radiación láser, debido al aumento de la proporción de emisión espontánea frente a la de emisión estimulada. Por otra parte, durante la segunda guerra mundial se dedicó una atención muy especial a las microondas, por motivos militares. Todo esto llevó a la longitud de onda de operación del primer amplificador de ondas electromagnéticas al dominio de las microondas. Así apareció, en 1954, el máser (acrónimo inglés de amplificación de microondas mediante emisión estimulada de radiación) que había sido desarrollado por Charles Townes y sus colaboradores. En 1958 Charles Townes y Arthur Schawlow consideraron que podía conseguirse la extensión de este dispositivo a zonas del espectro visible e infrarrojo, a pesar de las dificultades añadidas que aparecía en esta zona del espectro. Esto motivó el comienzo de las investigaciones, por parte de varios laboratorios, en lo que primero se llamó máser óptico y después láser (amplificación de luz mediante emisión estimulada de radiación). El primer láser apareció en 1960 y fue desarrollado por Theodore Maiman, utilizando una barra de rubí bombeada mediante una lámpara pulsante. En 1961 apareció el primer láser de gas, el láser de helio-neon, que emitía menos potencia pero lo hacía en régimen continuo.

Durante el resto de los años sesenta los investigadores probaron los más variados métodos para obtener acción láser y consiguieron desarrollar la mayor parte de los tipos de láseres que conocemos, aunque éstos necesitaron de un perfeccionamiento posterior. Por ejemplo, en 1962 se consiguió poner en funcionamiento el primer láser de semiconductor (aunque éste trabajaba a bajas temperaturas), en 1964 se obtuvieron los primeros resultados de amplificación en una fibra óptica dopada con neodimio y en 1965 en una fibra dopada con erbio (aunque el bombeo se hacía con una lámpara que rodeaba a la fibra y era muy poco eficiente). En definitiva la tecnología del láser permitió disponer de fuentes de alta intensidad, con divergencias del haz inferiores al milirradián y muy monocromáticas. Si a esto añadimos el desarrollo que experimentaron los detectores de semiconductor, es fácil de comprender que en los años sesenta se emprendiese el desarrollo de los sistemas de comunicaciones ópticas, basados en láseres trabajando en el espectro visible y propagándose en la atmósfera. ¿Pero qué había sido de las fibras ópticas que podían proporcionar otra alternativa?

Quizá el precedente más famoso sobre el guiado de luz por conductores ópticos se encuentra en el siglo XIX con el físico irlandés John Tyndall, que tenía por costumbre organizar giras por Gran Bretaña, para enseñar experimentos de Física. En uno de estos experimentos enseñaba como un haz de luz se propagaba, en el interior de un chorro de agua que caía desde un recipiente, siguiendo su trayectoria curvada. Este fenómeno es conocido hoy día por todo el que haya contemplado alguna vez una fuente luminosa. A pesar de que, a lo largo del tiempo, se propuso en varias ocasiones el uso de conductores de luz y de que se llegaron a fabricar capilares muy finos de vidrio, hubo que esperar hasta 1930 para conseguir los primeros resultados de luz guiada por una fibra óptica. Los progresos se llevaron a cabo lentamente, ya que las grandes pérdidas que se originaban en la transmisión permitían ésta solamente a muy cortas distancias. En 1951 un grupo de investigadores de

Estados Unidos consiguió la transmisión de una imagen a través de un haz de fibras ópticas. No obstante su uso práctico no llegó hasta 1953, cuando se consiguió fabricar fibras ópticas con recubrimiento. Esto originó una importante mejora en las propiedades de transmisión de las fibras ópticas y permitió que en los haces de fibras éstas pudiesen estar en contacto, con la consiguiente reducción del grosor del haz. Durante los años que siguieron hubo un considerable desarrollo de los endoscopios de fibra óptica para aplicaciones médicas y, hasta 1970, ésta fue su principal aplicación.

El primer estudio detallado sobre la posibilidad de uso de fibras ópticas en comunicaciones fue hecho en Inglaterra, en 1966, por Charles Kao y sus colaboradores, que sentaron las bases de las comunicaciones por fibra óptica. No obstante, en aquellos tiempos las mejores fibras ópticas originaban atenuaciones del orden de 1000 dB/km, mientras que en un día claro la atenuación atmosférica era del orden de 1 dB/km. Por ello se consideró que las comunicaciones por fibra óptica no serían prácticas a no ser que se consiguiesen atenuaciones de 20 dB/km. Ello permitiría la transmisión de señales a distancias de 2 km (espaciado habitual de los repetidores en comunicaciones eléctricas) con una reducción de potencia de 40 dB, que se consideraba podría ser aceptable. Por el momento quedaba la propagación en atmósfera como el único medio real para transmitir información por vía óptica.

El gran cambio llegó en 1970, cuando Corning Glass anunció la obtención de una fibra óptica con una atenuación de 20 dB/km para la longitud de onda de 633 nm, correspondiente al láser de helio-neon. Además, en el mismo año se consiguió hacer funcionar un láser de semiconductor, en régimen continuo y a temperatura ambiente. A partir de aquel momento se inició una carrera, en los laboratorios más importantes, para tratar de minimizar la atenuación. Esto se llevó a cabo por dos caminos: perfeccionando los vidrios y los métodos de fabricación de fibras ópticas, por un lado y, por otro lado, desarrollando láseres de semiconductor, que pudiesen emitir en zonas del espectro infrarrojo, donde la atenuación de los vidrios era menor. En 1973 se consiguió una atenuación de 2 dB/km en 850 nm (primera ventana de comunicaciones ópticas), en 1976 la atenuación bajó a 0.5 dB/km en 1300 nm (segunda ventana), en 1979 llegó a 0.2 dB/km en 1550 nm (tercera ventana), que se redujo en 1982 a 0.15 dB/km. Esto significaba que la luz podía propagarse en el interior de una fibra óptica, hasta distancias del orden de los cien kilómetros, sin necesidad de repetidores, frente a la corta distancia necesaria en comunicaciones eléctricas.

Debido a estos progresos, en la década de los ochenta se llevó a cabo, de forma masiva, la instalación de fibra óptica para comunicaciones. Primero se usaron fibras multimodo de salto de índice, luego se desarrollaron fibras multimodo de gradiente de índice y finalmente fibras monomodo. Este progreso permitió incrementar la capacidad de transmisión de información de las fibras ópticas, hasta alcanzar valores muy por encima de la capacidad de las comunicaciones eléctricas. Esto condujo hacia una tendencia a tratar de avanzar en la implantación de dispositivos ópticos, para llevar a cabo funciones que estaban siendo realizadas por dispositivos eléctricos. Esta tendencia alcanzó a uno de los dispositivos básicos en comunicaciones: los repetidores. Cuando la señal transmitida por una fibra óptica

se atenuaba hasta alcanzar los niveles mínimos de potencia permitidos, se convertía ésta en señal eléctrica mediante un receptor, posteriormente se amplificaba y regeneraba, mediante dispositivos electrónicos, y finalmente se reconvertía en señal óptica y se volvía a introducir en la red de fibra óptica. Este método presentaba importantes inconvenientes para las redes del futuro próximo. En primer lugar era excesivamente complejo. En segundo lugar no presentaba transparencia al método de codificación, lo que significaba que el instrumental electrónico que había que instalar en los repetidores debía ser cambiado si la forma de codificar las señales cambiaba. Esto suponía un cuello de botella para el desarrollo de las comunicaciones ópticas y explica que, en un momento determinado (últimos años de la década de los ochenta), se comenzase a plantear seriamente la posibilidad de utilizar amplificadores ópticos, que amplifican la señal directamente y con independencia del tipo de codificación, para sustituir a los repetidores clásicos. Este es pues el punto de partida, situado en su contexto histórico, de lo que posteriormente dio lugar a una tecnología con más aplicaciones que las inicialmente previstas, como veremos posteriormente.

3.-TIPOS DE AMPLIFICADORES DE FIBRA.

Resulta evidente que solamente podían ser útiles aquellos amplificadores ópticos que fuesen fácilmente conectables a las redes de comunicaciones por fibra óptica. Esto limitó las posibilidades realistas a dos: los amplificadores de semiconductor, por su pequeño tamaño y los amplificadores de fibra óptica, por su facilidad de integración en la red. A ambos tipos de amplificadores se ha dedicado un considerable esfuerzo de investigación y desarrollo y ambos se han llegado a implantar en redes. No obstante, las apreciables ventajas de los amplificadores de fibra que desarrollaremos a continuación (tales como pérdidas de inserción y sensibilidad a la polarización muy inferiores) han hecho que su uso sea más frecuente.

Existen dos ventajas básicas de los amplificadores de fibra óptica, respecto a los amplificadores convencionales. En primer lugar, la potencia de bombeo necesaria es mucho menor, debido a que ésta se distribuye en una zona de unas pocas micras, en el interior de la fibra, lo que permite conseguir más fácilmente la intensidad de bombeo necesaria para la amplificación. En segundo lugar, la fibra óptica puede enrollarse fácilmente, ocupando poco volumen, lo que permite utilizar amplificadores muy largos, para conseguir la máxima ganancia compatible con la potencia de bombeo utilizada. En la actualidad existen tres tipos básicos de amplificadores de fibra óptica: los de núcleo dopado con iones de tierras raras, los de difusión Brillouin estimulada y los de difusión Raman estimulada.

En los de núcleo dopado con tierras raras (concretamente lantánidos) la acción láser se obtiene por emisión estimulada, correspondiente a la transición entre dos niveles del ion de tierra rara, y las longitudes de onda de bombeo y de amplificación quedan fijadas por la estructura de niveles de dichos iones. La longitud de fibra amplificadora necesaria es de unas decenas de metros y la potencia de bombeo típica es de varias decenas o centenas de

mW, dependiendo del ion dopante. Se consiguen curvas de ganancia con una anchura de banda espectral del orden de 10 nm.

En los amplificadores por difusión Brillouin o Raman estimuladas, la longitud de onda de amplificación queda fijada por la longitud de onda de bombeo y cambia con ella y con las propiedades del material del que está hecha la fibra. Los basados en difusión Brillouin requieren algunas decenas de km de fibra, potencias de bombeo de unos pocos mW y amplifican en un espectro de una anchura de banda de tan solo 0.001 nm. Los basados en difusión Raman requieren unos pocos km de fibra, potencias de bombeo de algunos vatios y la anchura de banda del espectro de amplificación es superior a 20 nm.

El pequeñísimo ancho de banda de los amplificadores basados en efecto Brillouin y la considerable potencia de bombeo necesaria en los amplificadores basados en efecto Raman, han hecho que se hayan dedicado esfuerzos mucho más considerables a la investigación y desarrollo de amplificadores de fibra dopada con tierras raras, para su aplicación en las tres ventanas de comunicaciones ópticas. Concretamente el de erbio en fibra de sílice para la tercera ventana, el de praseodimio en fibra de ZBLAN para la segunda ventana y el de mezcla de tulio y erbio en fibra de ZBLAN para la primera ventana. En estos últimos tipos de amplificadores nos centraremos a partir de ahora.

4.-AMPLIFICADORES DE FIBRA OPTICA DOPADA CON TIERRAS RARAS.

En este tipo de amplificadores, los iones de tierra rara (introducidos como dopantes en el interior del núcleo de la fibra) proporcionan dos niveles (niveles inferior y superior de la transición láser) entre los que se producen transiciones de absorción y emisión, a la longitud de onda para la que se quiere conseguir amplificación. Para ello es preciso que domine la emisión estimulada frente a la absorción, lo que, en términos de niveles no degenerados, significa que en el nivel superior de la transición láser la población debe ser mayor que la que existe en el nivel inferior. Teniendo en cuenta que en el equilibrio térmico ocurre lo contrario, debido a la ley de Boltzman que regula la distribución de poblaciones, la situación requerida para que haya amplificación se denomina inversión de población. Para conseguir esta inversión es preciso que intervenga en el proceso al menos un tercer nivel del ion dopante (nivel de bombeo) situado por encima de los niveles correspondientes a la transición láser, y que presente unas características muy peculiares. En el caso de los amplificadores de fibra óptica, debe existir una transición radiativa intensa desde el nivel fundamental del ion al nivel de bombeo, que sea capaz de subir muchos iones a dicho nivel, mediante absorción de luz. Además debe de haber una transición no radiativa (por mecanismos colisionales) desde el nivel de bombeo hasta el nivel superior de la transición láser, que permita un trasvase muy rápido de iones a dicho nivel. Pero esto no serviría de mucho si los iones no fuesen capaces de permanecer un tiempo considerable en este nivel (nivel de vida media larga) para así conseguir en él una acumulación, que permita una inversión de población con el nivel inferior de la transición láser. Este mecanismo de

consecución de la inversión de población se denomina bombeo óptico. Cuando el nivel inferior de la transición láser coincide con el fundamental, el esquema de bombeo se llama de tres niveles. En caso contrario es preciso la participación de un cuarto nivel (por debajo de los tres primeros) para permitir que el nivel inferior de la transición láser se despueble rápidamente (por desexcitación no radiativa) lo que facilita la inversión de población del superior respecto al inferior. Este esquema de bombeo se llama de cuatro niveles y requiere mucha menos energía de bombeo, porque no hay que producir la inversión de población respecto al nivel fundamental que está muy poblado, sino respecto a un nivel poco poblado.

Para entender los detalles finales del mecanismo de bombeo es preciso recordar que, en el caso de iones de tierras raras en el interior de fibras ópticas, hay que considerar los mecanismos de ensanchamiento de los niveles, que los convierten en bandas de energía. El campo eléctrico creado, sobre cada ion de tierra rara, por los diferentes iones que lo rodean (los de la matriz vítrea que compone la fibra y los propios del dopante) desdobra cada nivel energético en varios subniveles Stark. Las energías de estos subniveles cambian, en cada punto, debido a fluctuaciones térmicas de los iones. Esto es equivalente, desde un punto de vista estadístico, a un ensanchamiento de cada uno de dichos subniveles, denominado ensanchamiento homogéneo. Por otra parte, el campo eléctrico cambia de un punto a otro, debido a inhomogeneidades en la distribución de iones, lo que origina un ensanchamiento efectivo adicional, denominado ensanchamiento inhomogéneo. La suma de los tres efectos comentados origina la transformación de cada nivel de energía de los iones de tierra rara en una banda de energía de cierta anchura. Esto permite la existencia aparente de esquemas de bombeo entre dos niveles (lo cual es estrictamente imposible) que realmente corresponden a esquemas de bombeo entre dos bandas.

En la práctica, hay que considerar una serie de fenómenos, cuyo conocimiento nos puede permitir mejorar las prestaciones del amplificador. La luz de bombeo se acopla a la fibra amplificadora por uno o por ambos extremos. De esta forma, el bombeo, al propagarse de forma guiada a lo largo de la fibra, va invirtiendo la población. Por ello, la señal, que debe acoplarse a la fibra por uno de sus extremos, es amplificada, debido al predominio de la emisión estimulada (que tiene lugar en la dirección de la fibra) frente a la absorción. La producción de inversión de población a lo largo de la fibra, va debilitando progresivamente la intensidad del bombeo, hasta que éste comienza a ser incapaz de producirla. Este fenómeno condiciona la longitud que debe tener la fibra, llamada longitud óptima, para no desaprovechar su capacidad de amplificación, si se hace más corta, y evitar que parte de la fibra sea absorbente, si se hace más larga. Por otra parte, los iones que se encuentran en el nivel superior de la transición láser, no solamente pasan al nivel inferior por emisión estimulada, sino que también lo hacen por emisión espontánea, que se distribuye por igual en todas las direcciones del espacio. Parte de esta emisión espontánea queda acoplada en la fibra y se amplifica al propagarse en ambos sentidos, constituyendo lo que se denomina fluorescencia amplificada copropagante y contrapropagante, que se superpone a la señal, siendo la causa principal del ruido del amplificador. Por ello, cuando la aplicación para la que

va a usarse el amplificador lo permite, se colocan filtros espectrales que eliminen la mayor cantidad posible de fluorescencia, sin deteriorar la señal. Además, si la fluorescencia amplificada se refleja en los extremos del amplificador, puede producir emisión láser, al amplificarse en pasos sucesivos por la fibra dopada, lo que resulta tremendamente perjudicial, al superponerse con la señal. Para evitar este efecto, se colocan aisladores ópticos (basados en el efecto Faraday) en uno o ambos extremos del amplificador, para de esta manera evitar los retornos no deseados.

Otro fenómeno a tener en cuenta, para conseguir un funcionamiento óptimo del amplificador, es la influencia de la concentración del dopante. A primera vista, parece más cómodo (por problemas de espacio) utilizar fibras cortas altamente dopadas, que fibras largas débilmente dopadas. Pero este argumento deja de ser válido cuando se tiene en cuenta que las altas concentraciones provocan interacciones entre los iones dopantes, que los desexcitan y contribuyen a destruir la inversión de población, lo que disminuye la eficiencia del amplificador. Esta es la razón por la cual se usan fibras amplificadoras largas (de unas decenas de metros), con baja concentración de dopante (algunas centenas de partes por millón en peso). Incluso a estas concentraciones, se suelen añadir codopantes en el núcleo de la fibra, tales como aluminio, fósforo o germanio, que permiten que el dopante amplificador se diluya mejor, evitando así la formación de agregados. Finalmente, hay que procurar evitar efectos como la absorción desde estados excitados, consistente en transiciones radiativas desde el nivel de bombeo o desde el nivel excitado de la transición láser. En el primer caso parte de los iones dopantes van a niveles superiores de energía en lugar de ir al nivel excitado de la transición láser. En el segundo caso son los iones que ya han llegado a este nivel los que van a niveles superiores. En ambos casos se reduce la inversión de población y, por ello, la eficiencia en la amplificación.

5.-AMPLIFICADORES DE ERBIO.

Los amplificadores de fibra de sílice dopada con erbio son los que mejores prestaciones presentan, en comparación con otros amplificadores de fibra óptica dopada con tierras raras. Por una parte, se consiguen hasta 50 dB de ganancia (en régimen de baja señal de entrada), con potencias de bombeo moderadas (de varias decenas de mW). Por otra parte, la zona espectral en la que amplifican se encuentra típicamente en torno al intervalo que va desde 1.53 a 1.55 μm , correspondiente a la tercera ventana, que tiene especial interés en comunicaciones ópticas por la baja atenuación que presentan las fibras de sílice a estas longitudes de onda.

La transición láser tiene lugar desde niveles de la banda $^4I_{13/2}$ hasta niveles de la banda $^4I_{15/2}$. Examinando las bandas superiores y las transiciones radiativas permitidas desde la banda fundamental $^4I_{15/2}$ hasta estas bandas, se encuentran posibles transiciones de bombeo en torno a 530, 665, 800 y 980 nm. Aparece una última transición de bombeo en

torno a 1480 nm, que tiene lugar entre niveles de las mismas bandas que intervienen en la amplificación (la $^4I_{15/2}$ y la $^4I_{13/2}$). Para ello es preciso que la longitud de onda de bombeo sea inferior a la de la señal que se amplifica. A la hora de seleccionar las longitudes de onda de bombeo más apropiadas, hay que eliminar las de 530 y 665 nm porque no existen fuentes pequeñas y suficientemente potentes. En cuanto a la posibilidad de bombear a 800 nm, hay que tener en cuenta que esta longitud de onda provoca transiciones intensas desde el estado excitado de la transición láser, que debilitan fuertemente el mecanismo de bombeo.

Por estos motivos es la luz de longitudes de onda de 980 ó 1480 nm la que se suele usar para el bombeo en amplificadores de erbio. En los últimos años se han desarrollado láseres de semiconductor, operando a estas longitudes de onda, que proporcionan más de 100 mW de potencia. Para conseguir estabilidad en la potencia y longitud de onda emitidas, es preciso un control estricto de la corriente de alimentación y de la temperatura de los láseres emisores. Esto último se lleva a cabo mediante refrigeradores que operan por efecto Peltier. Para ayudar en la estabilización de la longitud de onda, suelen usarse también redes de Bragg de fibra óptica. Los láseres que emiten a 980 nm suelen estar fabricados a base de compuestos de GaAs con In y P y los que emiten a 1480 nm a base de compuestos de GaAs y Al. En los últimos años se está utilizando otro mecanismo de bombeo consistente en codopar la fibra con iterbio y bombear con luz de 980 nm, que provoca la excitación de los iones de iterbio con gran eficiencia, que se transfiere posteriormente a los iones de erbio. De esta manera consigue aumentarse la eficiencia del bombeo.

6.-AMPLIFICADORES DE PRASEODIMIO.

A pesar de las buenas prestaciones de los amplificadores de erbio y de su régimen de operación en tercera ventana, que es la que más interés presenta para comunicaciones a larga distancia, hay que considerar que una parte muy importante de las redes de larga distancia que están instaladas, están formadas por fibras ópticas optimizadas para la propagación de luz con longitud de onda de 1.3 mm, que corresponde a la segunda ventana de comunicaciones ópticas. Por ello es también interesante disponer de amplificadores ópticos que operen en esta ventana.

En este momento las mejores prestaciones se obtienen con el amplificador de praseodimio. La amplificación en segunda ventana se lleva a cabo mediante la emisión estimulada desde la banda 1G_4 hasta la 3H_5 . Cuando el praseodimio se introduce como dopante en el núcleo de una fibra de sílice, aparecen transiciones no radiativas muy fuertes desde la banda 1G_4 , que impiden la inversión de población con la banda 3H_5 , y por lo tanto imposibilitan la amplificación. Para solventar este problema es preciso recurrir a fibras de ZBLAN, que es una mezcla de fluoruros de circonio, bario, lantano, aluminio y sodio. Esto origina un fuerte encarecimiento del amplificador. El bombeo se hace, desde la banda

fundamental 3H_4 hasta la 1G_4 , mediante absorción de luz de 1.02 mm, emitida por diodos láser. Este bombeo resulta poco eficiente, ya que es absorbido, junto con la señal, desde la banda 1G_4 . Para compensar estos efectos hay que emplear potencias de bombeo de varios cientos de milivatios, que son unas diez veces superiores a las potencias de bombeo necesarias en los amplificadores de erbio. No obstante, se consiguen así del orden de 30 dB de ganancia (en régimen de baja señal de entrada) lo que puede resultar suficiente para amplificar las señales en red.

7.-GANANCIA Y RUIDO. PROPIEDADES DINAMICAS.

Una vez introducidos los fundamentos, quisiera discutir algunos detalles a tener en cuenta en el diseño de los amplificadores de fibras dopadas con tierras raras descritos anteriormente. En primer lugar centraré la discusión sobre la optimización de la ganancia, que es el parámetro más importante del amplificador. La primera precaución para ello ha de tenerse en la fabricación de la fibra, considerando que los iones dopantes no van a ser bombeados de manera uniforme sobre la sección transversal de la misma. La distribución de intensidad de bombeo en dicha sección está regulada por los perfiles de intensidad de los modos que se propagan confinados en la fibra. En consecuencia, la intensidad de bombeo es mayor en el centro del núcleo que en sus bordes, lo que conduce a que habitualmente solamente se alcance inversión de población en la parte central del núcleo. Por lo tanto, es preciso tener la precaución de no dopar con iones amplificadores las zonas en las que no se va a conseguir inversión de población, porque en ellas se produce absorción de señal, en lugar de amplificación, con la consiguiente merma de la ganancia global del amplificador.

Una vez fabricada la fibra, es preciso considerar que la optimización de la ganancia depende de la aplicación concreta que vaya a darse al amplificador, debido a la dependencia de la longitud óptima de la fibra con la longitud de onda y potencia del bombeo y la señal. Parece claro que si la potencia de bombeo aumenta, éste será capaz de invertir la población en un trozo de fibra más larga, lo que aumenta la longitud óptima de ésta. Además, la longitud óptima es menor para las longitudes de onda en las que el bombeo es más eficiente, puesto que la potencia de bombeo es absorbida más rápidamente a lo largo de la fibra y pierde antes su capacidad para invertir la población. Si aumenta la potencia de la señal, ésta es capaz de provocar más emisiones estimuladas, lo que contribuye a disminuir la inversión de población y, por tanto, a acortar la longitud óptima. En este caso la ganancia es menor, pero la potencia de salida es mayor, lo cual tiene su utilidad como veremos posteriormente. Al cambiar la longitud de onda cambia la probabilidad de emisión estimulada y por tanto la ganancia, de forma que cuando éstas son mayores, la inversión de población disminuye y con ella la longitud óptima.

Los comentarios anteriores muestran que la distribución de dopante de la fibra, así como las longitudes de onda y potencias del bombeo y la señal, influyen claramente en el

diseño del amplificador. Para llevar a cabo éste es de gran ayuda disponer de modelos teóricos que permitan simular su comportamiento. En este campo se ha llevado a cabo abundante trabajo y se dispone de modelos que permiten calcular la evolución, a lo largo de la fibra, de las potencias de bombeo y señal, así como de las fluorescencias copropagante y contrapropagante. El bombeo suele considerarse monocromático y, por tanto, solamente es preciso plantear una ecuación diferencial para describir su evolución. La señal que se introduce en el amplificador a través de la red, suele ser o bien monocromática o bien el resultado de la multiplexación de varias señales monocromáticas, que constituyen un espectro discreto. Por ello hay que introducir una ecuación diferencial de evolución por cada una de las longitudes de onda que contenga este espectro. En cuanto a la fluorescencia, su espectro es continuo y suele ser bastante ancho, lo que obliga a dividirlo en muchos canales de pequeña anchura espectral y plantear dos ecuaciones diferenciales de evolución para cada uno de ellos (una para la fluorescencia copropagante y otra para la contra- propagante). Como en las ecuaciones de evolución de las potencias intervienen las poblaciones que tienen los distintos niveles del ion amplificador sobre todo el volumen de la fibra, hay que plantear también ecuaciones diferenciales de evolución de estas poblaciones, en las que a su vez intervienen las potencias de bombeo, señal y fluorescencia. Se obtiene, por tanto, un considerable número de ecuaciones diferenciales acopladas, que se resuelven en general de forma numérica, aunque también se han desarrollado algunos métodos analíticos aproximados.

La resolución de estas ecuaciones requiere el conocimiento de las potencias del bombeo y de las distintas señales multiplexadas y de otros parámetros, como son: distribución de densidad del dopante amplificador, vidas medias de los niveles que intervienen en las ecuaciones de evolución y secciones eficaces de las transiciones que tienen lugar entre estos niveles, además de los parámetros que describen a la fibra desde el punto de vista pasivo. Para medir los parámetros que describen a la fibra desde un punto de vista activo se han desarrollado una serie de técnicas de caracterización, que en algunos casos (como en la medida de la distribución de dopante amplificador) presentan considerables dificultades.

Otro parámetro importante del amplificador es el ruido, que deteriora la señal amplificada. Como hemos visto anteriormente, la población del nivel excitado de la transición láser origina la fluorescencia amplificada, que es un parásito que se superpone a la señal. Considerando que la potencia de bombeo se mantiene constante en el tiempo, la potencia de la fluorescencia debe ser en principio constante, lo que supone añadir un nivel constante de potencia parásita a la señal. Teniendo en cuenta que las señales que se usan en comunicaciones ópticas son variables con el tiempo y de frecuencias elevadas, esto no supondría un problema importante. El verdadero problema estriba en que al superponer ondas electromagnéticas con frecuencias diferentes, aparece una modulación sinusoidal de la intensidad de la onda resultante, con una frecuencia que es la diferencia entre las frecuencias de las dos ondas. Por lo tanto, a la salida del amplificador aparecerán todas las modulaciones debidas a la mezcla de la señal con cada una de las frecuencias de la fluorescencia, y de las distintas frecuencias de la fluorescencia entre sí, originando fluctuaciones temporales de

intensidad, que pueden ser de alta frecuencia (debido a la considerable anchura del espectro de fluorescencia) y pueden dificultar el reconocimiento de la señal. El ruido originado por estos fenómenos se evalúa mediante la figura de ruido, que expresa, en escala logarítmica, la relación entre el cociente señal/ruido a la entrada y a la salida del amplificador. Existen modelos sencillos que permiten obtener la figura de ruido a partir de la medida de la fluorescencia amplificada. Como ésta puede ser simulada mediante los modelos descritos anteriormente, éstos permiten predecir la figura de ruido además de la ganancia.

Considerando que las señales que se emplean en comunicaciones ópticas son señales variables con el tiempo, es preciso analizar otros efectos perjudiciales como son la distorsión de la señal al amplificarse (originada por la posible dependencia de la ganancia con la potencia de la señal introducida en el amplificador) y el cruce de canales (consistente en la transferencia de información de un canal de comunicación a otro). Al amplificarse la señal a su paso por la fibra dopada, se origina un desdoblamiento del nivel excitado de la transición láser, que crece con la potencia de la señal y es apreciable si ésta no es excesivamente débil. Este desdoblamiento origina un decrecimiento de la ganancia, que pasa así a disminuir cuando la potencia de la señal aumente y viceversa, lo que origina distorsión sobre la señal amplificada. Por otra parte, la variación de la potencia de la señal con el tiempo origina una modulación en la inversión de población, que a su vez origina una modulación en la ganancia. Cuando una segunda señal, correspondiente a otro canal de comunicación, se introduce en el amplificador, ésta se ve afectada por una ganancia que está modulada por la primera y que, por tanto, transfiere su modulación a la segunda, originándose así un cruce de canales. En la práctica, para conocer la magnitud de estos efectos, hay que considerar que la dinámica de la inversión de población viene regulada por el valor de la vida media del nivel superior de la transición láser. Es fácil comprender que la población de este nivel no puede verse afectada por variaciones de la potencia de la señal que se lleven a cabo en tiempos pequeños frente a su vida media. En el caso del erbio, esta vida media (que depende ligeramente de los codopantes del núcleo) toma valores próximos a 10 ms, lo que implica que variaciones de señal que tengan lugar en tiempos inferiores a 0.1 ms no pueden afectar a la inversión de población. Esto quiere decir que para señales con frecuencias superiores a 10 KHz no se presentan los efectos de distorsión ni de cruce de canales. En el caso del praseodimio la vida media del nivel en cuestión es de unos 100 ms, lo que significa que dejan de presentarse estos efectos a frecuencias superiores a 1MHz. Como estas frecuencias son bajas en comparación con las que se utilizan en comunicaciones ópticas, se puede concluir que los amplificadores citados se encuentran, en la práctica, libres de efectos de distorsión e intermodulación.

8.-APLICACIONES.

Como he comentado en la introducción histórica, los amplificadores de fibra óptica (y en particular los de fibra dopada con tierras raras) se desarrollaron para tratar de sustituir los repetidores eléctricos por repetidores ópticos, en las redes de comunicaciones por

fibra óptica. En un repetidor se introduce la señal que se ha debilitado, debido a la atenuación experimentada en su propagación por la red de fibra, para volver a recuperar la potencia que tenía al comienzo del recorrido. Por tanto, el amplificador opera en régimen de baja señal, en el cual se consigue la ganancia suficiente (típicamente entre 30 y 40 dB) para que la señal amplificada pueda seguir propagándose a lo largo de alrededor de medio centenar de kilómetros, antes de necesitar otro repetidor. Estos repetidores, que son transparentes al tipo de codificación, se usan tanto en redes digitales (en telefonía, transmisión de datos, transmisión de vídeo digital, etc.) como en redes analógicas (fundamentalmente para transmisión de señales de audio y vídeo analógicos). Su uso, de gran utilidad en comunicaciones a larga distancia, es vital en el caso de cables submarinos, debido a su simplicidad y buenas prestaciones. Para ilustrar los resultados que se obtienen, cuando se utilizan amplificadores de fibra dopada con tierras raras, daré a continuación dos ejemplos. El primero se refiere a un experimento de laboratorio. Utilizando varios carretes con fibra óptica enrollada, unidos por amplificadores de erbio, se ha llegado a conseguir la propagación de una señal de 2.5 Gb/s a lo largo de 21000 km. El segundo ejemplo se refiere a pruebas en una instalación de red de fibra, llevadas a cabo por las empresas AT&T y KDD, que consiguieron propagar una señal de 5 Gb/s, a lo largo de 9000 km, utilizando 274 amplificadores de erbio, situados a una distancia media de 33 km. Estos ejemplos evidencian que los citados amplificadores permiten cubrir perfectamente las distancias necesarias en nuestro planeta.

En las redes de fibra, no solamente se necesitan amplificadores ópticos para ser usados como repetidores, sino también para otras finalidades. Por ejemplo, cuando se llega a una ramificación en la red, la potencia en cada rama puede quedar considerablemente reducida. Este problema puede solventarse poniendo un repetidor en cada rama, o bien poniendo un amplificador óptico antes de la ramificación, que eleve la potencia de la señal al nivel necesario para que la potencia después de la ramificación sea suficiente. Es evidente que se ahorran dispositivos utilizando esta última solución. Por otra parte, en los cables submarinos es preciso escatimar al máximo el número de repetidores (por razones evidentes) lo que puede llevarse a cabo utilizando amplificadores de potencia antes del extremo de entrada de la señal al cable. En concreto, los amplificadores de erbio son capaces de conseguir señales amplificadas de varios vatios de potencia, con la potencia de bombeo adecuada. A estos niveles de potencia hay que tener en cuenta que los efectos no lineales que se producen en las fibras pueden perturbar a las señales que se propagan, por lo que es preciso estudiar cuidadosamente el valor máximo de potencia que cada tipo de fibra permite.

Otra de las aplicaciones importantes de los amplificadores que estamos discutiendo, se basa en que la colocación de un amplificador óptico justo antes de un detector de señal, produce un efecto de mejora de la sensibilidad del detector, lo que permite alargar la distancia que va desde éste hasta el último repetidor. En estas condiciones el amplificador óptico actúa como preamplificador del detector. Los preamplificadores ópticos (colocados antes del detector) tienen la ventaja de producir mucho menos ruido que los

preamplificadores electrónicos (colocados después del detector) para las altas frecuencias que se utilizan en comunicaciones ópticas.

Como ilustración cuantitativa de la utilidad de las dos últimas aplicaciones discutidas, se puede decir que combinando un amplificador de potencia con un preamplificador (ambos ópticos) se puede alargar la distancia sin repetidores hasta unos 300 km. Si en el esquema anterior intercalamos una fibra dopada con tierra rara a la que se le envía la potencia de bombeo desde el extremo inicial del recorrido (bombeo remoto) la distancia que puede recorrer la señal sin necesitar dispositivos electrónicos (como la fuente de alimentación de la fuente de bombeo del amplificador) pasa a ser del orden de 500 km. Este tipo de montaje es muy útil en cables submarinos.

Como es bien sabido, el fenómeno de dispersión cromática que presentan las fibras ópticas, hace que los pulsos representativos de los diferentes bits del mensaje se ensanchen en el recorrido, lo que limita la capacidad de transmisión de información. A lo largo de los años se ha hecho un progreso importante en la reducción de la dispersión, llegando a valores inferiores al ps/km.nm que son muy difíciles de mejorar. En este momento se plantean dos alternativas para aumentar la capacidad de transmisión de información: la transmisión mediante solitones y la multiplexación en longitud de onda. En ambos casos los amplificadores de fibra óptica dopada con tierras raras juegan un papel importante.

La alternativa de los solitones consiste en compensar el desplazamiento que sufren las componentes espectrales del pulso, originado por la dispersión, con un desplazamiento de valor opuesto, que puede obtenerse gracias al efecto Kerr no lineal. De esta manera se consiguen pulsos (llamados solitones) cuya anchura se mantiene a lo largo del recorrido (siempre que la potencia sea superior a un umbral) lo que aumenta considerablemente la capacidad de transmisión de información. Para compensar las pérdidas por atenuación, que llegarían a disminuir la potencia por debajo del umbral, es necesario colocar amplificadores ópticos a lo largo del recorrido. Se ha llevado a cabo mucho trabajo sobre la teoría y tecnología de solitones, pero no se han obtenido todavía resultados espectaculares, en comparación con los obtenidos mediante pulsos dispersivos. Para ilustrar esto, se puede decir que se ha conseguido en laboratorio la propagación de señales de 10 Gb/s a lo largo de un millón de kilómetros y en red real la propagación de señales de 40 Gb/s a distancias de 4000 km.

La alternativa de multiplexación en longitud de onda consiste en propagar por una misma fibra señales de distintas longitudes de onda, lo que multiplica la capacidad de transmisión por el número de longitudes de onda empleadas. Aquí los amplificadores ópticos juegan un papel importante, pues permiten la amplificación simultánea de todas las señales multiplexadas. Naturalmente hay que utilizar longitudes de onda que se encuentren dentro del espectro de ganancia de los amplificadores. En el caso de los amplificadores dopados con erbio (que son los más usados dentro de la familia de amplificadores dopados con tierras raras) la falta de planeidad de la curva de ganancia espectral hace que las señales de las

diferentes longitudes de onda puedan alcanzar potencias muy diferentes, lo que no es deseable. Para evitar esto se han desarrollado varios métodos de aplanamiento: utilizando altas concentraciones de aluminio en el núcleo de las fibras dopadas, usando filtros espectrales, redes de Bragg o filtros activos (por ejemplo filtros acustoópticos) para controlar de forma dinámica la potencia de salida de las distintas longitudes de onda. Con estos métodos se han conseguido buenos resultados con multiplexación de hasta cien longitudes de onda y parece que, por el momento, la alternativa de multiplexación en longitud de onda ofrece mejores perspectivas que la de propagación de solitones.

Creo que todas estas aplicaciones muestran claramente que los amplificadores de fibra óptica son unos dispositivos de gran interés en la tecnología de comunicaciones ópticas. Así lo entendimos en nuestro grupo de trabajo y por ello decidimos dedicar nuestro esfuerzo a estos temas. No quisiera acabar sin decir algo sobre la actividad que, aunque modesta, hemos llevado a cabo.

9.-APORTACIONES DE NUESTRO GRUPO A LA INVESTIGACION EN RELACION CON AMPLIFICADORES DE FIBRA OPTICA DOPADA CON ERBIO.

Desde el comienzo nos impusimos un método de trabajo, que hemos mantenido a lo largo del tiempo, basado en las siguientes etapas: estudio de los fenómenos físicos que aparecen en el amplificador, modelización de dichos fenómenos, caracterización experimental de los parámetros necesarios en los modelos, predicción del funcionamiento del amplificador, lo que supone el cálculo de ganancia y fluorescencia, estudio experimental del funcionamiento del amplificador, comparación de resultados teóricos y experimentales, corrección de modelos y optimización de dispositivos.

Para seguir esta metodología de trabajo, tuvimos que poner a punto métodos de simulación por ordenador de la ganancia y fluorescencia en un amplificador de erbio. Por otra parte, tuvimos que desarrollar técnicas de construcción y optimización de amplificadores de fibra dopada con erbio, técnicas de medida de ganancia y ruido (tanto para señales estáticas como dinámicas) y técnicas de caracterización de los parámetros que requerían los modelos.

Como estos parámetros se obtienen por ajuste entre valores simulados y valores experimentales de magnitudes que dependan de ellos, es preciso que el proceso de simulación sea lo más rápido posible, para evitar que los procesos de ajuste sean excesivamente lentos. Al desarrollar programas de cálculo de ganancia y fluorescencia con los modelos que estaban en uso, nos dimos cuenta de que dichos programas ocupaban la mayor parte del tiempo en el cálculo de integrales de solapamiento entre las distribuciones modales de intensidad y las distribuciones de población de los niveles que intervenían. El problema fundamental se debía a que había que calcular estas integrales sobre un gran número de secciones transversales a lo largo de la fibra.

Para evitar esto desarrollamos métodos de resolución de las ecuaciones de evolución, mediante la introducción de factores de solapamiento dependientes de las potencias del bombeo y la señal, que requerían solamente el cálculo de las integrales de solapamiento en la sección transversal de entrada a la fibra. Con este método conseguimos resultados en concordancia con los obtenidos por los métodos habituales (ya que las diferencias encontradas no pasaban de algunas décimas de dB) con una reducción de un factor cinco en el tiempo de cálculo. Pero ésta no fue la única ventaja de los factores de solapamiento introducidos por nosotros. Algunos autores había tratado de encontrar soluciones analíticas de las ecuaciones de evolución. Este tipo de soluciones tiene dos ventajas básicas: permite un cálculo más ágil y permite entender mucho mejor la influencia de los diferentes parámetros característicos en el comportamiento del amplificador, lo que puede ser un punto de partida para el desarrollo de técnicas de caracterización. Las soluciones analíticas que se podían encontrar en la literatura eran solamente aplicables para condiciones de trabajo de los amplificadores que no eran muy realistas, con lo cual su validez era muy limitada. El uso de nuestros factores de solapamiento nos permitió encontrar soluciones analíticas que eran válidas para cualquier condición de trabajo del amplificador. Esta generalidad de nuestras soluciones analíticas, nos permitió el desarrollo de nuevas técnicas de caracterización, con las que hemos podido obtener las secciones eficaces de absorción y emisión estimulada, con facilidad y buena precisión, a partir de la medida de ganancia y potencia de bombeo.

Posteriormente tratamos de encontrar técnicas de caracterización en las que interviniesen lo menos posible las medidas absolutas de potencia, sustituyéndolas por medidas relativas, que son más cómodas y pueden alcanzar mayor precisión. Siguiendo esta idea desarrollamos una técnica basada en medidas dinámicas de fluorescencia, cuando el bombeo se conmuta periódicamente. Encontramos que la información sobre los parámetros característicos de la fibra se podría obtener a partir de las curvas de relajación (en el

semiperiodo sin bombeo) de las distintas componentes espectrales de la fluorescencia amplificada y de la dinámica de la fluorescencia transversal a la fibra, en el semiperiodo con bombeo. Al ajustar los modelos que habíamos desarrollado, con los resultados experimentales, nos encontramos con una sorpresa inesperada: la técnica no solamente era capaz de encontrar valores para las secciones eficaces de emisión estimulada, sino que también permitía obtener la concentración de erbio en la fibra y su distribución en la sección transversal de la misma.

La experiencia del desarrollo de estas técnicas de caracterización y del uso posterior de los parámetros medidos en programas de simulación, nos ha enseñado que estos métodos permiten predecir los valores de la ganancia y la fluorescencia amplificada con unos pocos decibelios de error. Esta precisión es suficiente para poder conocer el comportamiento del amplificador cuando se modifican sus parámetros característicos y encontrar el tipo de mejoras que se pueden introducir para su optimización. No obstante, estas herramientas no son suficientes para llevar a cabo el diseño preciso de un amplificador concreto, que requiere de afinamientos experimentales posteriores.

Los buenos resultados obtenidos en el desarrollo de las técnicas de simulación y caracterización de fibras dopadas con baja concentración de erbio, nos animaron a dar un paso más y emprender el estudio de guías integradas dopadas con erbio (en concreto guías de acanaladas producidas sobre sustrato plano). La pequeña longitud que es preciso dar a estas guías, obliga a utilizar una concentración de erbio muy elevada, que complica considerablemente la fenomenología física de la amplificación, debido a fenómenos de interacción entre los iones de erbio, tales como upconversión o relajación cruzada. No obstante, existe en la actualidad un gran interés en estos dispositivos, por su posible aplicación en la compensación de las considerables pérdidas que se obtienen en los circuitos integrados pasivos y en la obtención de fuentes láser.

Una parte de nuestro trabajo ha consistido en poner en marcha métodos de simulación de ganancia y fluorescencia amplificada, para guías acanaladas sobre sustrato plano, con alta densidad de erbio, considerando la posible anisotropía del sustrato, así como los gradientes de índice y de concentración de erbio que, de forma natural, aparecen en el proceso de fabricación de la guía. Debido a estas particularidades, los métodos de simulación se vuelven tremendamente lentos al pasar de fibras a guías. Es por tanto muy importante disminuir en lo posible el tiempo de cálculo. Por ello, por una parte, pusimos a punto métodos suficientemente rápidos y precisos para el cálculo de las distribuciones modales en las guías. Por otra parte, adaptamos el método de factores de solapamiento, usado en fibras, introduciendo nuevos factores de solapamiento que diesen cuenta de los nuevos fenómenos físicos. Optimizando los métodos de cálculo de ganancia y fluorescencia amplificada, a partir de estos factores de solapamiento, conseguimos reducir el tiempo de cálculo (respecto a los métodos habituales) en un factor quinientos, con errores de algunas décimas de dB.

La otra parte del trabajo ha consistido en el desarrollo de técnicas de caracterización de las guías, que deben adaptarse a las peculiaridades de éstas. Frente al hábito, encontrado en la literatura, de obtener las secciones eficaces de absorción y emisión a partir de medidas llevadas a cabo en bloques hechos con el material del sustrato, nosotros hemos desarrollado técnicas basadas en medidas sobre las propias guías, que proporcionan los resultados con mayor precisión. En concreto se basan en medidas de los espectros de fluorescencia transversal a la guía. En cuanto a medida de otros parámetros, como coeficientes de upconversion, hemos puesto en práctica algunas ideas, cuyos primeros resultados son alentadores.

Aunque no he participado directamente en su desarrollo, no quisiera dejar de mencionar otra de las líneas de trabajo de nuestro grupo: el estudio teórico y experimental de láseres de fibra óptica dopada con erbio. En este caso el amplificador debe de introducirse en una cavidad resonante, que permita la obtención de luz láser. Teniendo en cuenta que la emisión que se obtiene corresponde a la tercera ventana de comunicaciones ópticas, es evidente la utilidad de estas fuentes láser. La primera tarea que se llevó a cabo consistió en desarrollar las técnicas de construcción de estos láseres, utilizando cavidades resonantes lineales. Inicialmente se probó con cavidades hechas con espejos de fibra óptica, que se obtienen soldando entre sí las salidas de un acoplador direccional con factor de acoplamiento del 50%. Los problemas encontrados con las inestabilidades en la polarización de la luz, obligaron a probar con otro tipo de cavidad, espejando un extremo de la fibra mediante aluminio o mediante una multicapa dieléctrica y colocando en el otro una red de Bragg, que a su vez permite seleccionar la longitud de onda de emisión. En los láseres desarrollados se ha medido la potencia umbral, la eficiencia y la longitud de onda de emisión, en función de la potencia de bombeo, las características pasivas de la cavidad y la longitud de la fibra dopada con erbio. Por otra parte se han desarrollado modelos teóricos, basados solamente en las potencias de las ondas existentes en la cavidad resonante, que proporcionan buena concordancia con los resultados medidos experimentalmente. El uso posterior de estos modelos permite la optimización de las fuentes láser.

Afortunadamente parece que todavía nos quedan muchas cosas por hacer. Estamos iniciando el estudio de algunas aplicaciones de los amplificadores de fibra, queremos aplicar las guías dopadas con erbio para la obtención de fuentes láser, queremos perfeccionar el conocimiento que se tiene sobre el funcionamiento de los láseres de fibra óptica dopada con erbio, para conseguir mejores prestaciones, y un largo etc. que espero sepamos llevar a cabo con ilusión y amistad, porque creo que estos son dos pilares fundamentales en la investigación científica.

Con esto doy por concluido mi discurso. Gracias por su atención.

10.-BIBLIOGRAFIA.

1. P. W. France, Ed., Optical Fibre Lasers & Amplifiers (Blackie, Glasgow, 1991).

2. Michel J. F. Digonnet, Ed., Rare Earth Doped Fiber Lasers and Amplifiers (Marcel Dekker, New York, 1993).
3. Shoichi Sudo, Ed., Optical Fiber Amplifiers (Artech House, Boston, 1997).
4. P. C. Becker, N. A. Olsson and J. R. Simpson, Erbium-Doped Fiber Amplifiers. Fundamentals and Technology (Academic Press, San Diego, 1999).
5. B. E. A. Saleh and M. C. Teich, Fundamentals of Photonics (John Wiley, New York, 1991).
6. John Gowar, Optical Communication Systems (Prentice Hall, New York, 1993).
7. Olivéiro D. D. Soares, Ed., Trends in Optical Fibre Metrology and Standards (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1995).
8. S. Desmond Smith, Optoelectronic Devices (Prentice Hall, London, 1995).
9. Govind P. Agrawal, Fiber-Optic Communication Systems (John Wiley, New York, 1997).