



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 356 393**

51 Int. Cl.:

H01S 3/30 (2006.01)

H04B 10/17 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **01901994 .2**

96 Fecha de presentación : **12.01.2001**

97 Número de publicación de la solicitud: **1250737**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **23.10.2002**

54 Título: **Amplificador Raman con bombeo direccional.**

30 Prioridad: **12.01.2000 US 175786 P**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
07.04.2011

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
07.04.2011

73 Titular/es: **XTERA COMMUNICATIONS, Inc.**
500 West Bethany Drive
Allen, Texas 75013-0030, US

72 Inventor/es: **Freeman, Michael y**
Islam, Mohammed, N.

74 Agente: **Urizar Anasagasti, José Antonio**

ES 2 356 393 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Amplificador Raman con bombeo direccional.

5 **Campo de la invención**

Esta invención se refiere a amplificadores ópticos de bajo ruido para sistemas de transmisión de fibra óptica, y más en particular a amplificadores Raman discretos, distribuidos e híbridos de bajo nivel de ruido para sistemas de comunicación de banda ancha.

10 **Descripción de la técnica relacionada**

La dispersión estimulada de Raman es un proceso no lineal importante que convierte fibras ópticas en amplificadores y láseres sintonizables. La ganancia de Raman resulta de la interacción de luz intensa con fonones ópticos en fibras de sílice, y el efecto Raman lleva a una transferencia de energía de un haz óptico (la bomba) a otro haz óptico (la señal). La señal es reducida en frecuencia (o ampliada en longitud de onda) en una cantidad determinada por modos vibracionales de fibras de sílice. El coeficiente de ganancia Raman g_r para las fibras de sílice es mostrado en la figura 1. Notablemente, la ganancia Raman g_r se extiende sobre un gran rango de frecuencia (hasta 40 THZ) con un pico ancho centrado en 13.2 THZ (correspondiente a una longitud de onda de 440 cm^{-1}). Este comportamiento sobre el gran rango de frecuencia es debido a la naturaleza amorfa del cristal de sílice y habilita el efecto Raman para ser usado en amplificadores de banda ancha. La ganancia Raman también depende de la composición del núcleo de la fibra y puede variar con diferentes concentraciones dopantes.

La amplificación Raman tiene algunas características atractivas. En primer lugar, la ganancia Raman es un buen candidato para el mejoramiento de enlaces de fibra óptica existentes porque se basa en la interacción de la luz de la bomba con fonones ópticos en las fibras existentes. En segundo lugar, no hay pérdida excesiva en ausencia de energía de bombeo, aparte de la pérdida de la fibra insertada - una consideración importante para la fiabilidad del sistema.

La cascada es el mecanismo por el que es transferida la energía óptica en la longitud de onda de bombeo, a través de una serie de polarizaciones no lineales, a una señal óptica en una longitud de onda más larga. Cada polarización no lineal del dieléctrico produce un estado vibracional molecular correspondiente a una longitud de onda que es desplazado de la longitud de onda de la luz que produjo la estimulación. El efecto de la polarización no lineal es distribuido a través del dieléctrico, resultando en una serie en cascada de cambios de longitud de onda a medida que la energía en una longitud de onda excita un modo vibracional que produce luz a una longitud de onda más larga. Este proceso puede efectuar cascada a través de numerosas categorías. Como ejemplo, categorías de cascada Raman para diferentes longitudes de onda de la bomba son ilustradas en la figura 2. Debido a que el perfil de la ganancia Raman tiene un pico centrado a 13.2 THZ en fibras de sílice, puede disponerse una categoría Raman para ser separada de la categoría anterior en 13.2 THZ.

El efecto cascada hace a los amplificadores de dispersión estimulada de Raman muy deseables. La propia amplificación de Raman puede ser usada para amplificar múltiples longitudes de ondas (como en la multiplexación por división de longitud de onda) o pulsos ópticos cortos debido a que el espectro de ganancia es muy ancho (un ancho de banda de más de 5 THZ alrededor del pico en 13.2 THZ). Además, la cascada habilita la amplificación Raman en un rango amplio de diferentes longitudes de onda. Variando la longitud de onda de bombeo o usando categorías en cascada de ganancia Raman, la ganancia puede ser proporcionada en toda la ventana de telecomunicaciones entre 1300 nm y 1600 nm.

La ganancia Raman puede ser usada en amplificadores discretos y distribuidos. Las principales ventajas de la amplificación distribuida Raman son que la cifra de ruido (CR) efectiva se mejora y pueden ser mejorados sistemas existentes, intuitivamente, la CR mejora porque la señal es amplificada continuamente y nunca se vuelve demasiado débil. El margen adicional del sistema permitido por amplificación distribuida puede ser usado para mejorar la velocidad del sistema, incrementar el espacio entre amplificadores o repetidores, o para manejar la variabilidad en las fibras de los sistemas instalados. Cuando se usa una amplificación distribuida, la luz de la bomba puede estar contra-propagando a la dirección de señal. Simulaciones y experimentos han mostrado la mejora en la cifra de ruido logrado usando amplificación distribuida. Por ejemplo, un cálculo de los primeros principios para un cadena de amplificadores ópticos muestra la mejora del porcentaje señal-a-ruido (PSR) para amplificadores muy juntos entre sí. El caso de la amplificación puramente uniforme da una mejoría de unos $CR = 2 \text{ dB}$ comparado con amplificadores separados uniformemente cada 21.7 km y una mejoría de unos $CR = 4 \text{ dB}$ comparado con amplificadores separados uniformemente cada 43.4 km (donde $CR \text{ (dB)} = PSR_{\text{ENTRADA}} \text{ (dB)} - PSR_{\text{SALIDA}} \text{ (dB)}$).

Experimentos han verificado también la mejora en el rendimiento de CR para la amplificación distribuida. Por ejemplo, experimentos en una cadena de amplificación Raman de 514 km han mostrado una mejora en rendimiento de ruido de 2 dB comparado con un amplificador de cadena similar usando EDFA globalizado separado aproximadamente cada 45 km. Esto es menos que el caso ideal porque la luz de bombeo se atenúa a lo largo de la longitud de la fibra, llevando a una amplificación periódica pero no uniforme. En adición, una combinación de amplificación Raman y EDFAs distribuidas ha sido usada para ampliar el espacio entre repetidores a 240 km por un sistema MDL de 8 canales de 5280 km. El rendimiento demostrado en este experimento fue comparable al de un sistema similar en longitud y capacidad usando EDFA convencionales separados 80 km. Por tanto, el margen adicional de CR de la

ES 2 356 393 T3

amplificación distribuida puede ser usado para incrementar significativamente el espaciado de repetidores de sistemas de transmisión de largo recorrido. Además, un amplificador Raman distribuido es probado en una longitud de fibra de transmisión de 45 km que es bombeado por dos bombas a 1453 nm y 1495 nm. La banda ancha resultante de ganancia de transparencia es 92 nm, y se observa que el amplificador Raman funciona mejor que un EDFA globalizado con una CR igual o mayor que 5 dB.

Otro uso de amplificadores híbridos o distribuidos es para reducir deficiencias por falta de linealidad de la mezcla de cuatro ondas (M4O) y la corrección de ganancia Raman que se vuelven cada vez mas importantes cuando se añaden nuevas bandas y el número de canales se incrementa. Una manera de minimizar estas deficiencias por falta de linealidad es reducir la potencia por canal de longitud de onda. Esto puede conseguirse sin degradación del porcentaje señal a ruido en el receptor usando amplificación Raman híbrida o distribuida. En particular, la amplificación Raman distribuida se puede lograr bombeando la fibra que compone la línea de transmisión con un oscilador Raman o un diodo de láser directamente. La luz de la bomba produce ganancia Raman para la señal usando la ganancia Raman inherente en la fibra de transmisión. Dado que la ganancia es inherente a la línea de transmisión, esta provee medios elegantes de mejora incluso de sistemas de fibra óptica existentes.

La potencia por canal puede ser reducida porque la amplificación Raman distribuida cancela o compensa la pérdida en la fibra. Dicho de otro modo, la ganancia Raman distribuida tiene una cifra de ruido más eficaz que su amplificador discreto equivalente. La potencia del canal se puede bajar al punto que las no linealidades se vuelvan insignificantes. Por ejemplo, en un sistema de transmisión normal a una potencia de 0 dBm (1 mW) es usado a OC-48 o 2.5 Gb/s y 6 dBm (4 mW) a OC-192 o 10 Gb/s por canal. Con la adición de la amplificación distribuida, sistemas OC-192 han sido demostrados en el laboratorio con potencia por canal tan baja como -13 dBm (0.05 mW).

La amplificación Raman distribuida puede también ayudar en control de ganancia o fijación de nivel de ganancia, i.e., no es deseable tener el nivel de ganancia cambiada cuando los canales son añadidos o dejados, por ejemplo cuando son utilizados multiplexores ópticos añadir/dejar. Este problema de fijación de nivel de ganancia puede ser resuelto en gran medida mediante el uso de amplificación Raman distribuida debido a que la potencia por canal es reducida significativamente. La potencia mas baja asegura que va a haber ganancia insignificante o agotamiento de la bomba. Por tanto, la combinación de menor potencia por canal y el agotamiento de ganancia insignificante proporcionan una fijación de nivel de ganancia eficaz.

Estos efectos no lineales en los sistemas de transmisión de fibra se puede evitar usando amplificación Raman híbrida o distribuida se han ilustrado en un número de experimentos recientes. La transmisión en DFS alrededor de la región de dispersión cero en una sola banda de longitud de onda ha sido demostrada. La transmisión MDL densa (MDLD) de 32 canales con 50 GHz de espaciamiento y velocidad de bits de 10 Gb/s sobre 8 x 80 km ha sido demostrada. Normalmente, sistemas MDLD en la cercanía de la longitud de onda de dispersión cero sufre de penalizaciones M4O. Sin embargo, disminuyendo la potencia del canal a -13 dBm con el uso de la amplificación Raman distribuida puede evitarse, M4O y los resultados verifican la factibilidad de la transmisión MDLD en DSF.

La transmisión MDLD cerca de la longitud de onda de dispersión cero sin M4O u otras penalizaciones no lineales en una sola banda de longitud de onda ha sido demostrado en múltiples experimentos: (a) 25 canales, espaciado 100 GHz de canales 10 Gb/s, transmisión de mas de 8 x 83 km; (b) 49 canales, espaciado 50 GHz de canales 10 Gb/s, transmisión de mas de 4 x 83 km. Mejoras significativas pueden obtenerse a una potencia de bomba de solo 440 mW en DSF usando amplificadores Raman híbridos/de fibra dopada con erbio.

La amplificación Raman distribuida puede minimizar los efectos no lineales entre canales MDL eficazmente en experimentos de una sola banda (i.e., en la llamada "banda-C" o banda convencional entre 1535 y 1565 nm).

Uno de los beneficios de ARD, tales como la reducción de los efectos no lineales entre los canales de señal MDL, puede incrementar la eficiencia de la utilización de ancho de banda en sistemas MDL de algunas realizaciones. Desde 1996, cuando los sistemas MDL fueron introducidos comercialmente, el número de canales de longitud de onda ha crecido de forma importante (figura 27). Por ejemplo, los sistemas conocidos en 1999 tienen mas de 100 canales de longitud de onda. Dado este rápido incremento en el número de canales, la pregunta es cómo alcanzar el aumento de la próxima década en número de canales - o, sistemas ultra-denso-MDL (U-DMDL). ¿Cuáles son las tecnologías claves que permiten sistemas de 1000 o mas canales de longitud de onda?.

Hay limitaciones fundamentales para alcanzar sistemas de 1000+ de longitud de onda. En primer lugar, como la densidad de los canales aumenta, las interacciones no lineales entre canales - como de mezcla de cuatro ondas y la corrección de ganancia Raman - pueden limitar el rendimiento del sistema. El segundo problema de los sistemas U-DMDL es la complejidad del transmisor. Por ejemplo, si son usados LD de temperatura y frecuencia estabilizadas como la fuente de luz, luego a medida que la densidad de canales aumenta, puede llegar a ser cada vez mas difícil reducir la separación entre canales. Además, a medida que el número de canales aumenta, la huella o el tamaño físico del transmisor se vuelve cada vez mas grande. Un tercer reto de los sistemas U-DMDL es la tecnología de filtrado. Los filtros con alto contraste y separación estrecha entre canales son requeridos para colocar muchos canales en proximidad estrecha entre ellos.

Una ilustración de los límites fundamentales de no linealidad de la fibra pueden ser toreados de un punto de vista de los sistemas. Los parámetros usados en un estudio son: enlace de fibra de 30 km, longitud de onda de 1550 nm, pérdida

de 0.2 dB/km, $A_{\text{eff}} = 50 \mu\text{m}^2$, separación entre canales de 10 GHz, para la dispersión cromática de la fibra estándar de 16 ps/nm-km o para la dispersión cromática de la fibra DS de 1 ps/nm-km. La figura 28a muestra la eficiencia de la mezcla de cuatro ondas como una función de separación entre canales en 1550 nm. La curva continua representa una fibra estándar, mientras que la curva discontinua representa la fibra DS. La eficacia de la mezcla de cuatro ondas puede ser mucho más elevada en la fibra DS porque la etapa de coincidencia puede ser más fácilmente alcanzada en fibra de baja dispersión. La figura 28(b) muestra la máxima potencia por canal en relación con el número de canales que asegura la dispersión de Raman estimulada, modulación de etapa inducida por portador, dispersión de Brillouin estimulada, y las degradaciones de la mezcla de cuatro fotones están por debajo de 1 dB para todos los canales. Para la fibra estándar o DS, la separación entre canales de la categoría de 10 GHz puede ser problemática. Para un número de canales acercándose a 1000, la corrección de ganancia Raman puede ser la primera no linealidad en afectar el sistema, y la potencia por canal puede acercarse -0.01 mW/canal (-20 dBm) para evitar no linealidades.

Amplificadores híbridos usando ARDs pueden servir como un facilitador para sistemas de 1000+ de longitud de onda. Un beneficio de los ARD puede ser mejor CR, el cual puede ser usado para bajar las amplitudes de señal de modo que la interacción no lineal entre canales pueda ser reducida. Los efectos no lineales pueden evitarse usando ARDs. A pesar de la operación cerca de la longitud de onda de dispersión cero, pueden ser evitadas penalizaciones de la mezcla de cuatro ondas en sistemas de 25-50 canales. La mejora de PSR óptico usando ARDs puede ser 6.6 dB en la fibra DS y 7 dB en la fibra estándar. La potencia de entrada de canal puede ser reducida en estos muchos decibelios y mantener todavía el sistema PSR.

Los amplificadores híbridos pueden mejorar el sistema con NF mejorados. Esta mejora de NF puede ser usada como un margen adicional de sistema para ampliar el espaciado entre amplificadores, potencias más bajas de la señal para evitar la no linealidad de la fibra o incrementar la velocidad de bits del sistema. Sin embargo, estos experimentos se centran en utilizar ARDs sólo en la llamada banda C (entre 1530-1565 nm), donde el amplificador discreto es un EDFA. También, los experimentos están hechos de fibra DS, donde la longitud de onda de dispersión cero coincide con unos 1550 nm. Un problema con la implementación de ARDs en este rango de longitud de onda es que evitará una mayor expansión de nuevas ventanas de baja pérdida más adelante.

Hay una necesidad para amplificadores Raman de bajo ruido y sistemas de transmisión de banda ancha. Hay una necesidad adicional por amplificadores distribuidos, discretos e híbridos con cifras mejoradas de ruido. Otra necesidad existe por amplificadores ópticos adecuados para longitudes de onda de 1480 nm o menos donde se incrementa la pérdida de la fibra.

Ejemplos de esfuerzos previos usando amplificación Raman incluyen lo siguiente:

Nissov, M., et al., "Rayleigh Crosstalk in Long Cascades of Distributed Unsaturated Raman Amplifiers", *Electronics Letters*, Jun. 10, 1999, vol. 35, No. 12, pp. 997-998;

Patent Abstracts of Japan, vol. 1997, No. 11, Nov. 28, 1997 & JP 09 197452 A (NEC Corp.), Jul. 31, 1997, abstracto;

Masuda, H. et al., "Wide-Band and Gain Flattened Hybrid Fiber Amplifier Consisting of an EDFA and a Multi wavelength Pumped Raman Amplifier", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 11, No. 6, Jun. 1999, pp. 647-649;

Kawai, S. et al., "Wide-Bandwidth and Long-Distance MDL Transmission Using Highly Gain-Flattened Hybrid Amplifier", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 11, No. 7, Jul. 1999, pp. 886-888;

K. Rottwitt, et al., "Transparent 80 km Bi-Directionally Pumped Distributed Raman Amplifier with Second Order Pumping", XP-001035420, *ECOC 99*, 26-30, Nice, France, 2 páginas;

Chang-Hee Lee, et al., "Bidirectional transmission of 40 Gbit/s WDM signal over 100 km dispersion shifted fibra", *Electronics Letters*, Vol. 34, No. 3, pp. 294-295.

Masuda, H. et al., "Ultra Wide-Band Raman Amplification with a Total Gain Bandwidth of 132 nm of Two Gain-Bands Around 1.5 Pm", XP-001035421, *ECOC '99*, Nice, France, 26-30 September 1999, pp. II-146 - II-147.

Resumen de la invención

Un objeto de la presente invención es de proveer un amplificador Raman con una mejorada cifra de ruido.

Otro objeto de la presente invención es proveer un amplificador Raman con bombeo bidireccional y una mejorada cifra de ruido.

Todavía otro objeto de la presente invención es proveer un amplificador Raman con bombeo bidireccional y una mejorada cifra de ruido, donde el bombeo bidireccional es logrado usando una bomba para amplificar la señal en un modo contra-propagante.

ES 2 356 393 T3

Un objeto adicional de la presente invención es proveer un amplificador Raman que es bombeado bi-direccionalmente e incluye al menos una primera y segunda bomba así como al menos una bomba adicional que se co propaga con la señal para amplificar la primera bomba.

5 Todavía un objeto adicional de la presente invención es proveer un amplificador Raman con múltiples categorías de bombas de Raman que son bidireccionales, incluye al menos una primera y segunda bomba y al menos una bomba adicional que se co propaga con la señal para amplificar la primera bomba.

Otro objeto de la presente invención es proveer un amplificador Raman bombeado bidireccionalmente con módulos de bomba que pueden ser osciladores Raman de longitud de onda múltiple, osciladores Raman de longitud de onda simple, bombas de diodo de láser y combinaciones de los mismos.

Todavía otro objeto de la presente invención es proveer un amplificador Raman distribuido de bajo ruido con bombeo bidireccional.

15 Aun otro objeto de la presente invención es proveer un amplificador Raman discreto de bajo ruido con bombeo bidireccional.

Otro objeto de la presente invención es proveer un amplificador Raman híbrido de bajo ruido con bombeo bidireccional.

Estos y otros objetos de la presente invención son logrados en un conjunto de amplificador Raman según la reivindicación 1. Un amplificador Raman es configurado para recibir una señal de la fuente de señales. La señal viaja en una dirección ascendente en el amplificador Raman. La primera fuente de bomba se acopla al amplificador Raman. La primera fuente de bomba produce un primer haz de bomba que viaja en dirección descendente y es contra-propagante respecto a la señal. Una segunda fuente de bomba se acopla al amplificador Raman y produce un segundo haz de bomba que viaja en dirección ascendente. La segunda fuente de bomba puede tener un ruido de intensidad relativa promedio menor que -80 dB/Hz.

Según la presente invención, un aparato amplificador Raman de varias etapas incluye un amplificador Raman configurado para recibir una señal de una fuente de señal. La señal viaja en una dirección ascendente en el amplificador Raman. Una primera fuente de bombeo es acoplada al primer amplificador Raman. La primera fuente de bombeo produce un primer haz de bombeo en una dirección descendente que es contra-propagante respecto a la señal. Una segunda fuente de bomba es acoplada al primer amplificador Raman. La segunda fuente de bombeo produce un segundo haz de bombeo que viaja en la dirección ascendente. Una tercera fuente de bomba es acoplada a un segundo amplificador Raman. La tercera fuente de bombeo produce un tercer haz de bombeo que viaja en la dirección descendente.

La presente invención también se refiere a un método de amplificación de una señal óptica según la reivindicación 15.

Realizaciones de la presente invención están establecidas en las reivindicaciones dependientes.

Breve descripción de los dibujos

45 Fig. 1 es un gráfico del coeficiente de ganancia Raman en una fibra de silice fundida.

Fig. 2 es un listado de longitudes de onda para Raman en cascada para varias longitudes de onda de bomba.

Fig. 3(a) es un diagrama esquemático de una realización de un amplificador Raman bombeado direccionalmente de la presente invención con dos bombas.

Fig. 3(b) es un gráfico ilustrando un perfil de bombeo como una función de la longitud de la fibra con un solo bombeo, como de la figura 3(a).

55 Fig. 3(c) es un gráfico ilustrando el perfil de bombeo, tal como para el amplificador Raman de la figura 3(a), con dos bombeos que son contra-propagantes.

Fig. 3(d) es un diagrama esquemático de una realización de un amplificador Raman con múltiples categorías de Raman.

60 Fig. 4 es una esquemática de una realización con la señal de longitud de onda en la proximidad de 1550 nm y una distancia de longitud de fibra de transmisión de 40 a 45 km entre amplificadores.

Fig. 5 es un gráfico ilustrando la pérdida contra la longitud de onda para diferentes tipos de fibras ópticas útiles en algunas realizaciones.

65 Fig. 6 es una tabla de parámetros de cálculo para ilustrar la mejora en cifra de ruido de algunas realizaciones.

ES 2 356 393 T3

Fig. 7 es un gráfico ilustrando la cifra de ruido óptico contra el espaciado entre amplificadores ópticos para bombeo hacia adelante, hacia atrás y bidireccional de algunas realizaciones de amplificadores Raman.

Fig. 8 es una tabla de los datos de la figura 7.

Fig. 9(a) es un diagrama esquemático de una realización de una línea de transmisión que es periódica y tiene al menos dos módulos de bombeo por periodo.

Fig. 9(b)-9(d) ilustran realizaciones de diferentes módulos de bombeo, los cuales pueden opcionalmente ser usados con la línea de transmisión de la figura 9(a).

Fig. 9(e) es un diagrama esquemático de una realización de una línea de transmisión con un amplificador híbrido con bombeo que va a través de un amplificador discreto.

Fig. 10 es un diagrama esquemático de una realización de un oscilador Raman de longitud de onda dual de la presente invención bombeado a 1100 nm.

Fig. 11 es un diagrama esquemático ilustrando una realización de un bombeo de diodo de láser de un amplificador Raman distribuido de banda S.

Fig. 12(a) es un diagrama esquemático de una realización ilustrando un esquema de bombeo de un amplificador híbrido con una señal de cerca de 1550 nm.

Fig. 12(b) es un diagrama esquemático de una realización ilustrando bombeo de un amplificador híbrido a través de un amplificador discreto con una señal de cerca de 1550 nm.

Fig. 13 es un diagrama esquemático de una realización con ampliación del espectro de longitud de onda de bombeo usado en un amplificador híbrido.

Fig. 14 es un diagrama esquemático ilustrando una realización con un amplificador Raman discreto de una sola etapa de bajo ruido.

Fig. 15(a) es un diagrama esquemático de una realización de un amplificador Raman de dos etapas con rendimiento de ruido mejorado en la primera etapa.

Fig. 15(b) es un diagrama esquemático de una realización de un amplificador Raman de dos etapas con rendimiento de ruido mejorados en la primera y segunda etapa.

Fig. 16(a) es un diagrama esquemático de una realización con amplificador Raman de doble etapa con una derivación y un rendimiento de ruido mejorado en la primera etapa.

Fig. 16(b) es un diagrama esquemático de una realización con un amplificador Raman de doble etapa con una derivación y un rendimiento de ruido mejorado en la primera y segunda etapa.

Fig. 17 es un gráfico de ganancia contra longitud de onda para una realización de un amplificador Raman de banda ancha sin pre-énfasis de bombeo.

Fig. 18 es un gráfico de potencia de bombeo contra longitud de la fibra para una realización de un amplificador Raman de banda ancha sin pre-énfasis de bombeo.

Fig. 19 es un gráfico de ganancia contra longitud de onda para un amplificador Raman de banda ancha con pre-énfasis de bombeo.

Fig. 20 es un gráfico de energía de bombeo contra la longitud de la fibra para un amplificador Raman de banda ancha con pre-énfasis de bombeo.

Fig. 21(a) es un diagrama esquemático de una realización con cinco bombeos de diodo de láser bombeando con pre-énfasis de bombeo en amplificadores Raman.

Fig. 21(b) es un diagrama esquemático de una realización con múltiples diodos de láser bombeando con mayor potencia para longitudes de onda más cortas para pre-énfasis de bombeo en amplificadores Raman.

Fig. 22(a) es un diagrama esquemático de una realización con múltiples diodos de láser y osciladores Raman bombeando con mayor potencia para longitudes de onda más cortas para pre-énfasis de bombeo en amplificadores Raman.

Fig. 22(b) es un diagrama esquemático de una realización con múltiples diodos de láser bombeando en combinación con osciladores Raman de doble longitud de onda con mayor potencia para longitudes de onda más cortas para pre-énfasis de bombeo en amplificadores Raman.

ES 2 356 393 T3

Fig. 23 es un gráfico de ganancia contra longitud de onda para un amplificador Raman discreto de una realización con pre-énfasis de bombeo.

Fig. 24 es un diagrama esquemático de una realización de un amplificador de etapa doble.

Fig. 25 es un gráfico de ganancia contra longitud de onda para un amplificador de banda S de doble etapa, tal como para la realización de la figura 24.

Fig. 26 es un gráfico de la cifra de ruido contra la longitud de onda para un amplificador de banda S de doble etapa, tal como para la realización de la figura 24.

Fig. 27 es un gráfico histórico ilustrando el incremento en el número de longitudes de onda respecto al año.

Fig. 28(a) es un gráfico de la eficiencia de penalización de mezcla de cuatro ondas contra la separación de canal.

Fig. 28(b) es un gráfico de la potencia máxima por canal contra el número de canales limitados por diferentes efectos no lineales de fibras.

Fig. 29 es un diagrama esquemático de una realización ilustrando la eliminación de canales para reducir penalización de mezclas de cuatro ondas.

Fig. 30 es un diagrama esquemático de una realización de un sistema MDL denso con 10 GHz de espaciamiento de canal.

Fig. 31 es un gráfico de pérdida contra longitudes de onda comparando el rango de longitudes de onda sobre las cuales los amplificadores híbridos y discretos pueden ser operados.

Fig. 32(a) es un diagrama esquemático de una realización de un modulo de un amplificador multi banda usando un solo MDL para dividir o combinar las bandas y amplificación Raman distribuida en la banda S+.

Fig. 32(b) es un diagrama esquemático de una realización del modulo de un amplificador multi banda usando múltiples MDL para dividir o combinar las bandas y la amplificación Raman distribuida en la banda S+.

Fig. 33(a) es un diagrama esquemático de una realización del modulo de un amplificador multi banda usando un solo MDL para dividir o combinar las bandas y amplificación híbrida en la banda S+.

Fig. 33(b) es un diagrama esquemático de una realización del modulo de un amplificador multi banda de la presente invención usando múltiples MDLs para dividir o combinar las bandas y la amplificación híbrida en la banda S+.

Fig. 34(a) es un gráfico de ganancia contra longitud para un amplificador.

Fig. 34(b) es otro gráfico de ganancia contra longitud para un amplificador.

Fig. 35 es un diagrama esquemático de una realización de un amplificador Raman.

Fig. 36 es un diagrama esquemático de una realización de un ARD.

Fig. 37 y 38 son gráficos de la cifra de ruido óptico, tales como para las realizaciones de la figura 36.

Fig. 39 es un diagrama esquemático de una realización de un ARD tri-banda.

Fig. 40 es un gráfico de intervalo de ganancia Raman (dB) contra la longitud de onda (nm).

Fig. 41 es un gráfico de ganancia o perdida total (dB) contra la longitud de onda (nm).

Fig. 42 es un gráfico de CR efectiva (dB) contra la longitud de onda (nm).

Fig. 43 es un gráfico de pérdida y CR ARD (dB) contra la longitud de onda (nm).

Fig. 44 es un diagrama de bloques de varias realizaciones de ARDs.

Fig. 45 es otro diagrama de bloques de varias realizaciones de ARDs.

Fig. 46 es un diagrama de bloques de varias realizaciones de configuraciones de bombeo.

Fig. 47 es un diagrama de bloques de varias realizaciones de amplificadores discretos.

Fig. 48 es un diagrama de bloques de varias realizaciones de ARDs de banda ancha.

Fig. 49 es un diagrama de bloques de varias realizaciones de amplificadores Raman.

Fig. 50 es un diagrama de bloques de varias realizaciones de sistemas U-DMDL.

5 Fig. 51 es un diagrama de bloques de varias realizaciones de usos de amplificadores.

Fig. 52 es otro diagrama de bloques de varias realizaciones de usos de amplificadores.

Descripción detallada

10

Las características de ruido para amplificadores Raman distribuidos (ARDs) pueden ser mejoradas usando un esquema de bombeo de múltiple categoría Raman. La longitud de onda de señal puede ser bombeada por una categoría Raman (i.e., categoría Raman n o categoría Raman de bombeo n). La categoría Raman de bombeo puede ser amplificada por una categoría Raman previa (i.e., categoría Raman n-1 o categoría Raman intermedia n-1). El esquema de bombeo de ARD de bajo ruido puede ser dispuesto de modo que la categoría Raman n es contrapropagante para la señal, mientras la categoría Raman n-1 es copropagante con la señal. En esta configuración, las fluctuaciones de bombeo desde la categoría Raman n no se acoplan a la señal. La categoría Raman n puede ser amplificada más cerca de la entrada de un período de la longitud del amplificador por la categoría Raman n-1, mejorando de este modo la cifra de ruido del amplificador. Mas generalmente, la categoría Raman de bombeo puede ser dispuesta para ser contrapropagante a la dirección de la señal, y categorías alternas Raman anteriores pueden ser dispuestas para ser contrapropagantes a cada una de las categorías Raman subsecuentes (i.e., categorías Raman consecutivas alternan en dirección). Este esquema de bombeo alternante puede dar un perfil mas uniforme para la ganancia. Esto logra un número de ventajas, incluyendo uno o mas cebados del bombeo cerca del inicio de cada periodo del segmento de amplificación para mejorar la CR para el ARD, y logrando un perfil de aplicación mas uniforme el cual puede ser importante para los sistemas de alta velocidad de bits y los sistemas basado en solitones. Debido a que la categoría Raman de bombeo puede ser contrapropagante a la señal, el acoplamiento de ruido entre bombeo y señal puede ser minimizado. Adicionalmente, amplificar, el bombeo puede ser una manera de acumular mas potencia de bombeo en la fibra. Esto puede ser particularmente importante cuando se usan bombeos débiles tales como los diodos de láser, donde las potencias de diferentes diodos de láser pueden ser combinadas.

30

En un ejemplo de sistema, los bombeos Raman pueden ser colocados a espaciados de amplificadores de 40-45 km, correspondiendo a un ejemplo de separación de casillas en un sistema de telecomunicación. El esquema de amplificación o bien puede ser un ARD puro o un esquema híbrido comprendiendo un amplificador discreto y distribuido. La luz de bombeo de categoría Raman puede propagarse ascendente hacia la fuente de señal, mientras que la categoría Raman intermedia se puede propagar descendente en la dirección de la señal. Por ejemplo, el amplificador híbrido puede ser un amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA) que opera alrededor de 1550 nm combinado con un ARD. Una categoría Raman de bombeo (categoría n) puede ser introducida, contrapropagando alrededor de una longitud de onda de 1450 nm, mientras la categoría Raman intermedia (categoría n-1) puede ser insertada, co-propagando alrededor de una longitud de onda de 1365 nm.

40

El ARD de bajo ruido o el amplificador híbrido puede ser bombeado ya sea por bombeos separados o por osciladores Raman de doble longitud de onda. El oscilador Raman de doble longitud de onda puede ser un filtro de transmisión periódica, con acopladores de salida usados a lo largo de dos brazos de la cavidad en las categorías Raman n y n-1. Alternativamente, los bombeos de categorías Raman n y n-1 pueden ser diodos de láser en las longitudes de onda Raman apropiadas, donde categorías subsecuentes son separadas por aproximadamente 13.2 THZ. Esto provee una manera conveniente de combinar y acumular suficiente potencia de diodo láser de un número de diodos de láser. El bombeo de categoría n puede ser combinado con el bombeo para el amplificador discreto en un esquema de amplificador híbrido. Por ejemplo, un bombeo entre 1450-1480 nm puede ser usado para bombear tanto un EDFA como el ARD en la categoría n.

50

Categorías Raman múltiples para mejorar la CR del amplificador y distribución de ganancia pueden ser también usadas en amplificadores Raman discretos. En el amplificador discreto, una fibra de ganancia puede ser insertada en la línea de transmisión en lugar de usar la fibra de transmisión como un medio de ganancia. El mejoramiento de la CR surge del cebado del bombeo en el punto de entrada del amplificador. Una geometría contrapropagante puede minimizar el acoplamiento de de fluctuaciones bombeo-a-signal. Finalmente, en algunas realizaciones láseres de bombeo a la vez en categoría Raman de bombeo así como la categoría Raman intermedia pueden combinar más potencia de diodos láser.

55

Más allá de la cifra de ruido, otras posibles áreas de mejora para ARDs incluyen tratar un ancho de banda limitado (ej., unos 20-25 nm) y requerimientos de alta potencia de bombeo. Una realización logra un ARD relativamente plano y de banda ancha con una técnica de pre-énfasis de bombeo combinado con la evolución espacial y espectral del perfil de ganancia Raman bajo la longitud de la fibra de transmisión. La interacción no lineal entre los bombeos puede ser aplicada tanto a amplificadores Raman discretos como a los ARDs. Una realización mejora la eficiencia de los amplificadores Raman incrementando la no linealidad efectiva de la fibra usada como medio de ganancia. Una realización incrementa la no linealidad efectiva sin incrementar significativamente la pérdida o dispersión en la fibra, y manteniendo la longitud de onda tope de la fibra mas corta que las longitudes de onda de bombeo.

65

ES 2 356 393 T3

Finalmente, algunas realizaciones de ARDs son sistemas habilitados para el uso de ARDs. En un sistema de ejemplo, los beneficios de ARD - tales como la reducción de efectos no lineales entre canales de señal MDL - pueden incrementar la eficiencia de utilización del ancho de banda en sistemas MDL. Por ejemplo, usando ARDs de bajo ruido, el espaciado del canal puede ser reducido en algunas realizaciones a 10 GHz, habilitando así cientos de canales de longitud de onda en sistemas MDL. En una realización, una fuente para tal sistema MDL denso puede ser una fuente de generación continua en la cual los modos longitudinales sirven como canales de longitudes de onda diferentes. En otra realización, los ARDs pueden permitir la expansión de ancho de banda en la banda S+ y longitudes de onda mas cortas (i.e., longitudes de onda mas cortas que 1480 nm), donde la pérdida en la fibra puede incrementarse mas allá de 0.03 dB/km por encima del mínimo de pérdida de fibra de alrededor de 1550 nm.

En algunas realizaciones, usando bombeos de categoría Raman múltiple de un ARD, algunas de las limitaciones de esquemas actuales de ARD pueden ser minimizadas. Algunos esquemas de ARD actuales pueden ser restringidos a un esquema de bombeo contrapropagante, el cual lleva a una CR reducida y longitud de fibra limitada sobre la cual el ARD es eficaz. Ambas limitaciones pueden surgir de la atenuación del bombeo cuando se propaga por la fibra. Por tanto, si existe una manera de debar el bombeo por la línea de transmisión, las restricciones de CR y longitud pueden ser minimizadas. Una realización es un amplificar Raman con una cifra de ruido mejorada. Otra realización hace al perfil de bombeo una función de longitud mas uniforme con bombeo bidireccional. El bombeo co-propagado puede acoplar fluctuaciones a la señal, degradando la CR. Otra realización es un amplificador Raman con bombeos bidireccionales que tiene una cifra de ruido mejorada. Así, el bombeo bidireccional puede ser usado con un bombeo de muy bajo ruido. Otra realización impulsa el bombeo bajo la línea de transmisión con la categoría Raman anterior para amplificar la categoría Raman de bombeo.

En otra realización, un amplificador Raman con bombeos bidireccionales tiene una cifra de ruido mejorada. El bombeo bidireccional puede ser logrado con un bombeo para amplificar la señal en modo contrapropagante. Otra realización es un amplificador Raman bidireccional con al menos un primer y segundo bombeo tanto como al menos un bombeo adicional que se co propaga con la señal para amplificar el primer bombeo. La longitud de onda de señal puede ser emitida por una categoría Raman (i.e., categoría Raman n o categoría Raman de bombeo). La categoría Raman de bombeo puede ser amplificada por la categoría Raman previa (i.e., categoría Raman n-1 o categoría Raman intermedia).

El esquema de bombeo del ARD de bajo ruido puede ser dispuesto de modo que la categoría Raman n^{th} es contrapropagante a la señal, mientras la categoría Raman n-1 es copropagante con la señal (figura 3a). En esta configuración, el bombeo de fluctuaciones de la categoría Raman n^{th} no se acoplan a la señal. También, la categoría Raman n^{th} puede ser amplificada cerca de la entrada de un período de la longitud del amplificador por la categoría Raman n-1, de este modo mejorando la cifra de ruido del amplificador (figs. 3b,c). Una realización es un amplificador Raman bidireccional con categorías múltiples de bombeos de Raman y incluye al menos un primer y segundo bombeo y al menos una bombeo adicional que se propaga con la señal para amplificar el primer bombeo.

La categoría Raman de bombeo puede ser dispuesta para ser contrapropagante hacia la dirección de la señal, y pueden disponerse categorías Raman alternas previas para ser contrapropagantes a cada una de las categorías Raman subsecuentes (i.e. categorías Raman consecutivas alternas en dirección) - figura 3d. Este esquema de bombeo alterno puede dar un perfil mas uniforme para la ganancia. En una realización, los bombeos Raman pueden ser colocados en el amplificador a intervalos de 40-45 km, correspondiente a un posible espaciado de casilla en sistemas de comunicación (figura 4). Dado que la atenuación del bombeo puede variar de 0.3-0.4 dB/km (figura 5), en algunas realizaciones la eficacia del bombeo en suministrar ganancia Raman puede ser restringido a unas pocas longitudes L_{eff} , o alrededor de 10-20 km.

Otra realización es un amplificador Raman distribuido de bajo ruido con bombeo bidireccional. Otra realización es un amplificador Raman híbrido de bajo ruido con bombeo bidireccional. El espaciado de 40-45 km puede mantener al ARD eficaz todo el recorrido a través de la línea de transmisión. El esquema de amplificación puede ser bien un ARD puro o un esquema híbrido que comprende un amplificador discreto y distribuido. La luz de bombeo de categoría Raman se propaga en sentido ascendente hacia la fuente de señal, mientras que la categoría Raman intermedia se propaga en sentido descendente en la dirección de la señal. En un ejemplo, el amplificador híbrido puede ser un amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA) que opera en torno a 1550 nm junto con un ARD. Una categoría Raman de bombeo (categoría n) es introducida contrapropagando alrededor de una longitud de onda de 1450 nm, mientras que la categoría Raman intermedia (categoría n-1) es insertada co-propagando alrededor de una longitud de onda de 1365 nm. También listadas en la figura 4 están otras longitudes de onda previas de categoría Raman, las cuales pueden ser usadas para extender el esquema a más de dos categorías de bombeo en otras realizaciones.

La mejora en CR para esta longitud de onda de señal de 1550 nm usando el esquema de bombeo de categoría multi-Raman en algunas realizaciones puede ser estimado usando algunas cálculos simples. Puede asumirse que las pérdidas para diferentes longitudes de onda sean: a 1550 nm ~ 0.2 dB/km, a 1450 nm ~ 0.3 dB/km, y a 1365 nm ~ 0.35 dB/km (ver figura 5). Los detalles del caso calculado son proporcionados en la figura 6.

La cifra de ruido calculada es mostrada en la figura 7, y una tabulación de la cifra de ruido para diferentes realizaciones de configuraciones de bombeo contra la longitud es incluida en la figura 8. El caso del bombeo inverso se refiere al uso de un solo bombeo que decae hacia la entrada, y este caso puede tener la peor cifra de ruido. Puede ser usado con el bombeo contrapropagante reduciendo el acoplamiento de ruido entre la señal y el bombeo. El bombeo

hacia adelante tiene teóricamente la mejor cifra de ruido. El bombeo bidireccional usando dos categorías Raman en cascada es también mostrado en la figura 7, y esta tiene una cifra de ruido óptico entre los dos casos limitantes de bombeos hacia adelante y hacia atrás. En una separación de amplificador de 40 km, el bombeo bidireccional da mas de 1 dB de mejora en cifra de ruido sobre el caso bombeado inverso. En una separación de amplificador de 80 km, el bombeo bidireccional da ~4 dB de mejora en cifra de ruido sobre el caso bombeado inverso.

En otra realización, se proporciona un amplificador Raman bidireccional con módulos de bombeo que pueden ser osciladores Raman de longitudes de onda múltiples, osciladores Raman de longitud de onda simple, bombeos de diodo de láser y combinaciones de los mismos. El ARD de bajo ruido amplificador híbrido puede ser bombeado ya sea por bombeos separados o por osciladores Raman de doble longitud de onda (figuras 9(a) y 9(b)). El oscilador Raman de doble longitud de onda puede ser del diseño de un filtro de transmisión periódica, con acopladores de salida usado a lo largo de dos brazos de la cavidad en las categorías Raman n y $n-1$ (figura 9(c)). En otra realización, el bombeo de la categoría Raman n y $n-1$ pueden ser diodos láser en las apropiadas longitudes de onda Raman, donde categorías subsecuentes pueden separarse en aproximadamente 13.2 THz (figura 9(d)). Suficiente energía de diodo láser de un número de diodos láser puede combinarse y acumularse. El bombeo de categoría n puede combinarse con el bombeo para el amplificador discreto en un esquema de un amplificador híbrido (figura 9(e)). Por ejemplo, un bombeo entre 1450-1480 nm puede bombear un EDFA discreto así como el ARD en la categoría n .

Un ejemplo de un oscilador Raman de doble longitud de onda de la figura 9(c) esta ilustrado con mas detalles en la figura 10. Esta realización de un oscilador Raman es de un diseño de filtro periódico. Un oscilador Raman de doble longitud de onda es mostrado para una banda de señal de unos 1550 nm. Las dos longitudes de onda de salida deseadas pueden ser alrededor de 1450 nm y 1365 nm. Un espejo de banda ancha (i.e., ya sea un recubrimiento dieléctrico o un espejo de bucle Sagnac) y una fibra de ganancia puede formar un extremo de la cavidad. Un filtro periódico puede separar los caminos para categorías alternas de Raman. Reflectores de banda estrecha como las rejillas de fibra pueden formar las cavidades para cada una de las categorías Raman intermedias. Para las dos longitudes de onda Raman de salida deseadas, pueden ser usados acopladores de salida que puedan tener una transmisión entre 5 a 30 por ciento. En la realización de un diseño de cavidad las dos categorías Raman deseadas pueden ser separadas automáticamente. El filtro periódico puede ayudar a reducir pérdidas y cualquier efecto de calentamiento que pueda existir en las rejillas.

El esquema de bombeo de categoría Raman múltiple puede ser usado para mejorar la combinación de potencia de diferentes LDs. Como un ejemplo, la figura 11 muestra como un amplificador de banda de longitud de onda corta (banda-S) a aproximadamente 1480 nm puede ser hecho con diodos de láser en longitudes de onda convenientes. Dado que la longitud de onda de dispersión cero para fibras estándar de modo simple puede estar alrededor de 1310 nm, la tecnología LD para láseres semiconductores de 1310 nm puede estar bastantes madura. Se han hecho esfuerzos para hacer LDs alrededor de unos 1400 nm. Los LDs de 1310 nm pueden ser hechos de compuestos semiconductores ternarios InGaAs, mientras que los LDs de 1310 nm o 1400 nm pueden estar hechos de compuestos semiconductores cuaternarios InGaAsP. Para un amplificador de banda-S centrado alrededor de 1480 nm, las dos categorías de bombeo requeridas pueden estar alrededor de 1390 nm para la categoría n y alrededor de 1310 nm para la categoría $n-1$. Diferentes LDs pueden ser combinados en cada modulo de bombeo con una combinación de multiplexación de polarización y multiplexación de división de longitud de onda, como se muestra en la figura 11. Aunque la potencia por LD puede ser limitada, por combinación de varios LDs y usando las dos categorías Raman para transferir potencia a la señal, niveles de potencia adecuados pueden conseguirse por la amplificación Raman (i.e., mas de 400 mW) en algunas realizaciones.

En una realización de un esquema de amplificación híbrida, la configuración de bombeo puede ser simplificada usando un bombeo común para el amplificador discreto y distribuido. La categoría Raman de bombeo (categoría n) puede ser usada para bombear un amplificador Raman discreto o un amplificador discreto tal como un EDFA. Por ejemplo, un bombeo entre 1450-1480 nm puede ser usado tanto para bombear un EDFA discreto como el ARD en la categoría n . (figura 12). La banda de bombeo para EDFA puede llegar al máximo alrededor de 1480 nm, y puede existir una absorción por debajo de 1450 nm. Un bombeo Raman de la categoría n en el rango de longitud de onda de ~1450 a ~1480 nm puede ser usado tanto como un bombeo EDFA discreto como un bombeo inverso para un ARD. La correspondiente categoría $n-1$ de bombeo Raman hacia delante puede estar en el rango de longitud de onda de ~1365 a ~1390 nm. El bombeo de categoría n puede ser dividido y enviado separadamente al ARD y al EDFA (figura 12(a)). El ARD puede ser bombeado con la potencia restante después del EDFA (figura (b)). La figura 9 muestra una realización donde los láseres de bombeo pueden ser LDs combinados u osciladores Raman de simple o doble longitud de onda.

Otra realización bombea el amplificador híbrido ampliando la longitud de onda de bombeo de la categoría n usando no linealidades en las fibras. Para la propagación cerca de la longitud de onda de dispersión cero de la fibra, el haz bombeo puede experimentar una ampliación del espectro debido a un fenómeno conocido como mezcla de cuatro ondas (M4O) o amplificación paramétrica (AP). Enviando una categoría n de alta potencia bombeado a través de una fibra con longitud de onda de dispersión cero apropiadamente seleccionada puede llevar a una banda de bombeo mas ancha que puede bombear amplificadores discretos y distribuidos. La figura 13 ilustra una realización de un esquema de bombeo para la banda de señal alrededor de 1550 nm, tal como en la figura 12. Por ejemplo, un bombeo de alta potencia puede ser seleccionado alrededor de 1465 nm. Con una fibra teniendo longitud de onda de dispersión cero alrededor de 1465 nm, el espectro de bombeo puede ser ampliado para que cubra el rango de al menos 1450 a 1480 nm. La fibra de avance de bombeo debería tener la dispersión de velocidad de grupo menor que o igual a unos 2 ps/nmlkm.

ES 2 356 393 T3

La fibra puede ser dirigida por dispersión (i.e., combina diferentes fibras de dispersión para cancelar alguna de las dispersiones) para alcanzar esta dispersión alrededor de 1465 nm. En una realización, si el amplificador discreto es un EDFA, puede absorber longitudes de onda cercanas a 1480 nm. En una realización, el ARD puede bombear longitudes de onda alrededor de 1450 nm para una banda de señal alrededor de 1550 nm. Un bombeo ampliado espectralmente puede bombear efectivamente al EDFA discreto y al ARD.

En otra realización, un amplificador Raman discreto de bajo ruido puede tener bombeo bidireccional. Ventajas mencionadas anteriormente pueden beneficiar a los amplificadores discretos. En el amplificador discreto, una fibra de ganancia puede ser insertada en la línea de transmisión en vez de usar la fibra de transmisión como un medio de ganancia. Amplificadores discretos pueden estar en etapas simples o múltiples. La mejora de CR surge de nuevo por la impulsión del bombeo en el punto de entrada del amplificador. En una realización, una geometría de contrapropagante puede minimizar el acoplamiento de fluctuaciones bombeo-a-signal. Los láseres de bombeo ambos en la categoría Raman de bombeo tal como la categoría Raman intermedia pueden combinar mas potencias de diodos de láser.

Una realización de un amplificador Raman discreto de una sola etapa usando el esquema de bombeo de categoría múltiple es ilustrado en la figura 14. El amplificador discreto comprende una fibra de ganancia rodeado por dos MDLs para la inserción de los bombeos. En algunas realizaciones, uno o dos aisladores rodeando el amplificador pueden ser insertados para evitar laserizado o realimentación de las reflexiones. El modulo de bombeo de doble longitud de onda puede ser similar a la figura 9, comprendiendo osciladores de categoría diferente, un oscilador Raman de doble longitud de onda o combinaciones LD diferentes. El bombeo de categoría n puede ser hecho contrapropagante a la señal, mientras la categoría n-1 de categoría intermedia puede ser hecha para ser co-propagada a la señal. La categoría n-1 ayuda a impulsar la ganancia para la señal en el punto de entrada en la fibra de ganancia, así mejorando la CR del amplificador.

La categoría de bombeo múltiple Raman puede ser ventajosa para amplificadores Raman de doble etapa, donde la primera etapa puede ser un pre amplificador de bajo ruido mientras que la segunda etapa puede ser un amplificador de potencia. Un aislador puede ser colocado entre las dos secciones para minimizar los efectos de reflexiones perdidas así como interferencias de rutas múltiples. En adición, módulos con pérdida, tal como elementos de compensación de dispersión o multiplexores de agregado/lanzamiento óptico, puede también ser colocado en una etapa intermedia entre las dos secciones de ganancia. Si el bombeo de la categoría n-1 puede ser usado en un lugar, una posición importante en una realización es en el pre amplificador de bajo ruido, como se ilustra en la figura 15(a). Mejoras adicionales en la ganancia y en la CR pueden ser obtenidos insertando un segundo bombeo de categoría n-1 en el punto de entrada hacia el segmento de alta ganancia, como se muestra en la realización de la figura 15(b).

Una realización de un diseño de doble etapa más eficiente es mostrada en la figura 16. La primera etapa puede ser un pre amplificador de bajo ruido mientras que la segunda etapa puede ser un amplificador de potencia. La categoría de bombeo n puede ser usada primero en el pre amplificador de bajo ruido, y luego cualquier residuo de la potencia de bombeo de la categoría n puede ser alimentado de nuevo a la segunda etapa y usado para bombear el amplificador de potencia en un modo contrapropagante. En una realización, si la categoría de bombeo n-1 puede ser usada solo en una posición, el lugar de acoplamiento es la primera etapa del pre amplificador de bajo ruido (figura 16(a)). En otra realización, puede obtenerse mas ganancia y mejor CR añadiendo una segunda categoría de bombeo n-1 al comienzo del amplificador de potencia (figura 16(b)). En algunas realizaciones, los aisladores pueden ser posicionados en los caminos de establecimiento de bucle de bombeo como se indica en la figura 16 para mejorar la interferencia multi ruta para la señal.

Como se muestra en la figura 1, el ancho de banda de ganancia de la amplificación Raman con un solo bombeo puede estar en el orden de 20 nm. Para hacer amplificadores Raman de banda ancha, bombeos múltiples en diferentes longitudes de onda pueden ser usados. Sin embargo, en un ARD, la interacción no lineal entre bombeos puede hacer difícil alcanzar un ARD de banda ancha. En particular, a través del efecto Raman en la fibra, los bombeos de longitud de onda mas larga roban energía de los bombeos de longitud de onda mas corta. Como consecuencia, las bandas de longitud de onda mas largas reciben más ganancia que las bandas de longitud de onda mas cortas.

Una realización alcanza un ARD relativamente plano y de banda ancha con una técnica de pre énfasis de bombeo combinada con la evolución espacial y espectral del perfil de ganancia de Raman en la longitud de la línea de transmisión. Dado esto puede haber interacción no lineal entre bombeos, la interacción puede ser explotada para crear un perfil de ganancia mas uniforme. Dado que los ARDs pueden usar la longitud total de la línea de transmisión, la larga longitud de transmisión puede permitir que la potencia de bombeo se distribuya y proporcione bombeo mas uniforme. En algunas realizaciones el haz de bombeo de longitud de onda más corta debería ser la potencia mas alta, y luego los bombeos de longitud de onda mas largas deberían estar en disminución secuencial de niveles de potencia en la entrada de la fibra. Luego, a medida que se propagan los bombeos por la longitud de la fibra de transmisión, la potencia de bombeo comienza en la mas corta longitud de onda y cambia a lo largo de la longitud de onda hacia los bombeos de longitud de onda más larga. La magnitud de pre énfasis de bombeo puede depender de detalles del sistema, incluyendo potencia de bombeo, área efectiva de fibra, longitud de fibra, pérdida de fibra y coeficiente de ganancia Raman.

Un amplificador híbrido puede usar amplificadores discretos de fibra dopados con erbio combinados con ARDs. Los amplificadores de fibra dopada con erbio convencionales (banda-C) y de longitud de onda larga (banda-L) cubren el rango de longitud de onda de alrededor de 1530 a 1610 nm. Las simulaciones por ordenador pueden estudiar los efectos de diferentes esquemas de bombeo. Una realización tiene longitudes de onda de bombeo de 1430, 1450, 1470,

ES 2 356 393 T3

1490 y 1510 nm. La potencia neta en todas estas bandas de bombeo puede ser 925 mW en una realización. Los parámetros para las simulaciones en una realización son:

> área efectiva $A_{\text{eff}} = 50 \mu\text{m}^2$

> longitud del enlace $L = 40 \text{ km}$

> pérdida en 1310 nm: 0.35 dB/km

> pérdida en 1380 nm: 0.3 dB/km

> pérdida en 1550 nm: 0.2 dB/km

En una realización múltiples bombeos Raman pueden ser iniciados a potencias iguales para proporcionar ARD en las bandas C y L. Por ejemplo, 5 bombeos Raman pueden ser iniciados a potencias iguales de 185 mW por bombeo. La figura 17 muestra un ejemplo de ganancia cuando potencias de bombeo iguales son iniciadas, y la figura 18 muestra un ejemplo de la evolución de los diferentes bombeos a lo largo de la fibra de transmisión. La ganancia puede ser altamente no uniforme con un cambio de casi 20 dB entre 1530 y 1610 nm. La evolución de bombeo en la figura 18 muestra que la potencia puede cambiar rápidamente a longitudes de onda largas, así creando ganancia elevada en las longitudes de onda largas.

El bombeo de pre énfasis puede ser usado, y la evolución por la fibra. En un ejemplo, potencias de bombeo iniciadas pueden ser: 500 mW en 1430 nm, 250 mW en 1450 nm, 100 mW en 1470 nm, 50 mW en 1490 nm y 25 mW en 1510 nm (nota: la misma potencia neta como en el caso anterior). En este ejemplo, los bombeos pueden ser asumidos para ser más fuertes que las potencias de señal, de modo que no hay agotamiento de bombeo. El perfil de ganancia resultante es mostrado en la figura 19 para este ejemplo, y la ganancia es $15+_{-2}$ dB sobre la banda total entre 1530 y 1610 nm. Elementos de aplanamiento de ganancia mayor - tales como filtros de interferómetro Mach-Zehnder, rejillas de largo periodo, dispositivos ópticos acústicos - pueden ser usados para aplanar la mayor ganancia en otras realizaciones. En otra realización, mas bombeos en espacios de longitud de onda mas cercanas pueden ser usados para crear un perfil de ganancia mas plano. La evolución de bombeo para las diferentes longitudes de onda es mostrada en la figura 20, y el punto más alto para bombeos de longitud de onda largos parece que se produzcan más por la fibra durante la evolución espacial.

El bombeo Raman usado para la amplificación de banda ancha pueden ser varias combinaciones de diodos de láser (LDs) y osciladores Raman. Las figuras 21 y 22 muestran otras realizaciones con bombeos. Un esquema de bombeo ejemplar combina diferentes LDs en cada una de las longitudes de onda de bombeo (figura 21(a)). Si no existe suficiente potencia de LD, por ejemplo para la longitud de onda mas corta en la potencia mas elevada, entonces diferentes LDs que son polarización y/o longitud de onda multiplexados pueden ser usados (figura 21(b)). En otra realización, un oscilador Raman de alta potencia puede proporcionar la 1ra y, si es necesario, la 2da longitud de onda de bombeo, y los bombeos débiles de longitud de onda largas pueden ser LDs (figura 22(a)). Una ventaja de los osciladores Raman en algunas realizaciones es que potencias altas están disponibles fácilmente en estos tiempos. Un oscilador Raman del diseño de un filtro periódico puede ser usado con, por ejemplo, uno o dos acopladores de salida para obtener bombeos de longitud de onda mas cortos (figura 22(b)).

El bombeo de pre énfasis puede ser usado en amplificadores Raman discretos. Las figuras 18 y 20 muestran que la actividad de redistribución de bombeo pueda suceder en longitudes de fibra bajo unos 15 km en algunas realizaciones. Para amplificadores Raman discretos con longitudes en la categoría de 8-15 km (por ejemplo, amplificadores Raman hechos en fibra desplazada por dispersión), técnicas de pre énfasis de bombeo pueden ser usadas para ampliar la ganancia del ancho de banda. Por ejemplo, la ganancia para el ARD en la figura 19 es recalculado para el cartucho de una longitud de 15 km de fibra de ganancia y mostrado en la figura 23. Aunque la longitud de la fibra es reducida de 40 km de vuelta a 15 km, el perfil de la ganancia sigue siendo muy similar. Los mismos parámetros son usados como en la figura 19 excepto que la potencia en los dos bombeos de longitudes de onda más largos puede ser ligeramente incrementada. El cambio de potencia a las longitudes de onda más largas no es completado en el 15 km. Por tanto, las potencias de bombeo usados para el ejemplo en la figura 23 son: 500 mW en 1430 nm, 250 mW en 1450 nm, 100 mW en 1470 nm, 80 mW en 1490 nm (caso de ligero aumento de 40 km), y 70 mW en 1510 nm (caso de ligero aumento de 40 km). La ganancia aproximada resultante 13_{-1} dB sobre el rango 1530 a 1610 nm.

Al igual que en el ARD, para un amplificador discreto, el bombeo puede ser una combinación de LDs y osciladores Raman. También, la técnica de pre énfasis de bombeo puede ser usada por amplificadores de una sola etapa o multi etapas. En algunas realizaciones, la adición de LDs de longitud de onda largo ofrece una manera de mejorar amplificadores Raman distribuidos o discretos. Un oscilador Raman de alta potencia, tal como se ilustra en las figuras 10 a 22b, pueden bombear el amplificador en una realización. En otras realizaciones, por la adición de los LDs de longitud de onda larga, el ancho de banda de ganancia puede incrementarse. En otras realizaciones, mediante el ajuste de la amplitud de los LDs de longitud de onda larga, la inclinación de ganancia puede ser también variada, por ejemplo, con un bombeo del oscilador Raman.

Amplificadores Raman de banda ancha con pre énfasis de bombeo múltiple pueden ser combinados con bombeos Raman de categoría múltiple desde los dos lados para bajar la cifra de ruido. Para casos de realizaciones de banda

ES 2 356 393 T3

ancha y de bajo ruido, bombeos de longitud de onda múltiple pueden ser usadas en los muchos bombeos de categoría Raman. Por ejemplo, si cuatro longitudes de onda son usadas para alcanzar un ancho de banda de ganancia certero en el bombeo de la categoría n^{th} , luego del lado opuesto el amplificador puede también ser bombeado por cuatro longitudes de onda en la categoría $n-1$. Debido a la evolución espacial por debajo de la longitud de la fibra, las figuras de ruido pueden ser mejoradas sobre el caso contrapropagante, y la cantidad de mejoras puede variar para diferentes bandas de ganancia.

Debido a los requerimientos de potencia de bombeo elevada de los amplificadores Raman, algunas realizaciones incluyen amplificadores Raman altamente eficiente, donde la eficiencia puede ser definido como el porcentaje de señal de salida del bombeo de entrada. En una realización, la eficiencia puede ser mejorada al punto que diodos láser (LDs) pueden ser usados para bombear directamente el amplificador Raman. Como un punto de referencia ejemplar, para un amplificador de doble etapa hecho de fibra cambiada por dispersión (FCD) con una ganancia de >15 dB y una cifra de ruido eléctrica de <6 dB, una potencia de bombeo de unos 1W puede ser requerido del oscilador Raman o el láser de bombeo. Este nivel de potencia puede requerir las potencias combinadas de unos ocho LDs en una realización. Si los requerimientos de bombeo podría ser disminuido por un factor de cuatro o menos, las potencias de bombeo podrían lograrse con la combinación de dos LDs que son la polarización de multiplexación en otra realización. En una realización, pueden ser usados cuatro LDs para proporcionar más que 0.5 W de potencia, y el factor de mejora restante podría ser usado para reducir las longitudes de fibra de ganancia.

Una realización mejora la eficiencia de amplificadores Raman incrementando la no linealidad eficaz de la fibra usada como un medio de ganancia. El coeficiente no lineal efectivo para la fibra puede ser definido como

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_2}{A_{\text{eff}}}$$

donde n_2 es el índice no lineal de refracción y A_{eff} es el área efectiva de la fibra. La ganancia Raman coeficiente puede ser directamente proporcional a γ . El coeficiente Raman es la parte imaginaria de la susceptibilidad no lineal mientras que el índice es proporcional a la parte real de la susceptibilidad, y el índice no lineal y la ganancia Raman estarán relacionados por el así llamado Kramers - Kronig. Para una fibra de dispersión cambiada en longitud de onda de 1550 nm con un $n_2 = 2.6 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$ y un $A_{\text{eff}} = 50 \mu\text{m}^2$, el coeficiente no lineal puede estar alrededor de $\gamma = 2 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$. Si este valor se eleva a más de $3 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$, luego la potencia de bombeo o longitudes de fibra pueden ser reducidas en proporción al incrementó en coeficiente no lineal.

Más allá de restricción en el coeficiente de ganancia Raman, la dispersión en el amplificador puede ser restringido. Para mantener un nivel relativamente bajo de dispersión en los alrededores de las longitudes de onda de la señal, la longitud de onda de dispersión cero λ_0 puede estar en proximidad a la longitud de onda operativa. Para un solo canal, sistemas de alta tasa de bits, una realización minimiza la dispersión colocando la longitud de la señal dentro de 10 nm del λ_0 . Para algunas realizaciones de sistemas MDL de longitud de onda múltiple, donde los canales pueden interactuar a través de una mezcla de cuatro ondas en los alrededores de λ_0 , una fibra dirigida por dispersión puede ser usada. Una fibra dirigida por dispersión puede tener una dispersión local elevada salvo un valor de ruta promedio para dispersión cerca de cero combinando longitudes de valores más y menos para la dispersión alrededor de la banda de operación. Para la banda de longitud de onda operativa, algunos segmentos de fibra pueden tener λ_0 en longitudes de onda más cortas y algunos segmentos de fibra pueden tener λ_0 en longitudes de onda más largos.

Por diseño propio de la fibra, mayor no linealidad y una menor dispersión se puede lograr. Por ejemplo, para la operación en la banda-S en torno a 1520 nm, fibras de no linealidad elevadas han sido producidas. El núcleo de la fibra puede tener un perfil de índice de refracción parabólicamente modificado con un $\Delta_{\text{pico}} = 2\%$. Tres fibras ejemplares tienen longitudes de onda de dispersión cero de 1524 nm, 1533 nm y 1536 nm. Tales fibras pueden tener una pendiente de dispersión de $0.043 \text{ ps/nm}^2\text{-km}$, y la pérdida en 1550 nm puede ser aproximadamente 0.6 dB/km . El coeficiente no lineal puede ser $\gamma = 9 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$, o un factor de $4.5\times$ mayor que en el FCD. El mejoramiento puede ser atribuido a dos factores: una pequeña área efectiva y un mayor contenido de germanio. El área efectiva puede ser reducida cerca de $A_{\text{eff}} = 16.5 \mu\text{m}^2$, o cerca de un factor de 3.3 menos que en el FCD. También, el índice no lineal de retracción es cerca de $1.35\times$ más largo que en el FCD debido al germanio extra usado para incrementar Δ_{pico} de 1% en el FCD a 2% para la fibra de no linealidad elevada. En adición el diámetro del campo de modo en 1550 nm puede ser medido para ser $4.67 \mu\text{m}$.

Para la fibra de ganancia usado en el amplificador Raman, una figura de mérito para la fibra puede ser definido en algunas realizaciones. Una figura de mérito que puede ser medido y el rendimiento de un amplificador indicado es el porcentaje del coeficiente de ganancia Raman a la pérdida en la longitud de onda de la señal. Mientras más elevado sea esta figura de mérito, mejor el rendimiento del amplificador. Este figura de mérito para diferentes fibras en algunas realizaciones es proporcionado en la Tabla 1. En una realización la figura de mérito más baja se encuentra a la norma (dispersión no cambiada) fibra SMF-28. Esta fibra puede tener un contenido bajo de germanio y un $A_{\text{eff}} = 86 \mu\text{m}^2$ relativamente largo. Las figuras de mérito para la fibra de alta no linealidad puede ser superior al de otras fibras, con un valor cerca de dos veces más grande que la fibra de onda Lucent True en un ejemplo. Aunque el FCDs pueden tener una figura de mérito relativamente grande para la amplificación Raman, estos pueden tener coeficientes de dispersión muy extensos para señales de bandas-S.

TABLA 1

Comparación de la figura de mérito de la ganancia Raman para fibras de diferentes medidas

Tipo de Fibra	Ganancia [dB/W-km] @ 1500nm	Perdida [dB/km] @ 1500nm	Figura de Merito
Proximo SMF-28	2.2	0.19	11.6
Onda Lucent True	3.3	0.21	15.7
Proximo SMF-DS	4.0	0.2	20.0
Proximo DCF	11.75	0.445	26.4
Lucent DCF	13.72	0.5	27.6
AL - NL	18.0	0.6	30.0

Una realización con fibra de AL-NL tiene mejoras significantes en términos de longitud de fibra y potencia de bombeo usado en el amplificador Raman. Una realización tiene un amplificador hecho de fibra de onda Lucent True. Estas especificaciones para la unidad puede ser: baja dispersión cerca de 1520 nm, 15 dB de ganancia de pico, CR eléctrica y óptica bajo 6 dB, y interferencia de ruta múltiple (IRM) bajo 50 dB. Un diseño de dos etapas para el amplificador Raman puede ser usado, como se ilustra en la figura 24. En particular, 6 km de fibra True-Wave puede ser usada en la primera etapa y 10-12 km de fibra pueden ser usados en la segunda etapa. El rendimiento medido del amplificador puede ser: ganancia de pico de 15.2 dB en 1516 nm, ancho de banda 3 dB de 26 nm (entre 1503-1529 nm), y cifra de ruido eléctrica y óptica bajo 6 dB. Por ejemplo, la ganancia *versus* longitud de onda y cifra de ruido *versus* longitud de onda para la unidad es ilustrado en las figuras 25 y 26. Este rendimiento puede tener una potencia de bombeo cerca de 1.0 W en 1421 nm.

En una realización, la fibra True-Wave en este diseño es remplazado con fibra de no linealidad elevada. Reducciones en los requerimientos de longitudes de la fibra y la potencia de bombeo se pueden lograr. La fibra de no linealidad elevada puede cumplir el requerimiento de dispersión en algunas realizaciones. Las fibras FDC pueden llevar a la introducción de grandes cantidades de dispersión. Refiriendo la Tabla 1 de comparación, las longitudes de la fibra pueden ser elegidas para mantener aproximadamente la misma cantidad de pérdida neta. En una realización, las longitudes de la fibra pueden ser aproximadamente de 2 km para la primera etapa y 3.3 km para la segunda etapa. Requerimientos de potencia de bombeo se puede bajar por el porcentaje de figuras de mérito, o aproximadamente a 0.5 W en varias realizaciones, este rango de potencia puede ser proporcionada por el oscilador Raman, o por polarización y longitud de onda multiplexado 3-4 de LDs juntas. La fibra de no linealidad elevada puede reducir el tamaño del amplificador tanto como se permita el bombeo de LD en algunas realizaciones.

La fibra puede tener una operación de un solo modo para el bombeo tanto como las longitudes de onda de la señal en algunas realizaciones. La longitud de onda de corte λ_c de la fibra puede ser mas corto que cualquiera de las longitudes de onda de bombeo en algunas realizaciones. El bombeo puede ser de modo múltiple, y el ruido puede ser introducido de la pulsación entre modos en otras realizaciones.

Varias realizaciones tienen reducción del tamaño del amplificador Raman y los requisitos de bombeo mientras se mantiene dispersión baja neta en las longitudes de onda operativas, y incluyen uno o mas de:

(A) Un amplificador Raman usando una fibra de ganancia *caracterizado porque*

- coeficiente no lineal $\gamma > 3 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$
- longitud de onda de dispersión cero en el rango de $1300 < \lambda_0 < 1800 \text{ nm}$, dependiendo mas precisamente en las especificaciones
- perdida bajo la longitud de onda operativo de $< 2 \text{ dB/km}$, con una preferencia de perdida $< 1 \text{ dB/km}$

(B) Un amplificador Raman usando una fibra de ganancia dirigido por dispersión *caracterizado porque*

- coeficiente no lineal $\gamma > 3 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$
- manejo de dispersión hecho usando segmentos de fibra con longitud de onda de dispersión cero en el rango de $1300 < \lambda_0 < 1800 \text{ nm}$, dependiendo mas precisamente en la especificaciones. Dando una banda operativa, ciertos segmentos de fibra tienen λ_0 menos que la banda operativa y otros segmentos de fibra tienen λ_0 mayor que la banda operativa. La dispersión local puede mantenerse elevada, mientras que la dispersión de ruta promedio puede ser cercana a cero en la banda de la señal.
- Perdida sobre la longitud de onda operativa de cierto $< 2 \text{ dB/km}$, con una preferencia de perdida $< 1 \text{ dB/km}$

ES 2 356 393 T3

(C) Fibras como en (A) o (B) con longitud de onda corte mas corta que cualquiera de las longitudes de onda de bombeo.

5 (D) Un amplificador Raman como se describe en (A) que es bombeado por LDs. Para dos o mas LDs, la potencia puede ser combinada usando polarización y longitud de onda multiplexada usando combinadores de bombeo de polarización y multiplexores de división de longitud de onda.

10 (E) Un amplificador Raman como en (B) que es bombeado por LDs. Para dos o mas LDs, la potencia puede ser combinado usando polarización y longitud de onda multiplexada usando combinadores de bombeo de polarización y multiplexores de división de longitud de onda.

(F) Al menos un amplificador Raman de doble etapa que usa las mejoras en (A), (B), (C), (D) o (E).

15 (G) Otros factores como los anteriores con diferentes rangos numéricos.

Una tecnología para sistemas U-DMDL puede ser el uso de amplificadores híbridos, el cual comprende un amplificador discreto junto con un ARD, para evitar interacciones no lineales entre canales. El ARD puede operar sobre 80+ nm de ancho de banda en algunas realizaciones, los cuales pueden ser logrados por bombeo de pre énfasis y evolución espectral a lo largo de la longitud de onda de la fibra en algunas realizaciones. Si se usa una separación entre canales de 10 GHz, por ejemplo, esto puede producir longitudes de onda de 1000+:

20 10 GHz de separación de canal = ~0.08 nm/canal

25 ancho de banda total = ~80+ nm

de canales = [80+ nm] / [0.08 nm/c] = 1000+ canales si la tasa de bits por canal es 2.5 Gb/s, entonces la capacidad de la fibra puede ser

30 capacidad de ancho de banda = 1000+ canales x 2.5 Gb/s-ch = 2.5+ Tb/s.

35 Para un alcance máximo, el ancho de banda del sistema 80+nm puede coincidir con la región de perdida mínima en la fibra en algunas realizaciones. Por ejemplo, las bandas - C y L pueden ser usados entre ~1530-161 Onm. El amplificador híbrido puede usar EDFAs y ARDs discretos en algunas realizaciones.

40 Otra realización es una fuente de banda ancha ultra que puede ser dividido con filtros para producir un gran número de canales. Realizaciones de fuentes de banda ancha ultra incluyen generación continua en fibras, láseres de modo bloqueado de pulso corto, fuentes ASE, y diodos super luminiscentes. La división de la fuente de banda ancha usando filtros puede ser más fácil desde que la periodicidad de los filtros pasivos pueda establecer la separación de canal. Cuando la separación de canal es menor a 25 GHz, una realización incluye un circuito de estabilización complicado para establecer las longitudes de onda de LDs individuales.

45 Otra tecnología para sistemas de longitud de onda de 1000+ es la tecnología de filtro periódica. Varias realizaciones incluyen enrutadores de longitud de onda de rejillas o filtros de guía de onda matriz. Una guía de onda matriz comprende dos acopladores estrella y un interferómetro Mach-Zehnder basado en rejilla en una realización. Un gran número de canales de longitud de onda de separación de canal uniforme pueden ser multiplexados a través de un interferómetro Mach-Zehnder. Guía de onda matriz puede tener 50 y 25 GHz de separación. Otras realizaciones pueden incluir un canal de separación de alto contraste acercándose a 10 GHz.

50 Como en la figura 28(b) de muestra, no linealidades de fibra residual pueden permanecer dependiendo en el nivel de potencia. Algunas realizaciones tienen control no lineal o compensación. Inclinación de ganancia Raman puede estar compensando varios esquemas de equalización de ganancia. En varias realizaciones, estos esquemas equalizan la inclinación del amplificador, y compensado por una combinación de la inclinación del amplificador y la inclinación de ganancia Raman. Con pre énfasis de potencia de canal en la entrada en algunas realizaciones, después de la propagación a través del sistema de fibra las energías del canal se equalizan. Para compensar por mezcla de cuatro ondas de amonestación, múltiples realizaciones pueden ser usados. Fibras de dispersión dirigida pueden ser usados, por ejemplo donde la dispersión tiene un alto valor a nivel local pero un bajo valor de ruta dirigida. En otras realizaciones, cada tercer canal puede ser omitido. Cuando dos canales adyacentes pulsan a través de una mezcla de cuatro ondas, dan lugar a bandas laterales en los dos canales que lo rodean. Omitiendo cada tercer canal, la penalización de mezcla de cuatro ondas de diafonía puede ser reducida (ver figura 29).

65 Los retos de los sistemas de longitud de onda de 1000+ pueden ser cumplidos con una combinación de una o mas tecnologías (figura 30). Amplificadores híbridos, usando amplificadores discretos mas ARDs, pueden ser usados para bajar la potencia de señal del canal en algunas realizaciones. Los amplificadores discretos pueden ser separados en 80-100 km, aunque algunas realizaciones pueden tener separaciones de 30-50 km. El ARD puede usar pre énfasis de bombeo a un ancho de banda deseado de 80+ nm en algunas realizaciones. Varias realizaciones usan LDs discretos, o pueden comprender uno o más fuentes de luz de banda ancha, los cuales son luego divididos usando filtros periódicos

ES 2 356 393 T3

pasivos. Una separación de canal mucho mas estricta, por debajo de 25 GHz y de preferencia 10 GHz, pueden lograrse en algunas realizaciones. Algunas realizaciones tienen tecnología de filtro de canal denso tales como los filtros AWG. El control no lineal en algunas realizaciones puede compensar la no linealidad de la fibra. Para superar la inclinación de ganancia Raman, ajuste de inclinación de ganancia o pre énfasis de potencia de señal puede ser usado en algunas realizaciones. Para controlar la mezcla de cuatro ondas, el manejo de dispersión o omitiendo cada tercer canal puede ser usado en otras realizaciones.

El rango de longitud de onda donde amplificadores híbridos con ARDs se van a utilizar, pueden ser considerados para facilitar futuras actualizaciones en ancho de banda. ARDs usados en la banda-C (1530-1565 nm) o banda-L (1570-1610 nm) pueden restringir la apertura de la banda-S (1480-1530 nm) o banda+S (1430-1480 nm). ARDs pueden usar bandas de bombeo que son 13.2 THZ, o cerca de 100 nm, más corto en longitud de onda que la banda de señal. Para las bandas -C o -L, ARDs pueden tener bombeos que yace en el rango de la longitud de onda entre 1430-1510 nm. Las bandas de bombeo pueden estar a una longitud de onda mas corta que cualquier banda de señal. El bombeo puede reducir la energía de los canales de señal a través del proceso Raman.

En realizaciones donde ancho de banda de la fibra excede 100 nm, ARD puede ser inconsistente con expansión de banda adicional. Por ejemplo, los ARDs para las bandas -C y -L pueden evitar el uso de bandas -S y +S en la fibra en algunas realizaciones. Los bombeos para el ARD pueden yacer en longitud de onda más corta que otra banda de la señal. Para maximizar la capacidad de la fibra en algunas realizaciones los ARDs pueden ser usados en las bandas mas cortas para ser usado en la fibra.

Los ARDs pueden ser útiles cuando la pérdida de fibra incrementa en algunas realizaciones. Por ejemplo, cuando la pérdida de fibra incrementa >0.03 dB/km de la pérdida mínima (i.e., por un enlace de 80 km que podría significar una pérdida adicional de 2.4 dB), entonces el diseño de duración puede ser mas difícil en algunas realizaciones. La pérdida más elevada significa que una ganancia más elevada puede ser usada para una separación del amplificador fijo, lo cual puede significar que más ruido puede ser introducido. A su vez, esto puede significar que la potencia de la señal puede ser incrementado o la tasa de bits reducida para mantener el PSR total. Si amplificadores híbridos pueden ser usados en estas ventanas de mayor pérdida, la mejorada CR puede ser usada para contrarrestar las desventajas de la pérdida mayor.

La figura 31 muestra el coeficiente de pérdida (en dB/km) para tres generaciones de fibras. La pérdida por encima de 1600 nm puede ser debido a la absorción infrarroja, mientras que el crecimiento gradual en pérdida por debajo de 1550 nm puede ser debido a la dispersión de Rayleigh. El pico cerca de 1390 nm puede resultar de la absorción de agua de soldaduras OH. Con algunas fibras mas nuevas, las fibras pueden ser mejor secadas, de modo que el pico del agua puede ser reducido. También representado en la figura 31 son bandas diferentes. Las bandas -C y -L pueden extenderse desde aproximadamente 1530-1610 nm, la banda-S desde 1480-1530 nm, y la banda+S desde 1430-1480 nm.

Para algunas realizaciones de tipos de fibra, la pérdida en la banda-S puede ser menor o igual a la pérdida en las bandas -C y -L. Dado que estas tres bandas pueden ser las bandas de pérdida mas bajas, amplificadores discretos pueden ser usados en estas bandas en algunas realizaciones. Por ejemplo, las bandas -C y -L pueden usar EDFAs discretos, mientras que la banda-S puede usar amplificadores Raman.

En la banda+S y mas corta (i.e., longitudes de onda mas cortas que 1480 nm), la pérdida puede elevarse por encima de la pérdida en las bandas-C y -L debido a la dispersión Rayleigh y la absorción de agua. La banda+S y longitudes de onda mas cortas pueden ventajosamente usar ARDs en algunas realizaciones. Dado que estas bandas pueden estar en el lado de la longitud de onda mas corto, ARDs no deben bloquear nuevas expansiones de las bandas en algunas realizaciones. La pérdida en las longitudes de onda cortas puede ser muy alta para estas longitudes de onda para ser usadas en comunicaciones a larga distancia en algunas realizaciones. También, para algunas realizaciones con ARDs usados en el rango de longitud de onda mas allá del pico de absorción de agua (i.e., longitudes de onda entre 1430-1480 nm), los bombeos pueden ser a longitudes de onda aproximadamente de 1340-1380 nm, justo por debajo del pico de agua.

Figuras 32(a), 32(b), 33(a) y 33(b) ilustran varias realizaciones con un modulo de amplificador incorporado en un sistema de transmisión de banda ancha que opera en bandas de longitud de onda múltiple. Amplificadores discretos pueden ser usados en las bandas C, L, S, y combinaciones de los mismos. Un amplificador Raman distribuido o amplificador híbrido pueden ser usados por la banda+S.

En las figuras 32(a) y 32(b) una bombeo es introducido en paralelo con estos amplificadores discretos para implementar varias realizaciones de un amplificador Raman distribuido en la banda+S. En la figura 32(a) un solo MDL es usado para dividir las bandas múltiples mientras que en la figura 32(b) una combinación serial de MDLs es usado para dividir y combinar las bandas.

En las figuras 33(a) y 33(b) una bombeo es introducida en paralelo con estos amplificadores discretos para implementar realizaciones de un amplificador Raman híbrido en la banda+S. En la figura 33(a) un solo MDL es usado para dividir las bandas múltiples mientras que en la figura 33(b) una combinación serial de MDLs es usado para dividir y combinar las bandas.

ES 2 356 393 T3

En otra realización, un sistema de transmisión de fibra de longitud de onda es proporcionado con amplificadores ópticos híbridos de bajo ruido para compensar la pérdida en longitud de onda de 1480 nm o menos o que tienen una pérdida de fibra de 0.03 dB/km o más por encima de la pérdida mínima de la fibra. Una realización proporciona un sistema de transmisión de fibra de banda ancha con amplificadores ópticos distribuidos de bajo ruido para compensar la pérdida en longitud de onda de 1480 nm o menos o que tienen una pérdida de fibra de 0.03 dB/km o más por encima de la pérdida mínima de la fibra. Adicionalmente, otra realización es un sistema de transmisión de fibra de longitud de onda con amplificadores ópticos discretos de bajo ruido para compensar la pérdida en longitud de onda de 1480 nm o menos o que tienen una pérdida de fibra de 0.03 dB/km o más por encima de la pérdida mínima de la fibra. Una nueva realización es un sistema de transmisión de fibra de longitud de onda con amplificadores ópticos híbridos de bajo ruido para compensar la pérdida en longitudes de onda de 1400 a 1480 nm.

ARDs pueden mejorar la CR de un amplificador óptico en algunas realizaciones. Para capacidad de fibra máxima, amplificadores híbridos pueden ser usados en bandas de longitud de onda más cortas, donde la pérdida de fibra va en aumento. Por ejemplo, en longitudes de onda más cortas que 1480 nm donde la pérdida es al menos de 0.03 dB/km mayor que en la mínima pérdida, amplificadores híbridos pueden ser importantes. Amplificadores discretos en las bandas -C, -L y -S y amplificadores híbridos en las bandas +S o bandas de longitud de onda más cortas, pueden expandir el ancho de banda de la fibra más allá de 120 nm.

Algunas realizaciones incluyen fibra de dispersión estándar, i.e., fibras con longitud de onda de dispersión cero alrededor de 1310 nm. La longitud de onda de dispersión cero puede caer en las bandas -S o +S en algunas realizaciones. Por ejemplo, esto es verdadero para la llamada fibra cambiada sin dispersión cero. En estas fibras, puede ser difícil ejecutar canales MDL de longitudes de onda múltiples debido a la diafonía de la mezcla de cuatro ondas. La mezcla de cuatro ondas puede requerir una etapa de coincidencia, y la etapa de coincidencia puede ser fácil de satisfacer en el sector de la longitud de onda de dispersión cero. Una realización es un sistema de transmisión de fibra de banda ancha con fibra sin dispersión cero que tiene longitudes de onda de dispersión cero menor que 1540 nm o mayor que 1560 nm que usa amplificadores ópticos para compensar la pérdida.

MDL puede maximizar la capacidad en cualquier banda dada en algunas realizaciones. Amplificadores híbridos pueden ser útiles en los alrededores de la longitud de onda de dispersión cero en algunas realizaciones. Fibras de fibra cambiada sin dispersión cero pueden tener una longitud de onda de dispersión cero también < 1540 nm o > 1560 nm en algunas realizaciones. Para una operación cerca de la longitud de onda de dispersión cero, ej., $|\lambda - \lambda_0| < 25$ nm, la penalización de mezcla de cuatro ondas puede evitarse usando amplificadores ópticos híbridos en una realización. Dada que la eficacia de la CR de amplificadores híbridos pueden ser más bajos que los amplificadores discretos, los niveles de potencia para las señales pueden reducirse al punto que la mezcla de cuatro ondas no sean más una limitación, en otra realización.

ARDs pueden abordar los problemas de cifra de ruido. Por ejemplo, la pérdida en la entrada degrada la FR de los amplificadores. Contrapropagante ARD en una realización tiene baja ganancia en la entrada, como se muestra en la figura 34(a), un gráfico de ganancia *versus* la longitud para un amplificador. La CR puede ser mejorada aumentando la ganancia al comienzo en algunas realizaciones, como se muestra en la figura 34(b), otro gráfico de la ganancia *versus* la longitud para un amplificador. Un bombeo contrapropagante puede aislar a las fluctuaciones del bombeo de la señal en algunas realizaciones.

La figura 35 es un diagrama esquemático de una realización de un amplificador Raman de cifra de ruido mejorada. Un MDL 3560 tiene un puerto de entrada de señal 3500 y está acoplado a un bombeo de co-propagación 3540. La fibra de ganancia Raman o distribuida 3510 acopla el MDL 3560 y un MDL 3570. El MDL 3570 tiene un puerto de salida de señal 3520 y está acoplado a un bombeo contrapropagante 3550. La frecuencia de bombeo contrapropagante puede ser 1 categoría Raman (~ 13.2 THZ) mayor que la frecuencia de señal en algunas realizaciones, los cuales pueden maximizar el bombeo de contrapropagante a la ganancia de señal. La frecuencia de bombeo contrapropagante pueden ser 2 categorías Raman (~ 26.4 THZ) mayor que la frecuencia de señal, los cuales pueden maximizar la co-propagación a la ganancia de bombeo contrapropagante en algunas realizaciones, y minimiza el bombeo de co-propagación a ganancia de señal.

La figura 36 es un diagrama esquemático de una realización de un ARD, como para la verificación. Un MDL 3630 tiene un puerto de entrada de señal 3600 y está acoplado a 3640, un ejemplar láser de fibra Yb bombeando una unidad de desplazamiento de longitud de onda Raman en cascada con salida en 1311 nm. Una fibra Lucent True wave de 72 km 3610 acopla el MDL 3630 y un MDL 3650. El MDL 3650 tiene un puerto de salida de señal 3620 y un combinador de haz de polarización 3660. El combinador 3660 está acoplado por rejillas 3675 y 3685 por diodos de láser de 1395 nm, 3670 y 3680. En el experimento 1, ambos diodos de láser de 1395 nm están en (290 mW en marcha), y el bombeo 1311 nm está apagado (ganancia diferencial = 10.5 dB @ 1490 nm). En el experimento 2, un diodo de láser de 1395 nm está encendido (145 mW en marcha), y al potencia de bombeo 1311 nm está establecido de modo que la ganancia diferencial es 10.5 dB.

Las figuras 37 y 38 son gráficos de la cifra de ruido óptica, como la realización de la figura 36. La figura 37 muestra los resultados del experimento 2 *versus* el experimento 1, en términos de relación la cifra de ruido óptica (dB) *versus* la longitud de señal (nm). La figura 38 muestra la cifra de ruido óptica (dB) *versus* la longitud de onda (nm) para casos múltiples: CRO 3810 (bombeos de 1311 nm y 1395 nm); CRO 3820 (solo para bombeos de 1395 nm); y pérdida Fibra+MDL 3830 (por referencia).

ES 2 356 393 T3

Otros resultados experimentales fueron que la cifra de ruido eléctrica (CRE) coincidió con la CRO por el caso de bombeo de contrapropagante de 1395 nm; cuando el bombeo co-propagado de 1311 nm fue añadido, la CRE fue observada para ser 10 dB por encima de la CRO para señales de 1490 nm (en frecuencias de ruido medidas > 150 MHz). El ruido de bombeo 1311 nm fue de unos 50 dB por encima del ruido de disparo cuando atenuaba a 0.6 mW.

5 Una transferencia directa de este nivel de ruido a la señal hubiese resultado en una CRE de unos 36 dB por encima de la CRO - por la tanto, unos 26 dB de aislamiento usando un esquema de bombeo doble. Relativamente la ganancia de la señal de co propagación débil el alejamiento de la señal de bombeo pueden reducir considerablemente la magnitud del acoplamiento de la La CR del ARD puede ser mejorado; una cifra de ruido de sistema mejorado de mas de 5 dB de mejoramiento de CRO se puede demostrar en el pico de ganancia Raman de los bombeos contrapropagante

10 de 1395 nm (unos 1486 nm) en algunas realizaciones. Amplificadores Raman discretos o distribuidos puedan ser mejorados. Ruido de bombeo co-propagado puede ser considerablemente suprimido. Unos 26 dB de aislamiento de bombeo de co-propagación se pueden demostrar en una realización. La ganancia de señal puede venir del bombeo de contrapropagante. Un gran bombeo de co-propagación y separación de longitud de onda de señal (unas 2 categorías Raman) pueden llevar a un sustancial bombeo-síñal alejado en algunas realizaciones. La mejora de la cifra de ruido

15 en las longitudes de onda de las bandas C y -L pueden ser medidos, y el rendimiento de otros tipos de fibra distribuida evaluados.

La figura 39 es un diagrama esquemático de una realización de un ARD 3900 tri-banda. Una extensión de fibra 3996 es acoplado a un MDL 3980 y un MDL 3990. El MDL tiene entrada de banda C y L 3982 y salida de banda S 3984. El MDL 3990 tiene salida de banda C y L 3992 y entrada de banda S 3994. El MDL 3980 es acoplado a un MDL 3970. El 3970 es acoplado a un PBC 3960 y un PBC 3962. El MDL 3990 es acoplado a un PBC 3964. El PBC 3960 es acoplado a un diodo de láser de 1396 nm 3902 a través de una rejilla Bragg 3922 y un aislador 3940, y al diodo de láser de 1396 nm 3904 a través de una rejilla Bragg 3924 y un aislador 3942. El PBC 3962 es acoplado al diodo de láser de 1421 nm 3906 a través de una rejilla Bragg 3926 y un aislador 3944, y al diodo de láser de 1421 nm

20 3908 a través de una rejilla Bragg 3928 y un aislador 3946. El PBC 3964 es acoplado al diodo de láser de 1480 nm 3910 a través de una rejilla Bragg 3930 y un aislador 3948, y al diodo de láser de 1480 nm 3912 a través de una rejilla Bragg 3932 y un aislador 3950.

Uno o mas de los siguientes pueden caracterizar algunas realizaciones de ARDs tri-bandas: mas de 100 nm de ancho de banda cubriendo las bandas S, C, y L; usando ambos extremos de fibra para reducir la interacción de bombeo para facilidad relativa manteniendo linealidad de ganancia con potencia de señal variada; mejorada cifra de ruido óptica de unos 3 dB sobre diseños de ARD de un solo termino, como la ganancia Raman se extiende de ambos extremos de la fibra en vez de solo una;

35 ganancia de señal proporcionada por bombeos contrapropagante para cada banda, reduciendo los requerimientos en bombear ruido de amplitud de láser para alcanzar una cifra de ruido eléctrica de alrededor de la cifra de ruido óptica; y un gran alejamiento de la ganancia de co-propagación de la banda C y L.

Una realización de un montaje del amplificador Raman comprende un amplificador Raman, una fuente de bombeo, 40 y una segunda fuente de bombeo. El amplificador Raman puede ser configurado para recibir una señal de al menos una longitud de onda de una fuente de señal. La señal puede viajar en una dirección ascendente en al amplificador Raman. El amplificador Raman puede ser un amplificador Raman distribuido. El amplificador Raman distribuido puede incluir una línea de transmisión de señal. Al menos un parte de la línea de transmisión de señal puede incorporar un medio de ganancia distribuido. El amplificador Raman puede ser un amplificador Raman discreto que incluye un medio de ganancia distribuido. El medio de ganancia distribuido puede ser acoplado a una línea de transmisión de señal. La primera fuente de bombeo puede ser acoplado al amplificador Raman. La primera fuente de bombeo puede ser una fuente de diodos de láser, o incluir una pluralidad de diodos de láser. La primera fuente de bombeo puede producir una salida en el rango de 1380 a 1530 nm, o en el rango de 1450 a 1480 nm. La primera fuente de bombeo puede producir un primer haz de bombeo. El primer haz de bombeo puede viajar en una dirección descendente y puede contrapropagarse respecto a la señal. La segunda fuente de bombeo puede ser acoplado al amplificador Raman. La segunda fuente de bombeo puede ser una fuente de diodos de láser, o incluir una pluralidad de diodos de láser. La segunda fuente de bombeo puede producir una salida en el rango de 1300 a 1430 nm, o en el rango de 1365 a 1390 nm. La segunda fuente de bombeo puede producir un segundo haz de bombeo. El segundo haz de bombeo puede bombear el primer haz de bombeo. Al menos una longitud de onda del segundo haz de bombeo puede ser mas corto

50 que al menos una longitud de onda del primer haz de bombeo. El segundo haz de bombeo puede proporcionar más ganancia al primer haz de bombeo que a la señal. El segundo haz de bombeo puede viajar en la dirección ascendente. La segunda fuente de bombeo puede tener un promedio relativo de intensidad de ruido de menos que -80 dB/Hz. Ejemplares rangos por promedio relativo de intensidad de ruido de menos que -80 dB/Hz pueden ser 1-10 GHz. Otras realizaciones de la segunda fuente de bombeo pueden tener promedio relativo de intensidad de ruido de 100 MHz a 1 GHz menos que -90 dB/Hz, o de 0-100 MHz menos que -100 dB/Hz. Varias realizaciones pueden comprender un MDL acoplado al amplificador Raman. El MDL puede ser acoplado a la primera fuente de bombeo y/o a la segunda fuente de bombeo. Varias realizaciones comprenden un combinador de haz de polarización. El combinador de haz de polarización puede ser acoplado a la pluralidad de diodos de láser.

65 Una realización de un aparato amplificador Raman de etapa múltiple que comprende un primer amplificador, una primera fuente de bombeo, una segunda fuente de bombeo, un segundo amplificador Raman, y una tercera fuente de bombeo. El primer amplificador Raman puede ser un pre amplificador de bajo ruido. El primer amplificador Raman puede ser configurado para recibir una señal de al menos una longitud de onda desde una fuente de señal. La señal

ES 2 356 393 T3

puede viajar en una dirección ascendente en el primer amplificador Raman. El segundo amplificador Raman puede ser un amplificador de potencia. La primera fuente de bombeo puede ser acoplada al primer amplificador Raman. La primera fuente de bombeo puede producir un primer haz de bombeo. El primer haz de bombeo puede viajar en una dirección descendente que es contrapropagante relativa a la señal. La segunda fuente de bombeo puede ser acoplada al primer amplificador Raman. La segunda fuente de bombeo puede tener un promedio relativo de intensidad de ruido de, por ejemplo, menos que -80 dB/Hz, menos que -90 dB/Hz, o menos que -100 dB/Hz. Rangos ejemplares para el promedio de relativo de intensidad de ruido de menos que -80 dB/Hz puede ser de 1-10 GHz. Rangos ejemplares de promedio relativo de intensidad de ruido de menos que -90 dB/Hz puede ser de 100 MHz a 1 GHz. Rangos ejemplares de promedio relativo de intensidad de ruido de menos que -100 dB/Hz puede ser de 0-100 MHz. La segunda fuente de bombeo puede producir un segundo haz de bombeo. El segundo haz de bombeo puede viajar en la dirección ascendente. El segundo haz de bombeo puede bombear el primer haz de bombeo. La tercera fuente de bombeo puede ser acoplada al segundo amplificador Raman. La tercera fuente de bombeo puede producir un tercer haz de bombeo. El tercer haz de bombeo puede viajar en la dirección descendente. Varias realizaciones pueden comprender una cuarta fuente de bombeo. La cuarta fuente de bombeo puede ser acoplada al segundo amplificador Raman. La cuarta fuente de bombeo puede producir un cuarto haz de bombeo que viaja en la dirección ascendente. Varias realizaciones pueden comprender un aislador. El aislador puede ser acoplado al segundo amplificador Raman. El aislador pueden ser posicionado entre el primero y segundo amplificador Raman. Una realización puede comprender un segundo aislador acoplado a una bomba de derivación. Varias realizaciones pueden comprender una bomba de derivación acoplado al primer y segundo amplificador Raman.

Una realización de un montaje amplificador Raman comprende una línea de transmisión óptica, una primera fuente de bombeo, y una segunda fuente de bombeo. La línea de transmisión óptica incluye un primer puerto y un segundo puerto. Al menos una parte de la línea de transmisión óptica puede producir ganancia Raman. Una longitud de la línea de transmisión óptica puede ser al menos 40 kilómetros, o al menos 80 kilómetros. La primera fuente de bombeo puede ser una fuente de diodos de láser. La primera fuente de bombeo puede producir un primer haz de bombeo. El primer haz de bombeo puede estar en el rango de longitud de onda de 1430 a 1530 nm, o en el rango de 1450 a 1510 nm. El primer haz de bombeo puede extraer energía óptica del segundo haz de bombeo. El primer haz de bombeo y una primera señal de longitudes de onda múltiples pueden entrar en el primer puerto y pueden viajar en una dirección descendente desde el primer puerto hacia el segundo puerto. La primera señal de longitudes de onda múltiples puede estar en el rango de 1430 1530 nm, o en el rango de 1480 a 1530 nm. La segunda fuente de bombeo puede ser una fuente de diodos de láser. La segunda fuente de bombeo puede producir un segundo haz de bombeo. El segundo haz de bombeo puede estar en el rango de longitud de onda de 1350 a 1480 nm, o en el rango de 1380 a 1440 nm. El segundo haz de bombeo y una segunda señal de longitudes de onda múltiples pueden entrar al segundo puerto y pueden viajar en una dirección ascendente del segundo puerto al primer puerto. La segunda señal de longitudes de onda múltiples puede estar en el rango de 1525 a 1630 nm, o en el rango de 1525 a 1610 nm. Al menos una parte del segundo haz de bombeo puede bombear el primer haz de bombeo. Al menos una parte de la primera señal de longitudes de onda múltiples puede tener longitudes de onda más cortas que la segunda señal de longitudes de onda. Varias realizaciones pueden comprender un primer MDL y un segundo MDL. El primer MDL puede ser acoplado al primer puerto. El segundo MDL puede ser acoplado al segundo puerto. Varias realizaciones además comprenden al menos un primer combinador de haz de polarización y un segundo combinador de haz de polarización. El primer combinador de haz de polarización puede ser acoplado al primer MDL. El segundo combinador de haz de polarización puede ser acoplado al segundo MDL.

Una realización de un montaje amplificador Raman pueden comprender un amplificador Raman, una primera fuente de bombeo, y una segunda fuente de bombeo. El amplificador Raman puede ser configurado para recibir una señal de al menos una longitud de onda desde una fuente de señal. La señal puede viajar en una dirección ascendente en el amplificador Raman. El amplificador Raman puede ser un amplificador Raman distribuido. El amplificador Raman distribuido puede incluir una línea de transmisión de señal. Al menos una parte de la línea de transmisión de señal puede incorporar un medio de ganancia distribuida. El amplificador Raman puede ser un amplificador Raman discreto. El amplificador Raman discreto puede incluir un medio de ganancia distribuida. El medio de ganancia distribuido puede ser acoplado a la línea de transmisión de señal. La primera fuente de bombeo puede ser una fuente de diodos de láser. La primera fuente de bombeo puede ser acoplado al amplificador Raman. La primera fuente de bombeo puede producir un primer haz de bombeo. El primer haz de bombeo puede viajar en una dirección descendente y puede contrapropagarse respecto a la señal. La segunda fuente de señal puede ser una fuente de diodos de láser. La segunda fuente de bombeo puede estar acoplada al amplificador Raman. La segunda fuente de bombeo puede producir un segundo haz de bombeo. El segundo haz de bombeo puede bombear el primer haz de bombeo. El segundo haz de bombeo puede proporcionar más ganancia al primer haz de bombeo que a la señal. El segundo haz de bombeo puede viajar en la dirección ascendente. Las longitudes de onda del segundo haz de bombeo puede tener uno o mas enlaces con las longitudes de onda del primer haz de bombeo, como ser por lo menos 20 nm mas corto, al menos 40 nm mas corto, no mas que 120 nm mas corto, y/o no mas que 100 nm mas corto. La segunda fuente de bombeo puede tener un promedio relativo de intensidad de ruido de, por ejemplo, menos que -80 dB/Hz, menos que -90 dB/Hz, o menos que -100 dB/Hz. El promedio relativo de intensidad de ruido desde 1-10 GHz puede ser menos que -80 dB/Hz. El promedio relativo de intensidad de ruido de 100 MHz a 1 GHz puede ser menos que -90 dB/Hz. El promedio relativo de intensidad de ruido de 0-100 MHz puede ser menos que -100 sB/Hz. El segundo haz de bombeo puede tener al menos una longitud de onda que es mas corta que al menos un longitud de onda del primer haz de bombeo.

Una realización de un método de amplificación de banda ancha comprende proporcionando un montaje amplificador Raman incluyendo una línea de transmisión óptica con un primer puerto y un segundo puerto, al menos una

ES 2 356 393 T3

parte de la línea de transmisión óptica produciendo ganancia Raman; bombeando el montaje amplificador Raman con al menos un primer haz de bombeo y un segundo haz de bombeo, al menos una parte del segundo haz de bombeo bombeando el primer haz de bombeo; introduciendo una primera señal de longitudes de onda múltiple en el primer puerto y una señal de longitudes de onda múltiple en el segundo puerto; y amplificando la primera y segunda señal de longitudes de onda múltiple. Al menos una parte de la primera señal de longitudes de onda múltiple pueden tener longitudes onda mas cortos que la segunda señal de longitudes de onda múltiple. El primer haz de bombeo y la primera señal de longitudes de onda múltiple pueden entrar al primer puerto y pueden viajar en una dirección descendente desde el primer puerto al segundo puerto. El segundo haz de bombeo y la segunda señal de longitudes de onda múltiple pueden entrar al segundo puerto y pueden viajar en una dirección ascendente desde el segundo puerto al primer puerto. El primer haz de bombeo puede estar en el rango de longitud de onda de 1430 a 1530 nm, o 1450 a 1510 nm, y el segundo haz de bombeo puede estar en el rango de longitud de onda de 1350 a 1480 nm, o 1380 a 1440 nm. La primera señal de longitudes de onda múltiple puede estar en el rango de 1430 a 1530 nm, o 1480 a 1530 nm, y la segunda señal de longitudes de onda múltiple puede estar en el rango de 1525 a 1630 nm. o 1525 a 1610 nm.

Una realización de un método de amplificación de banda ancha comprende proporcionando una primera fuente de bombeo, una segunda fuente de bombeo con un promedio relativo de intensidad de ruido de menos que -80 dB/Hz y un montaje amplificador Raman que incluye una línea de transmisión óptica con un primer puerto y un segundo puerto, al menos una parte de la línea de transmisión óptica produciendo ganancia Raman; bombeando el montaje amplificador Raman en el primer puerto con al menos un primer haz de bombeo y en el segundo puerto con un segundo haz de bombeo, el segundo haz de bombeo teniendo al menos una longitud de onda que es mas corta que al menos una longitud de onda del primer haz de bombeo; introduciendo una de uno o mas longitudes de onda en el segundo puerto; y amplificando la señal. Al menos una parte del segundo haz de bombeo puede bombear el primer haz de bombeo. El primer haz de bombeo puede estar en el rango de longitud de onda de 1430 a 1530 nm, o 1450 a 1510 nm, y el segundo haz de bombeo puede estar en el rango de longitud de onda de 1350 a 1480 nm, o 1380 a 1440 nm.

Una realización de un montaje amplificador Raman puede comprender un amplificador Raman, una primera fuente de bombeo, y una segunda fuente de bombeo. El amplificador Raman puede ser configurado para recibir una señal de al menos una longitud de onda desde una fuente de señal. La señal puede viajar en una dirección ascendente en el amplificador Raman. La dependencia de polarización de la ganancia de señal de la señal puede ser menor que 2 dB. La primera fuente de bombeo puede ser despolarizado por la polarización de codificación. La primera fuente de bombeo puede ser despolarizado por polarización multiplexada de al menos dos fuentes de bombeo. La primera fuente de bombeo puede ser acoplada al amplificador Raman. La primera fuente de bombeo puede producir un primer haz de bombeo que puede viajar en una dirección descendente y puede contrapropagarse respecto a la señal. La primera fuente de bombeo puede ser substancialmente despolarizado. La segunda fuente de bombeo puede ser acoplado al amplificador Raman. La segunda fuente de bombeo puede ser substancialmente despolarizado La segunda fuente de bombeo puede producir un segundo haz de bombeo que viaja en la dirección ascendente y puede bombear el primer haz de bombeo. El segundo haz de bombeo puede proporcionar al menos 5% de la ganancia a al menos una parte de la señal, al menos 5% de la ganancia a la mayoría de longitudes de onda de la señal, al menos 10% de la ganancia a la mayoría de longitudes de onda de la señal, y/o al menos 50% de la ganancia a al menos una parte de la señal.

Mientras que las realizaciones de la invención han sido ilustrados y descritos, que no es la intención que estas realizaciones ilustren y describan todas las formas posibles de la invención. Una señal puede comprender una o mas señales. En una realización, cada una de las señales de uno o mas pueden ser caracterizados por una longitud de onda o un rango de longitud de onda distinto de otras longitudes de onda de señal o otros rangos de longitud de onda de señal, tal como en la división de longitud de onda de multiplexación. Una señal viajando en una dirección, ya sea ascendente o descendente, incluye una señal viajando substancialmente en la dirección, y/o donde una mayoría de la potencia de la señal esta inicialmente viajando en la dirección y/o viajando en la dirección. Una señal viajando en la dirección, ya sea ascendente o descendente, puede estar acompañado por un haz disperso viajando en otra dirección, como la dirección opuesta, debido a los mecanismos lineales y no lineales tales como la dispersión de Rayleigh y/o la dispersión de Brilloun. Mejor dicho, las palabras usadas en la especificación son palabras son palabras de descripción en lugar de limitación, y se entiende que varios cambios pueden ser hechos sin apartarse del alcance de la invención.

55

60

65

ES 2 356 393 T3

REIVINDICACIONES

1. Un aparato amplificador Raman de etapas múltiples, comprendiendo:

5 un primer amplificador Raman configurado para recibir una señal de al menos una longitud de onda viajando en una dirección ascendente en el primer amplificador Raman,

una primera fuente de bombeo acoplada al primer amplificador Raman produciendo un primer haz de bombeo en una dirección descendente que es contrapropagante respecto a la señal;

10 una segunda fuente de bombeo acoplada al primer amplificador Raman produciendo un segundo haz de bombeo que viaja en la dirección ascendente;

15 un segundo amplificador Raman acoplado al primer amplificador Raman y operable para recibir la señal del primer amplificador Raman, donde uno del primer amplificador Raman y el segundo amplificador Raman comprende un amplificador Raman distribuido y el otro del primer amplificador Raman y el segundo amplificador Raman comprende un amplificador Raman discreto; y

20 una tercera fuente de bombeo acoplada al segundo amplificador Raman produciendo un tercer haz de bombeo viajando en la dirección descendente.

25 2. El aparato de la reivindicación 1, donde el primer amplificador Raman comprende una fibra de ganancia Raman con un coeficiente de ganancia no lineal (8) de mas de $3 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$.

3. El aparato de la reivindicación 1 o 2, donde el segundo amplificador Raman comprende una fibra de ganancia Raman con un coeficiente de ganancia no lineal (8) de mas de $3 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$.

30 4. El aparato según una de las reivindicaciones precedentes, donde el segundo haz de bombeo bombea el primer haz de bombeo.

5. El aparato según una de las reivindicaciones precedentes, donde la segunda fuente de bombeo tiene un promedio relativo de intensidad de ruido de menos de -80 dB/Hz.

35 6. El aparato de la reivindicación 5, donde el promedio relativo de intensidad de ruido de 1-10 GHz es menor que -80 dB/Hz.

40 7. El aparato de la reivindicación 5, donde el promedio relativo de intensidad de ruido de 100 MHz a 1 GHz es menor que -90 dB/Hz.

8. El aparato de la reivindicación 5, donde el promedio relativo de intensidad de ruido de 0-100 MHz es menor que -100 dB/Hz.

45 9. El aparato según una de las reivindicaciones precedentes, comprendiendo adicionalmente:

una cuarta fuente de bombeo acoplado al segundo amplificador Raman produciendo un cuarto haz de bombeo que viaja en la dirección ascendente.

50 10. El aparato según una de las reivindicaciones precedentes, donde la tercera fuente de bombeo es la misma que la primera fuente de bombeo, el tercer haz de bombeo siendo un residuo del primer haz de bombeo saliendo a un extremo en sentido descendente del primer amplificador Raman.

55 11. El aparato según una de las reivindicaciones precedentes, donde el primer amplificador Raman es un pre-amplificador de bajo ruido y el segundo amplificador Raman es un amplificador de potencia.

12. El aparato según una de las reivindicaciones precedentes, comprendiendo adicionalmente:

60 un de bombeo acoplado al primer y segundo amplificador Raman.

13. El aparato según a una de las reivindicaciones precedentes, comprendiendo adicionalmente:

65 un primer aislador posicionado entre el primer y segundo amplificador Raman.

ES 2 356 393 T3

14. El aparato según la reivindicación 13, comprendiendo adicionalmente:

un shunt de bombeo acoplado al primer y segundo amplificador Raman; y

5 un segundo aislador acoplado al shunt de bombeo.

15. Un método de amplificación de señal óptica, comprendiendo:

10 recibir en un primer amplificador Raman una señal que tiene al menos una longitud de onda que viaja en una dirección ascendente en el primer amplificador Raman;

introducir al primer amplificador Raman un primer haz de bombeo que viaja en una dirección descendente que es contrapropagante respecto a la señal;

15 introducir al primer amplificador Raman un segundo haz de bombeo que viaja en una dirección ascendente;

recibir en un segundo amplificador Raman del primer amplificador Raman la señal que viaja en una dirección ascendente;

20 introducir al segundo amplificador Raman un tercer haz de bombeo que viaja en una dirección descendente; y

en el que uno del primer amplificador Raman y el segundo amplificador Raman comprende un amplificador Raman distribuido y el otro del primer amplificador Raman y el segundo amplificador Raman comprende un amplificador Raman discreto.

16. El método de la reivindicación 15, donde el segundo haz de bombeo bombea el primer haz de bombeo.

30 17. El método de la reivindicación 15 o 16, donde el segundo haz de bombeo es introducido al primer amplificador Raman por una fuente de bombeo comprendiendo un promedio relativo de intensidad de ruido de menos de -80 dB/Hz.

35 18. El método de la reivindicación 17, donde el promedio relativo de intensidad de ruido de 1-10 GHz es menor que -80 dB/Hz.

19. El método de la reivindicación 17, donde el promedio relativo de intensidad de ruido de 100 MHz a 1 GHz es menor que -90 dB/Hz.

40 20. El método de la reivindicación 17, donde el promedio relativo de intensidad de ruido de 0-100 MHz es menor que -1100 dB/Hz.

21. El método según una de las reivindicaciones 15 - 20, donde el primer amplificador Raman es un pre-amplificador de bajo ruido y el segundo amplificador Raman es un amplificador de potencia.

45 22. El método según una de las reivindicaciones 15 - 21, donde el tercer haz de bombeo es un residuo del primer haz de bombeo saliendo a un extremo en sentido descendente del primer amplificador Raman.

50 23. El método según una de las reivindicaciones 15-22, donde el segundo haz de bombeo es de una categoría n-1 y el primer y tercer haz de bombeo son de una categoría n.

24. El método según una de las reivindicaciones 15-23, comprendiendo adicionalmente:

introducir al segundo amplificador Raman un cuarto haz de bombeo viajando en una dirección ascendente.

55 25. El método según la reivindicación 22, comprendiendo adicionalmente:

acoplar un aislador al segundo amplificador Raman con el fin de pasar al mismo el tercer haz de bombeo.

60 26. El método según a una de las reivindicaciones 15-25, comprendiendo adicionalmente:

acoplar un shunt de bombeo al primer y segundo amplificador Raman.

65 27. El método según la reivindicación 26, comprendiendo adicionalmente:

acopiar un aislador al shunt de bombeo.

ES 2 356 393 T3

28. El método según a una de las reivindicaciones 15-27, comprendiendo adicionalmente:
acoplar un aislador entre el primer y segundo amplificador Raman.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

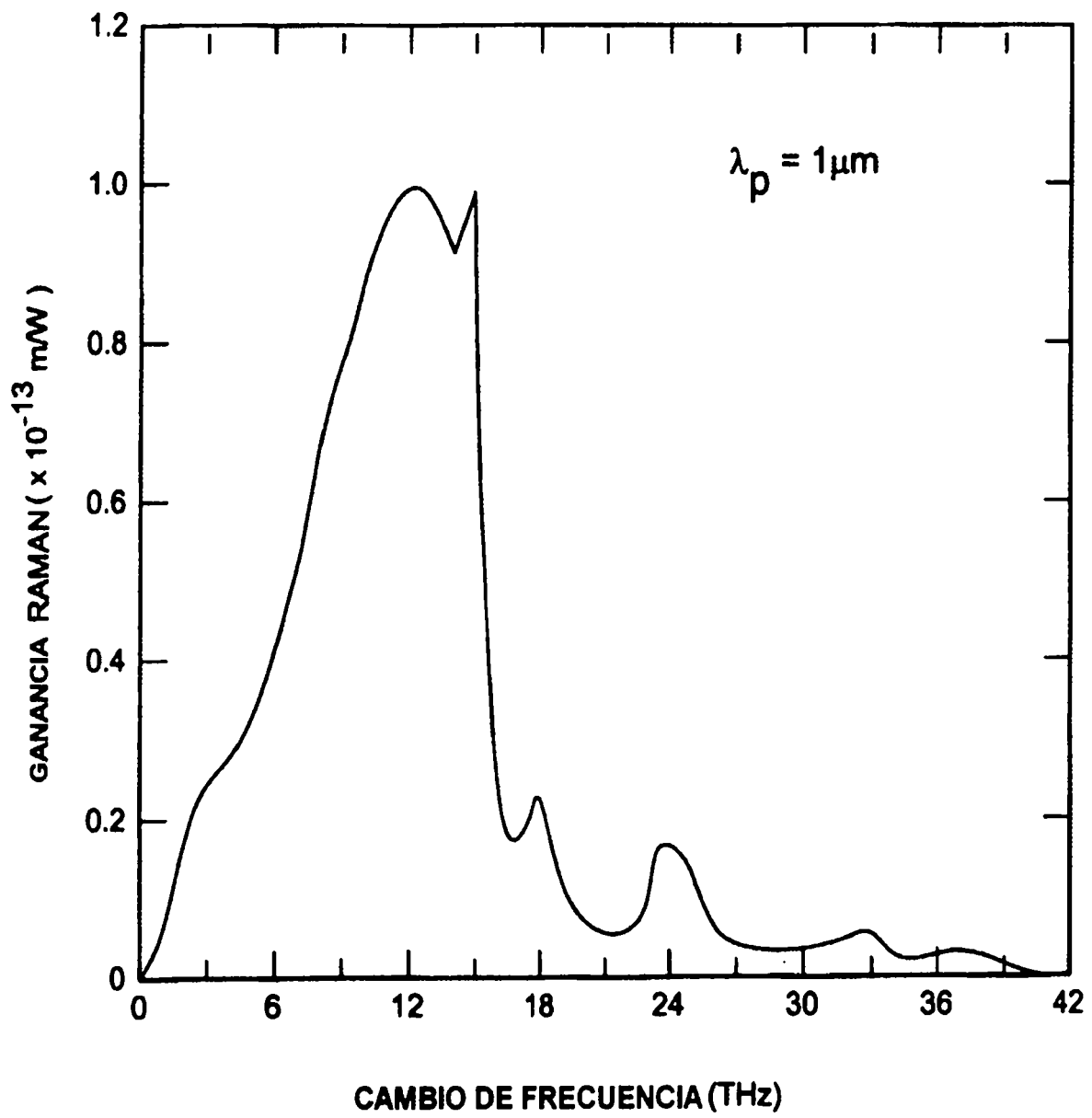


FIG. 1

Frecuencias Raman en Cascada para Diferentes Longitudes de Onda de Bombeo

		Pico Ganancia Raman:		1.32E+13 THz	
		Velocidad de la Luz:		3.00E+17 nm/s	
Longitud de Onda (nm)	$\Delta\lambda$	Longitud de Onda (nm)	$\Delta\lambda$		
1060.00	51.86	1110.00	57.00		
1111.86	57.19	1167.00	63.17		
1169.05	63.39	1230.16	70.40		
1232.44	70.66	1300.56	78.94		
1303.11	79.26	1379.50	89.14		
1382.37	89.53	1468.64	101.46		
1471.90	101.93	1570.10	116.52		
1573.82	117.09	1686.62	135.20		
Longitud de Onda (nm)	$\Delta\lambda$	Longitud de Onda (nm)	$\Delta\lambda$		
1070.00	52.86	1117.00	57.74		
1122.86	58.36	1174.74	64.03		
1181.22	64.76	1238.77	71.41		
1245.98	72.27	1310.18	80.15		
1318.25	81.17	1390.33	90.59		
1399.42	91.82	1480.92	103.22		
1491.25	104.72	1584.15	118.69		
1595.97	120.54	1702.84	137.92		
Longitud de Onda (nm)	$\Delta\lambda$	Longitud de Onda (nm)	$\Delta\lambda$		
1080.00	53.88	1120.00	58.05		
1133.88	59.54	1178.05	64.40		
1193.42	66.14	1242.46	71.85		
1259.56	73.90	1314.31	80.67		
1333.47	83.11	1394.98	91.22		
1416.58	94.16	1486.20	103.99		
1510.74	107.57	1590.19	119.63		
1618.32	124.07	1709.82	139.10		
Longitud de Onda (nm)	$\Delta\lambda$	Longitud de Onda (nm)	$\Delta\lambda$		
1090.00	54.91	1130.00	59.12		
1144.91	60.74	1189.12	65.65		
1205.65	67.54	1254.77	73.32		
1273.19	75.56	1328.10	82.43		
1348.74	85.09	1410.53	93.33		
1433.83	96.55	1503.86	106.56		
1530.38	110.49	1610.42	122.81		
1640.87	127.69	1733.24	143.09		
Longitud de Onda (nm)	$\Delta\lambda$	Longitud de Onda (nm)	$\Delta\lambda$		
1100.00	55.95	1140.00	60.20		
1155.95	61.94	1200.20	66.92		
1217.89	68.96	1267.12	74.82		
1286.85	77.24	1341.93	84.21		
1364.09	87.10	1426.14	95.48		
1451.19	98.98	1521.62	109.18		
1550.17	113.47	1630.81	126.07		
1663.64	131.40	1756.87	147.19		

FIG. 2

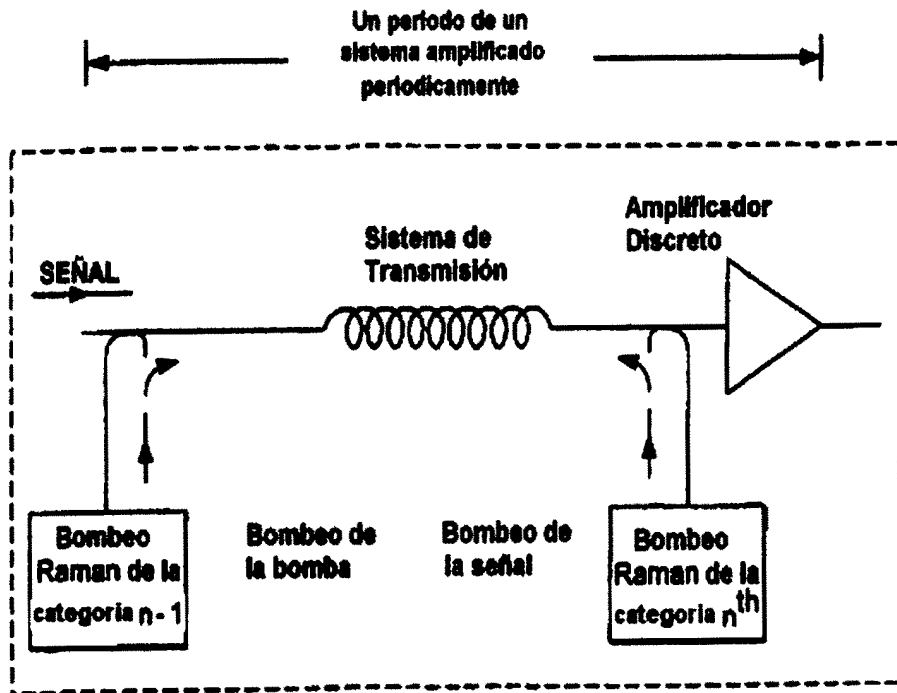


FIG. 3(a)



FIG. 3(b)

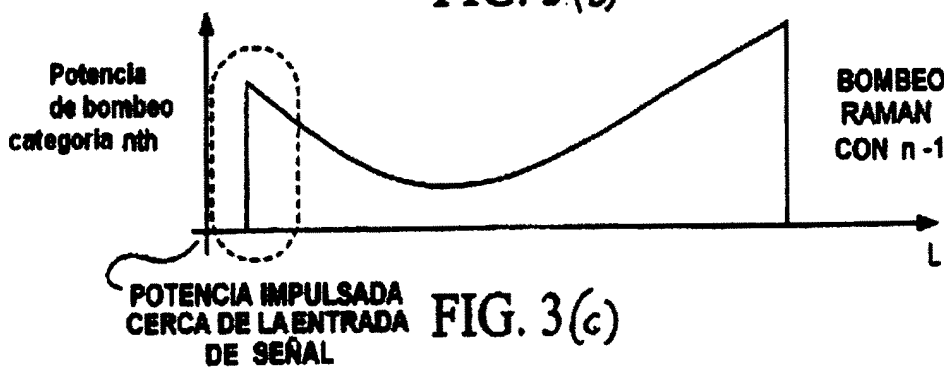


FIG. 3(c)

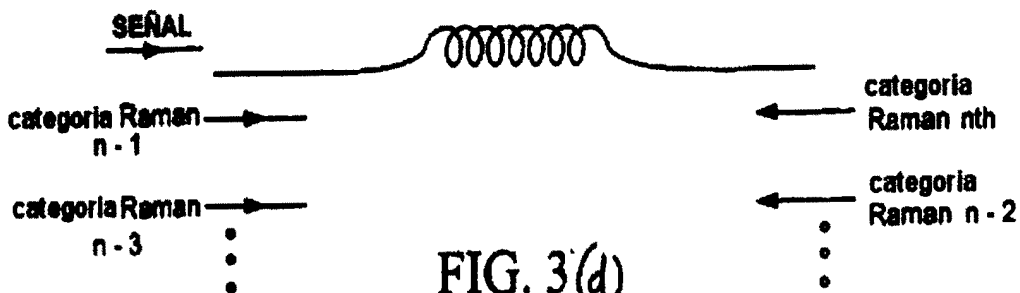
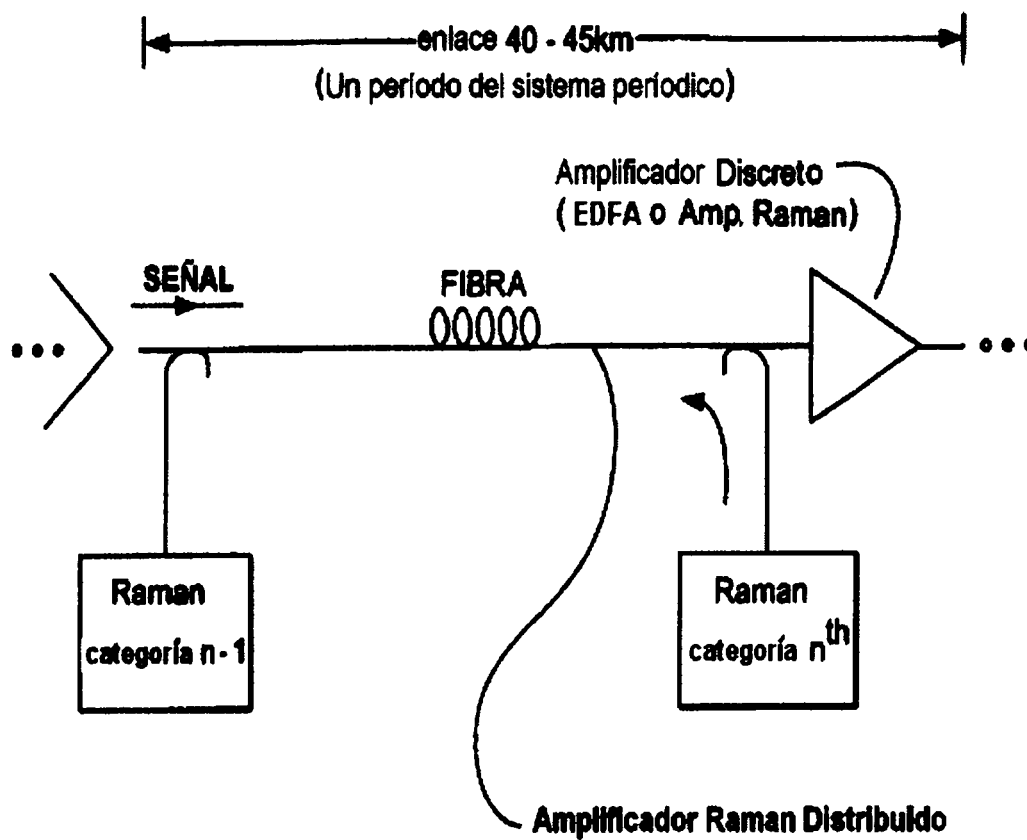


FIG. 3(d)

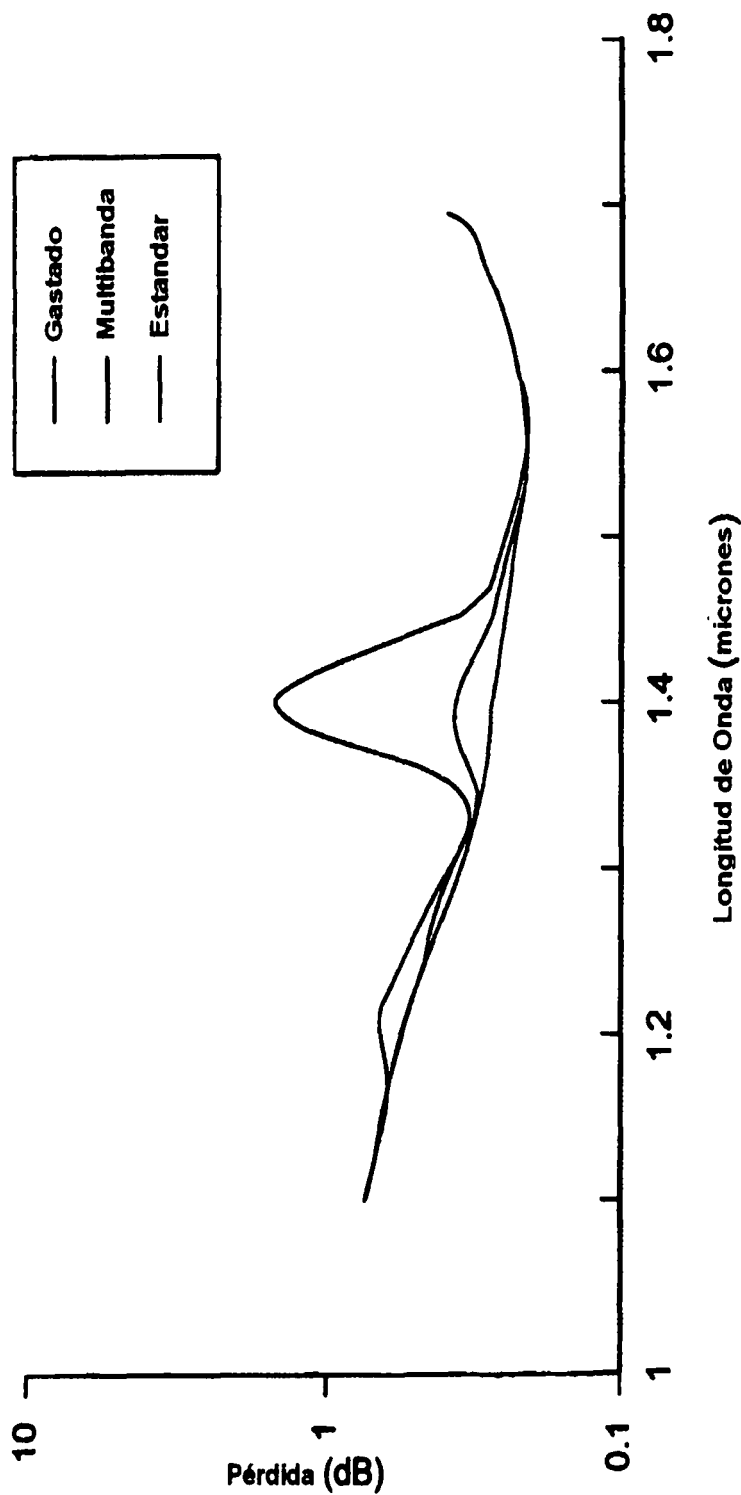


Longitudes de Onda Ejemplares

SEÑAL	~ 1550 nm
CATEGORÍA nth	~ 1450 nm
CATEGORÍA n-1	~ 1365 nm
CATEGORÍA n-2	~ 1287 nm
CATEGORÍA n-3	~ 1218 nm
CATEGORÍA n-4	~ 1155 nm
CATEGORÍA n-5	~ 1100 nm

FIG. 4

ATENUACIÓN DE FIBRA ÓPTICA



Mejoras en los resultados de fabricación de fibra <0.40 dB/km 400nm/~50THz
 en una ventana de transmisión más grande : <0.30 dB/km 300nm/ ~38THz
 <0.25 dB/km 200nm/ ~25THz

FIG. 5

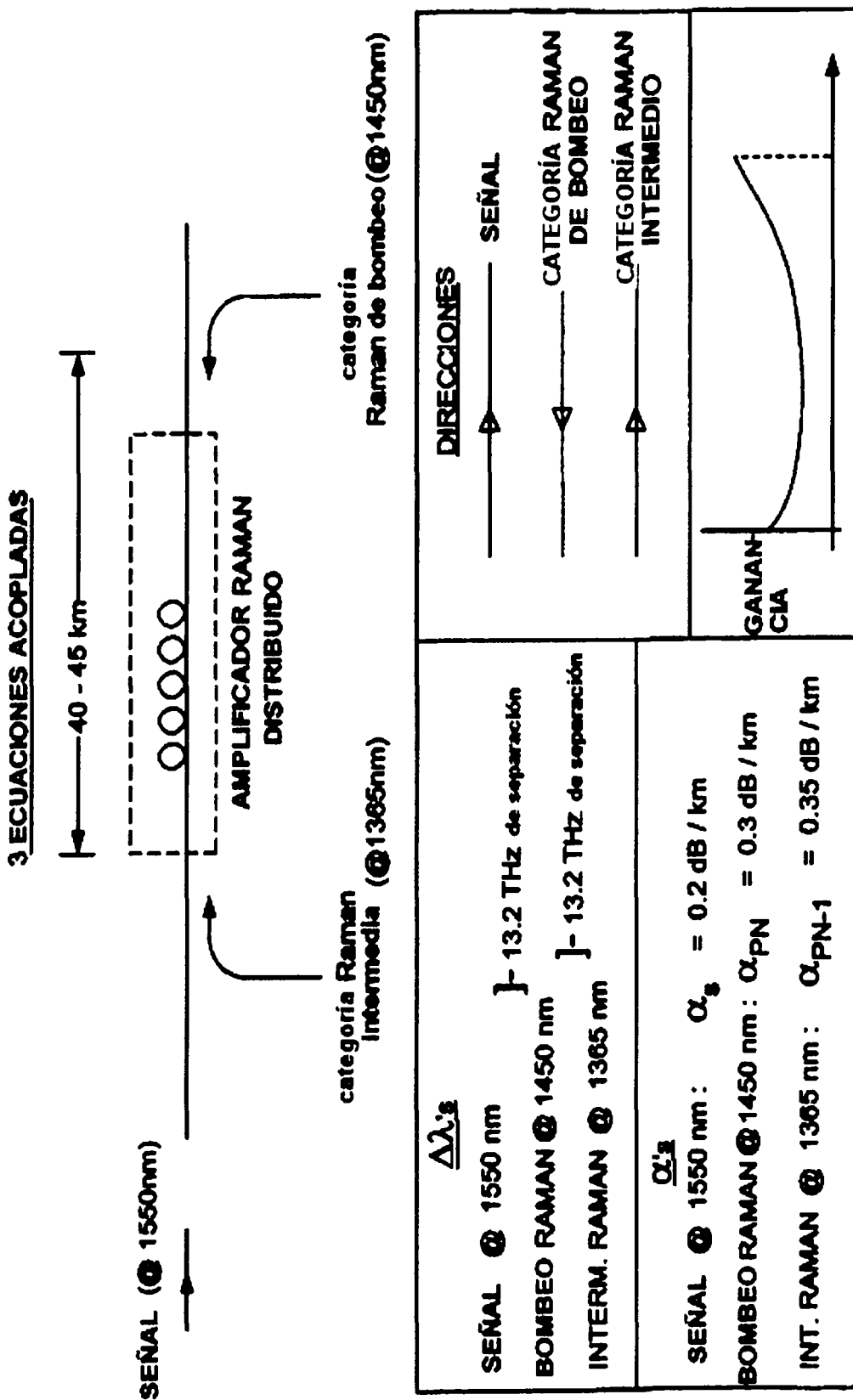


FIG. 6

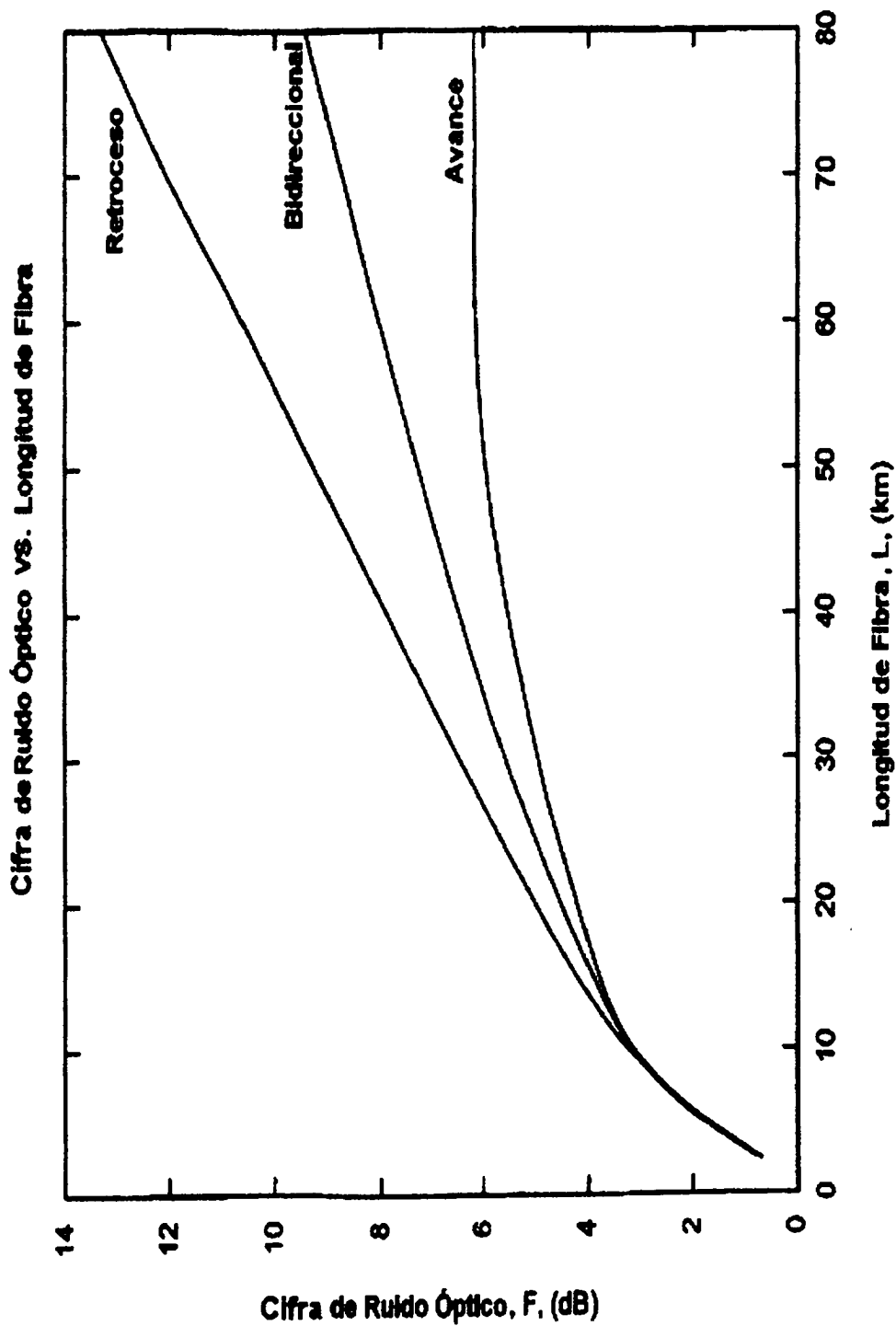



FIG. 7

2.0000	0.7342	0.7348	0.7338
4.0000	1.3614	1.3655	1.3589
6.0000	1.9085	1.9205	1.9009
8.0000	2.3931	2.4184	2.3769
10.0000	2.8278	2.8723	2.7989
12.0000	3.2217	3.2912	3.1758
14.0000	3.5814	3.6824	3.5141
16.0000	3.9124	4.0510	3.8190
18.0000	4.2188	4.4012	4.0945
20.0000	4.5040	4.7364	4.3439
22.0000	4.7705	5.0591	4.5700
24.0000	5.0208	5.3717	4.7750
26.0000	5.2568	5.6759	4.9608
28.0000	5.4801	5.9732	5.1292
30.0000	5.6920	6.2650	5.2815
32.0000	5.8938	6.5522	5.4191
34.0000	6.0865	6.8358	5.5430
36.0000	6.2710	7.1166	5.6544
38.0000	6.4483	7.3953	5.7540
40.0000	6.6190	7.6724	5.8428
42.0000	6.7837	7.9485	5.9216
44.0000	6.9432	8.2239	5.9910
46.0000	7.0979	8.4992	6.0517
48.0000	7.2483	8.7745	6.1043
50.0000	7.3949	9.0502	6.1495
52.0000	7.5381	9.3265	6.1877
54.0000	7.6783	9.6036	6.2195
56.0000	7.8158	9.8817	6.2453
58.0000	7.9511	10.1609	6.2655
60.0000	8.0842	10.4414	6.2807
62.0000	8.2357	10.7233	6.2912
64.0000	8.3457	11.0067	6.2925
66.0000	8.4744	11.2916	6.2947
68.0000	8.6021	11.5781	6.2984
70.0000	8.7290	11.8662	6.2936
72.0000	8.8552	12.1560	6.2863
74.0000	8.9810	12.4475	6.2760
76.0000	9.1065	12.7408	6.2634
78.0000	9.2319	13.0357	6.2486
80.0000	9.3573	13.3324	6.2320



BIDIRECCIONAL
RETROCESO
AVANCE

FIG. 8

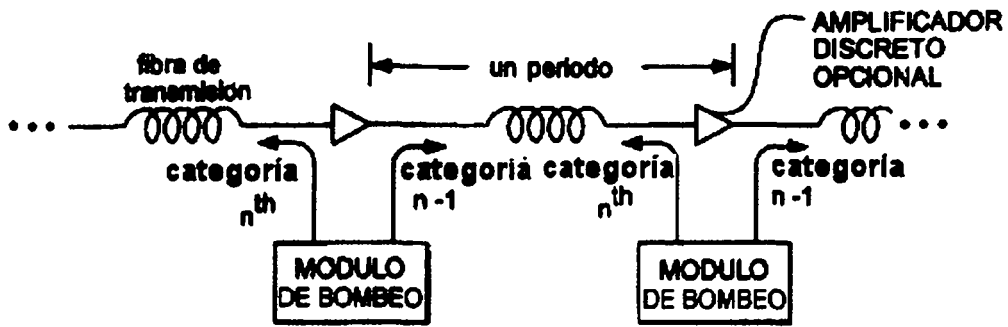


FIG. 9(a)



FIG. 9(b)

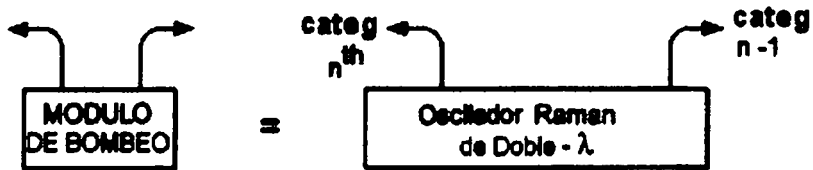


FIG. 9(c)

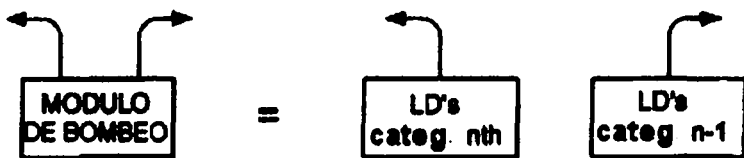


FIG. 9(d)

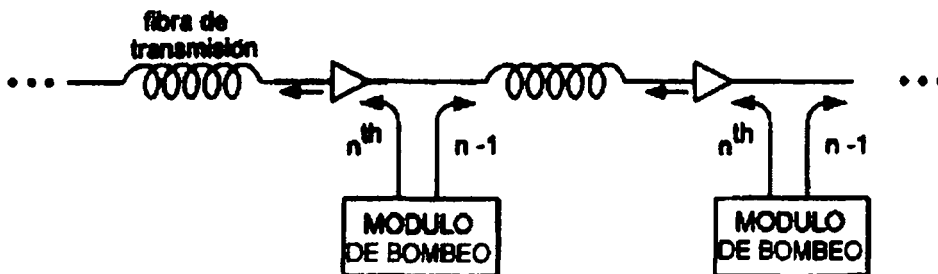
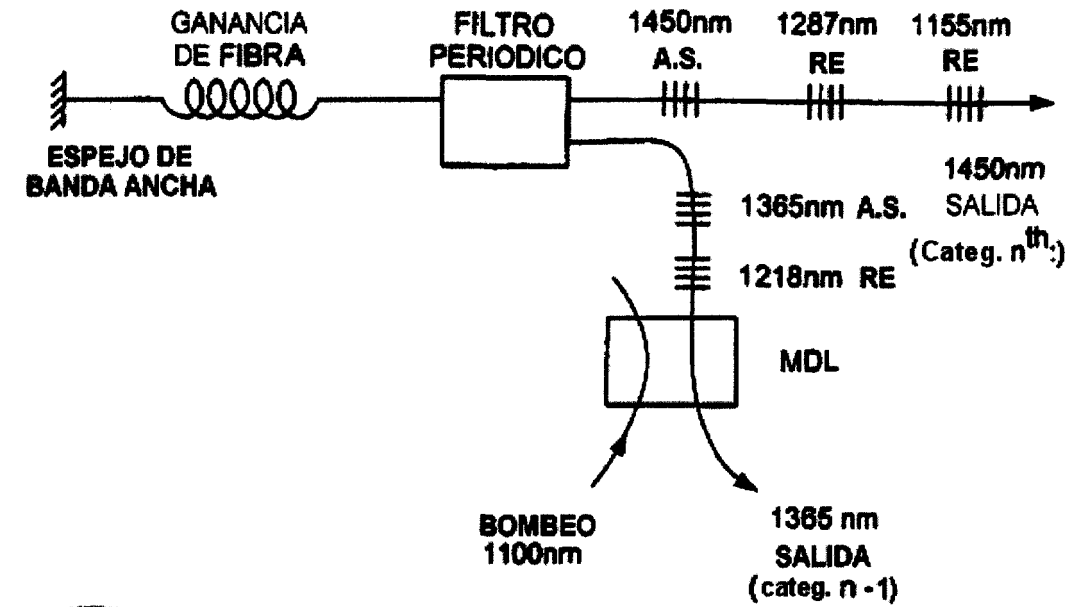


FIG. 9(e)



CATEGORÍA nth	~	nm
n - 1	~	1365
n - 2	~	1287
n - 3	~	1218
n - 4	~	1155
n - 5	~	1100

R. E. = reflector elevado
 A. S. = ACOPLADOR DE SALIDA
 (Transmisión normal 5 - 30 %)

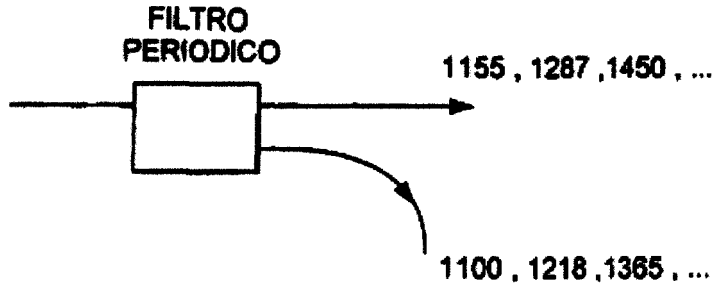


FIG. 10

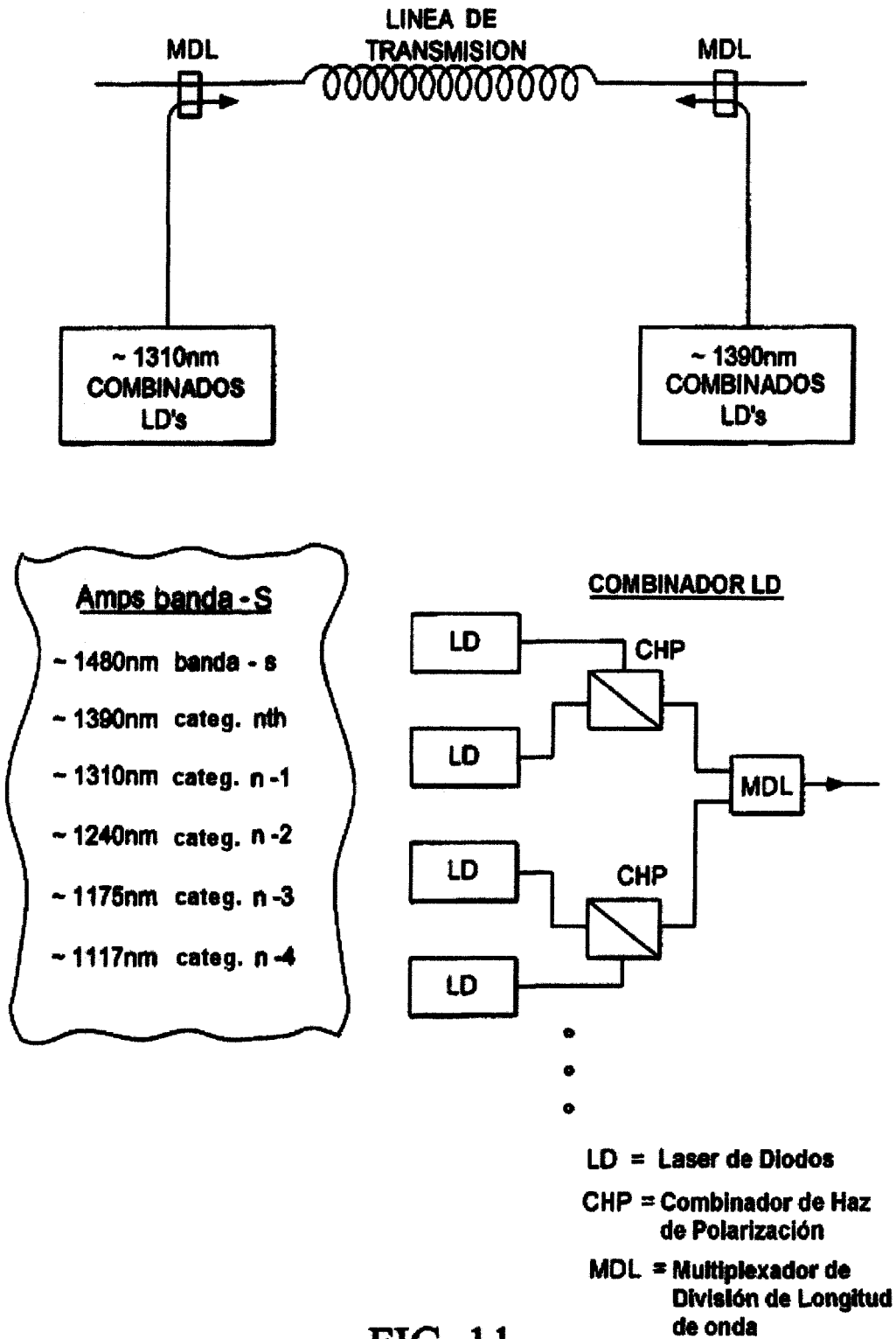


FIG. 11

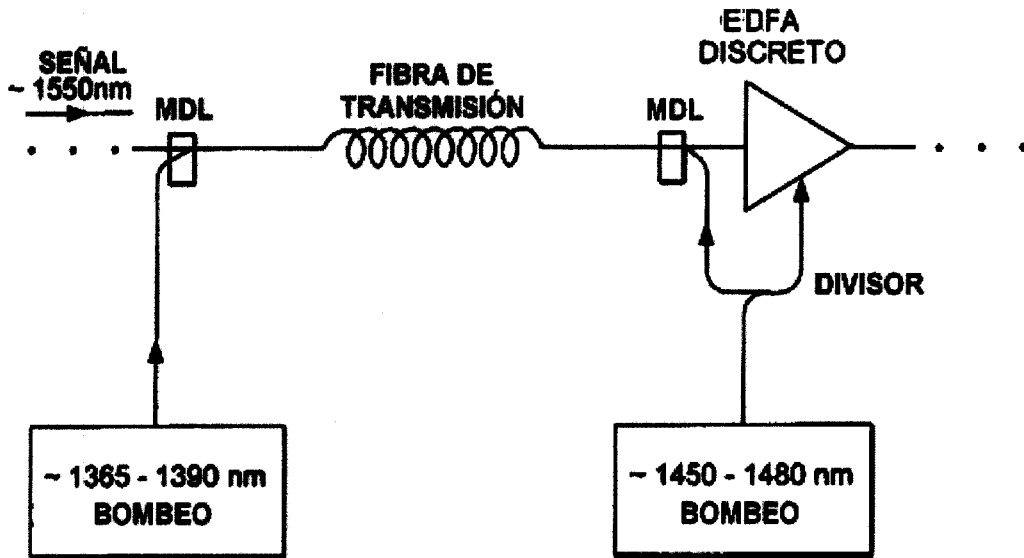


FIG. 12(a)

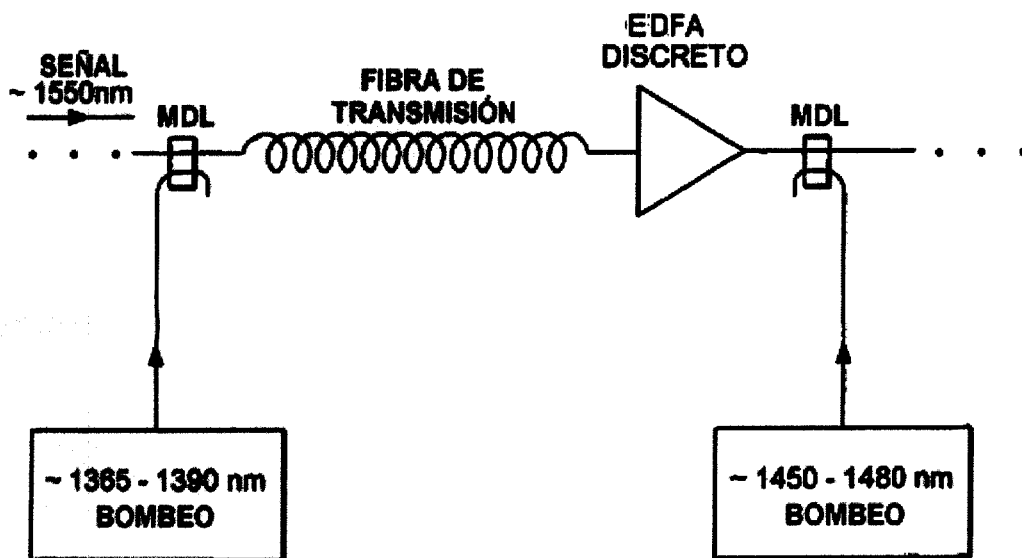


FIG. 12(b)

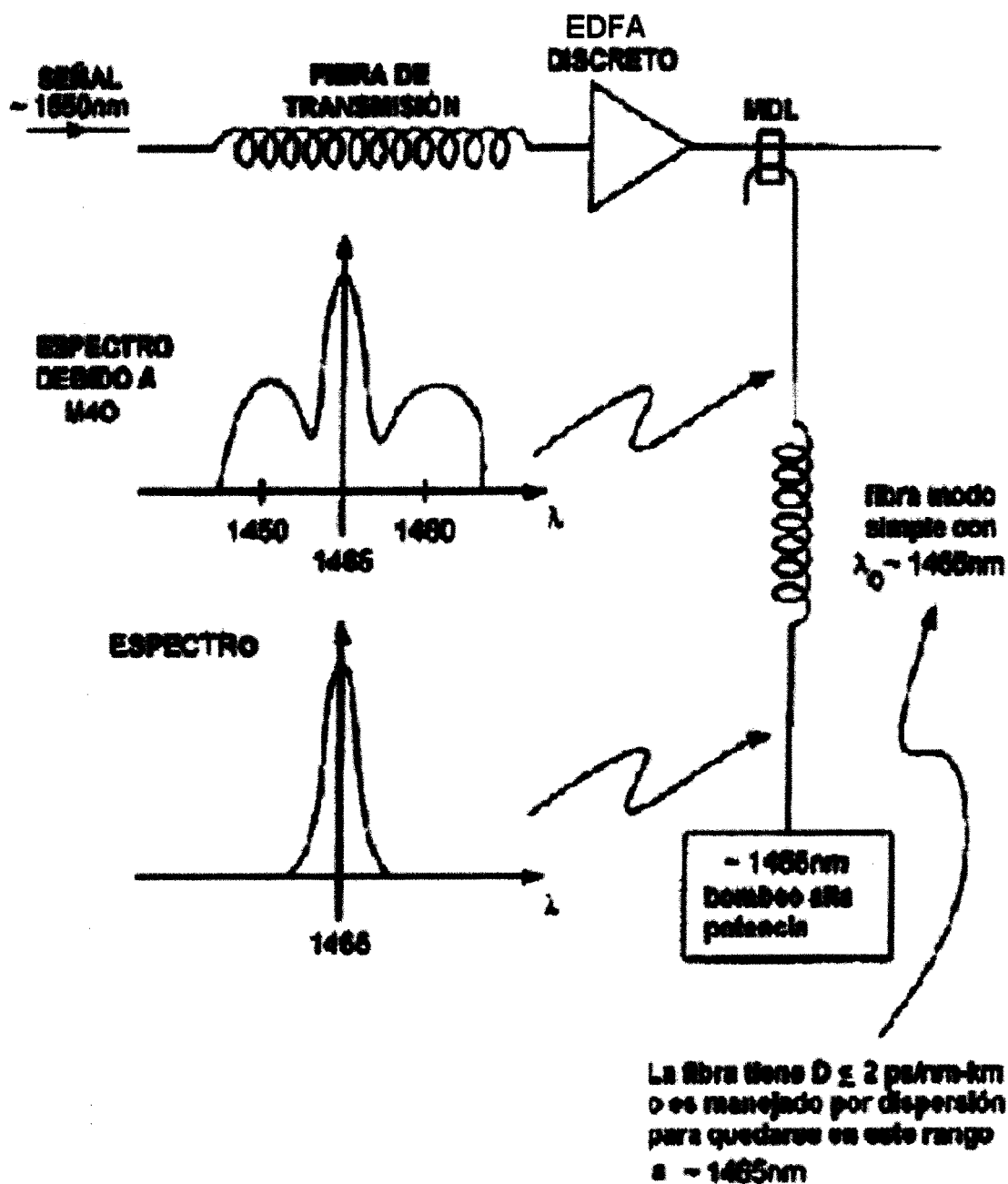


FIG. 13

Amplificador Raman Discreto de Fase Simple

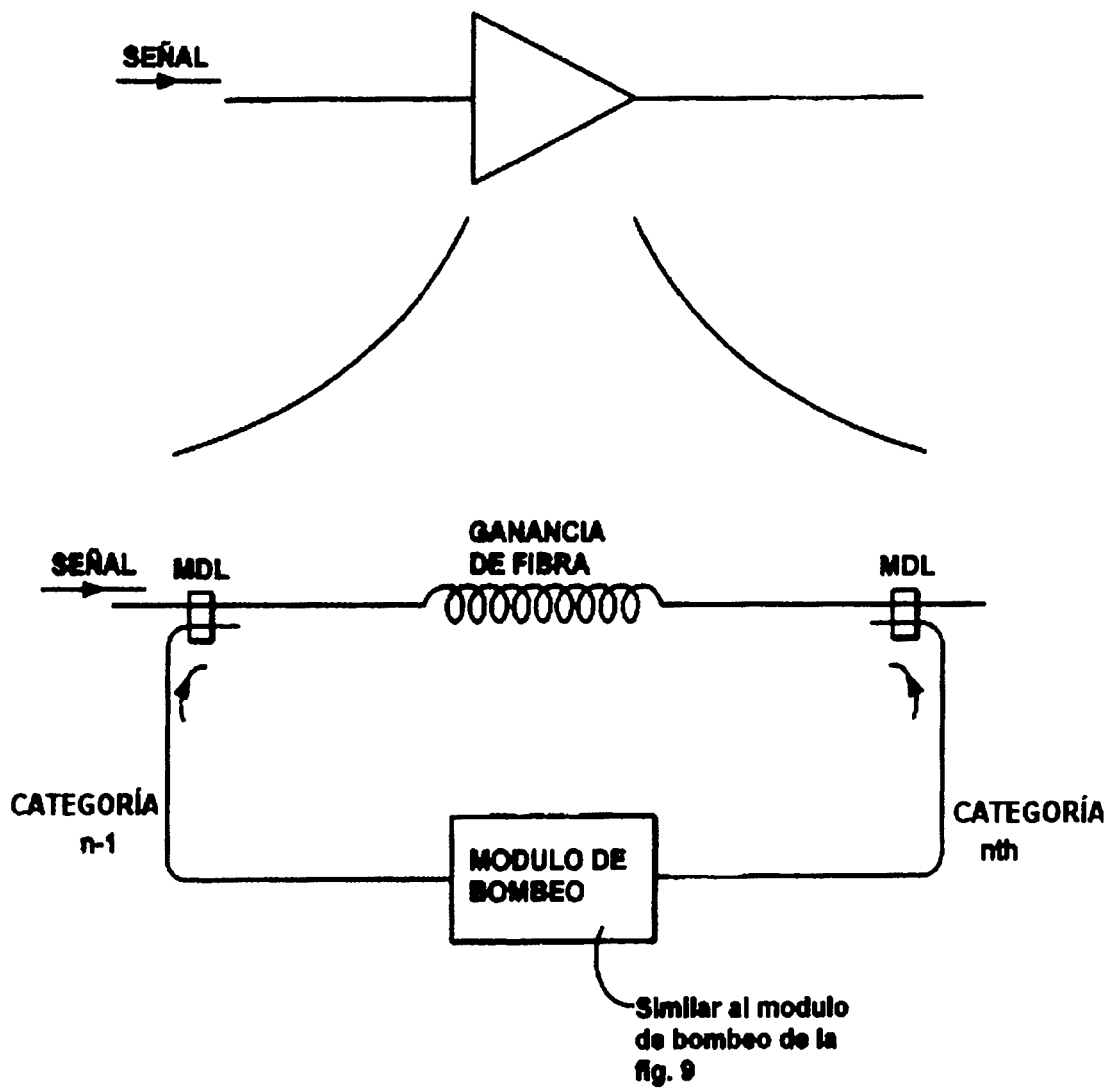


FIG. 14

AMPS RAMAN DE DOS FASES

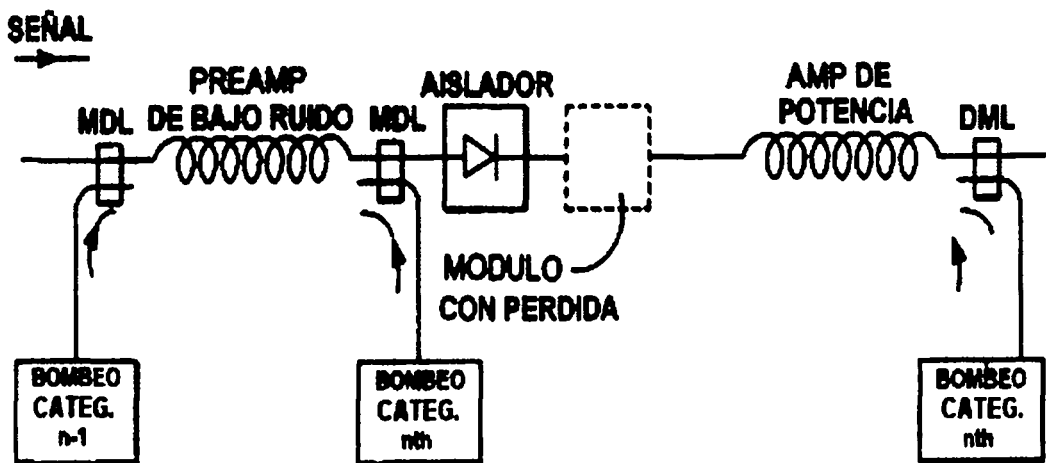


FIG. 15(a)

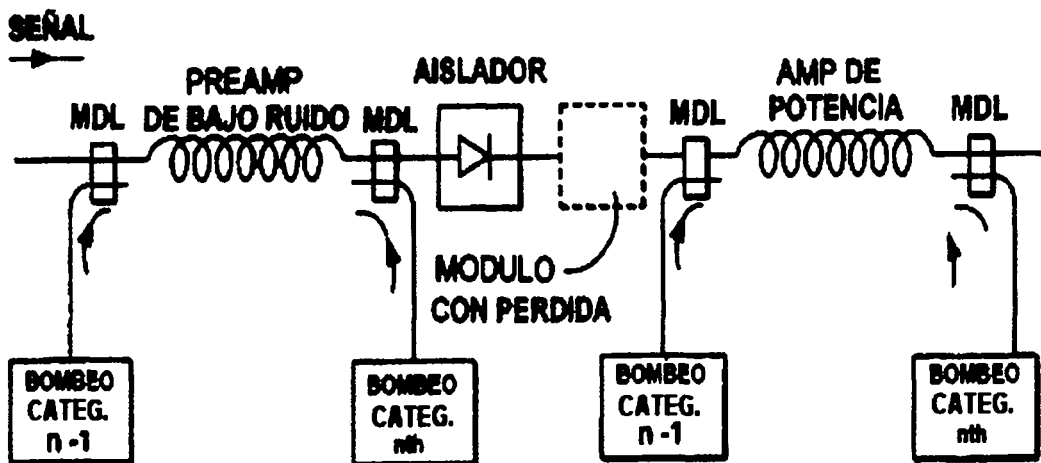


FIG. 15(b)

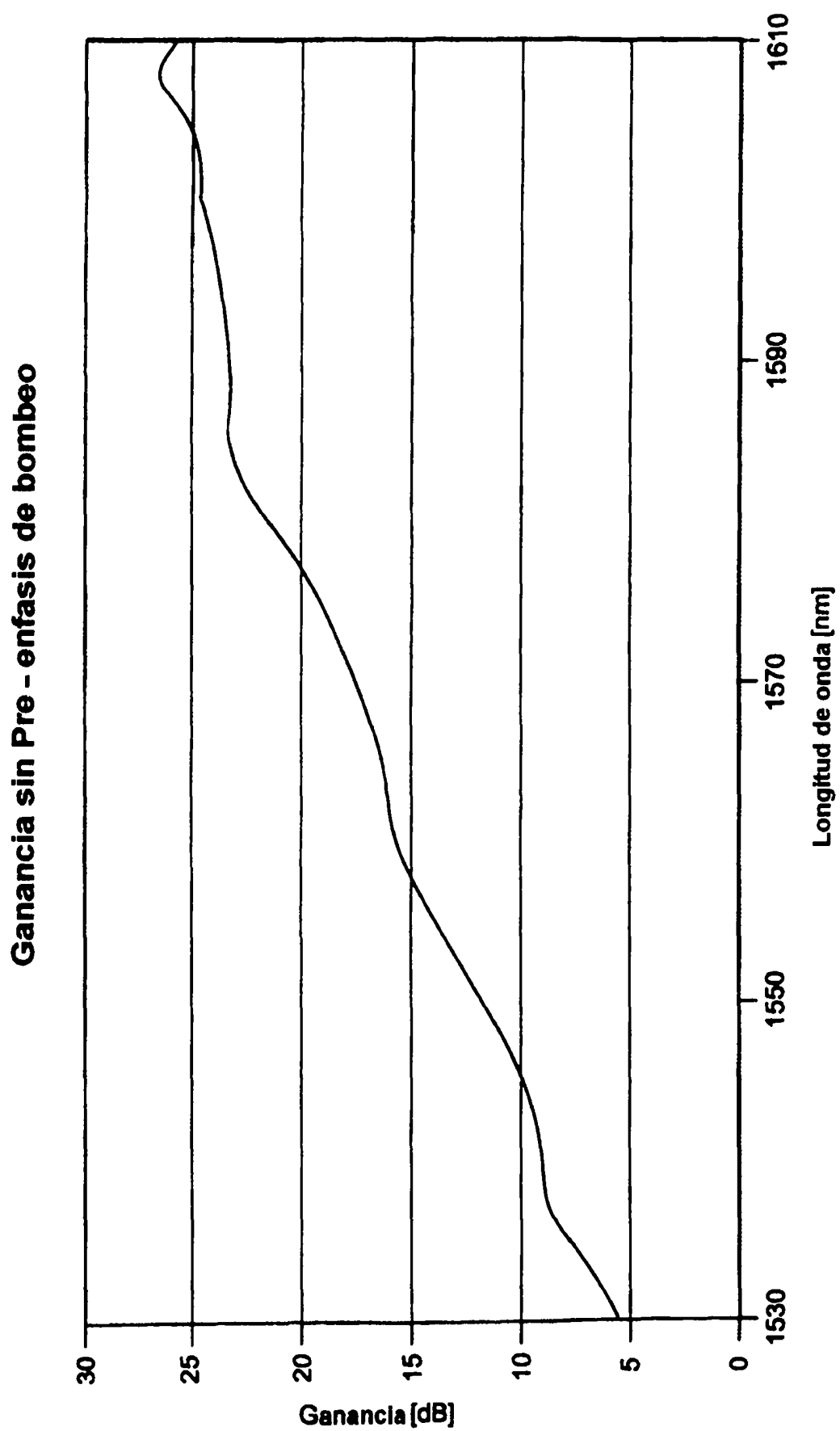


FIG. 17

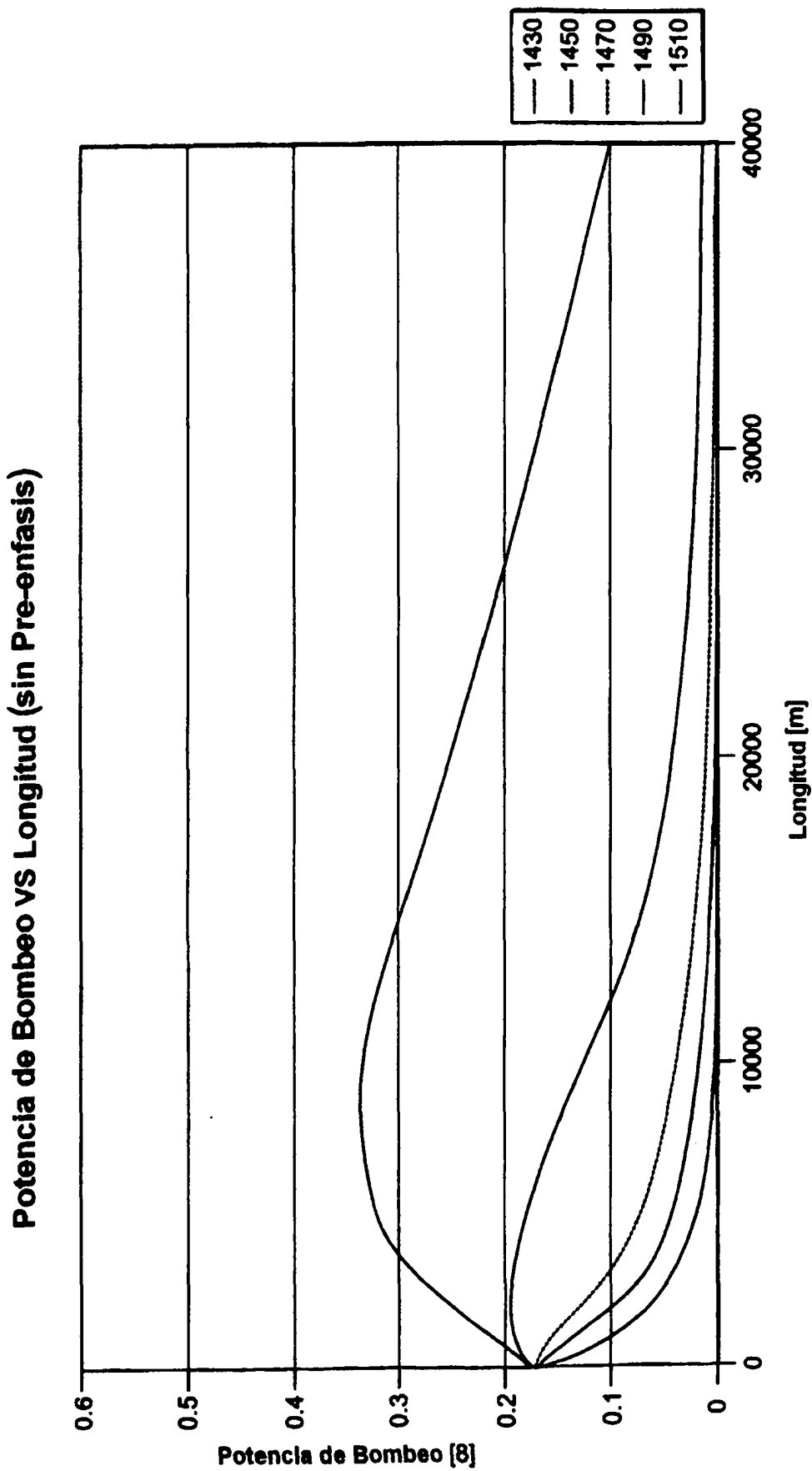


FIG. 18

Ganancia con Pre-enfasis de bombeo

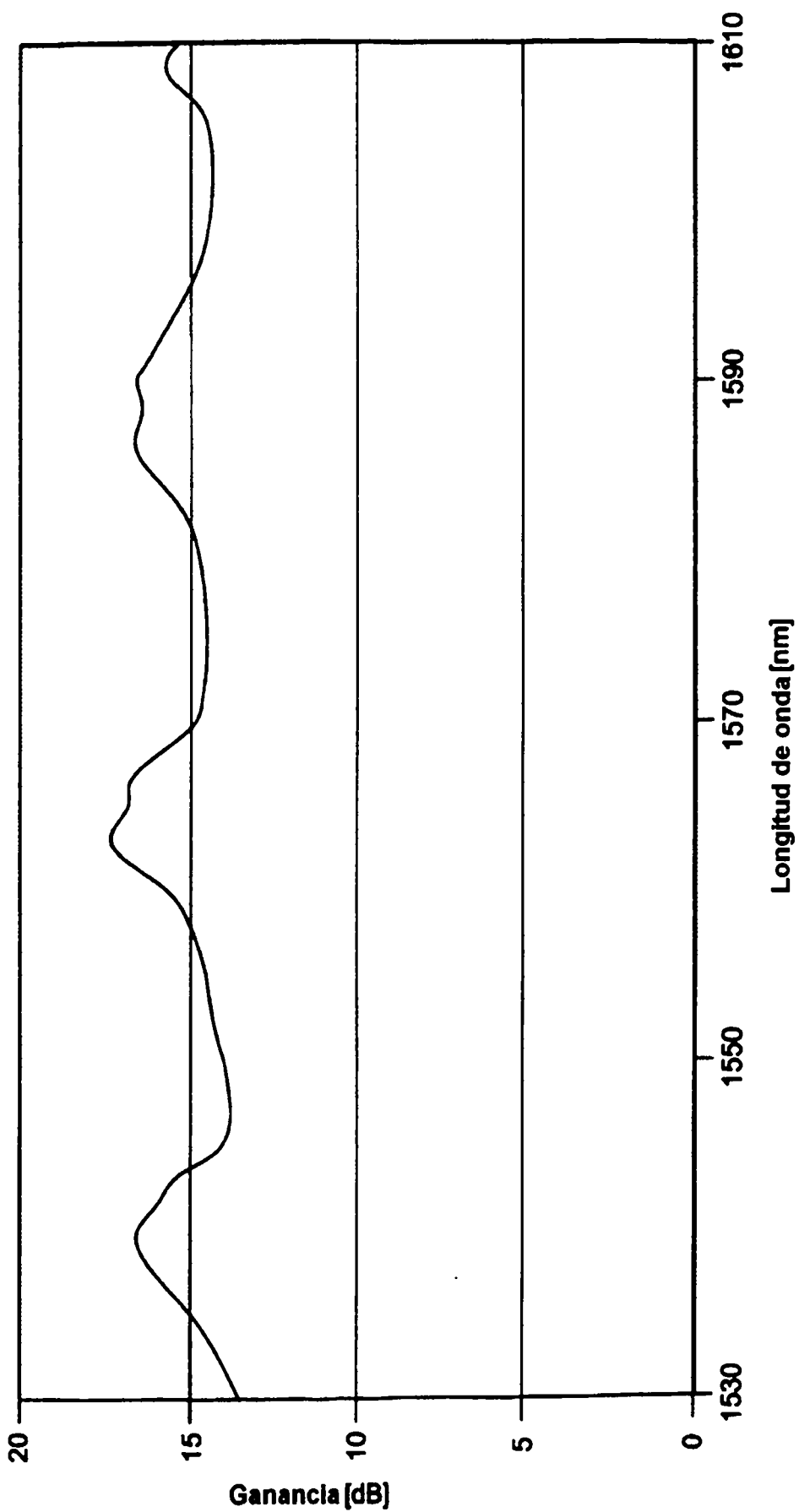


FIG. 19

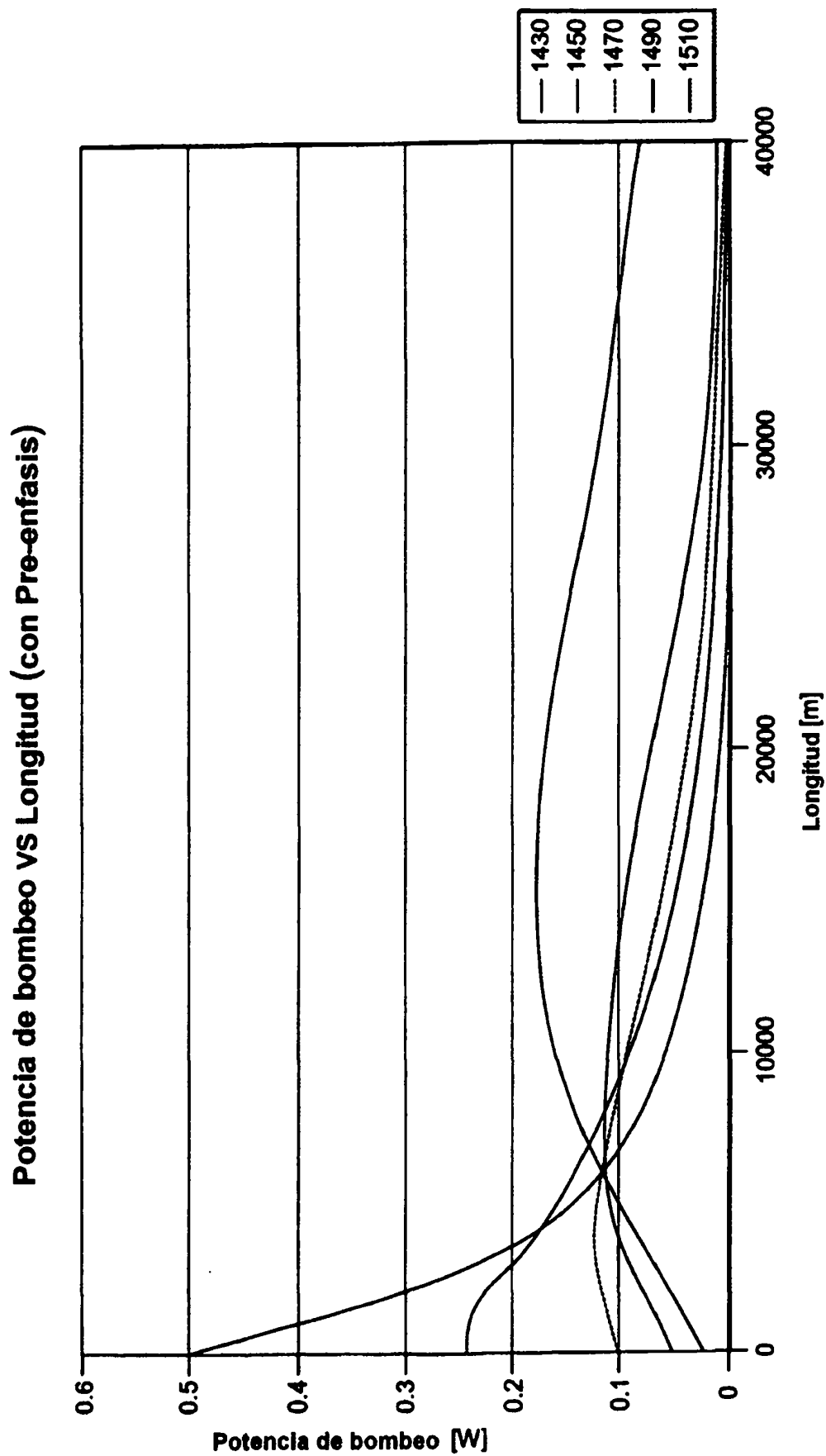


FIG. 20

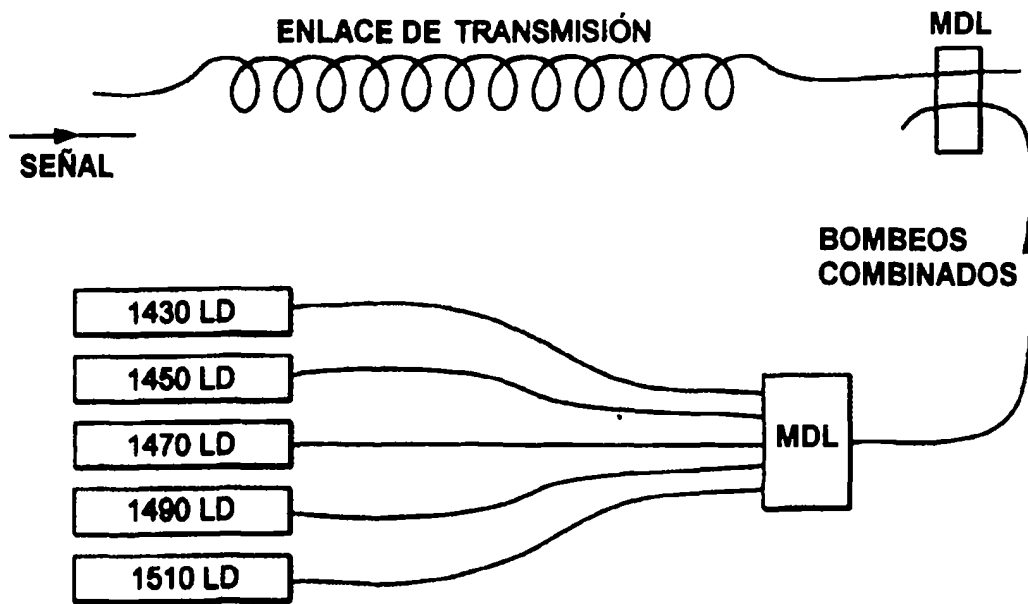


FIG. 21 (a)

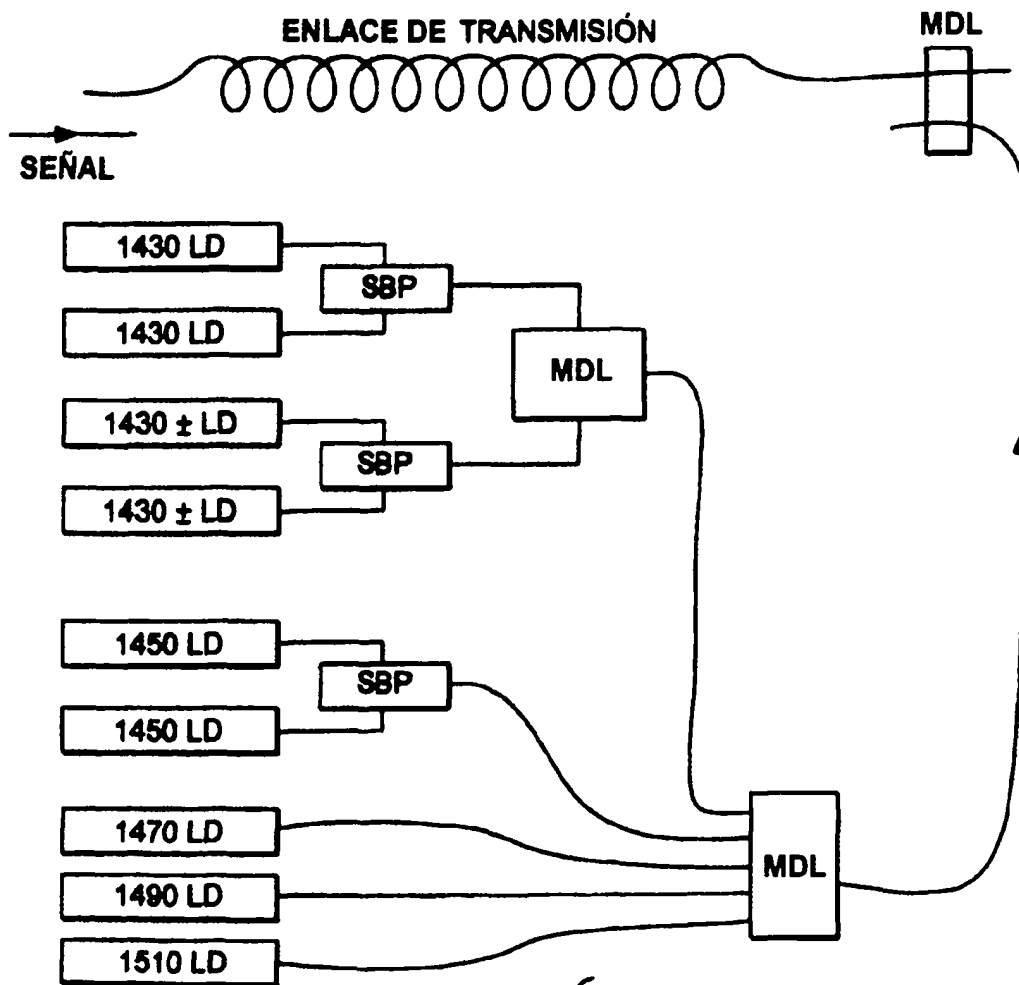


FIG. 21 (b)

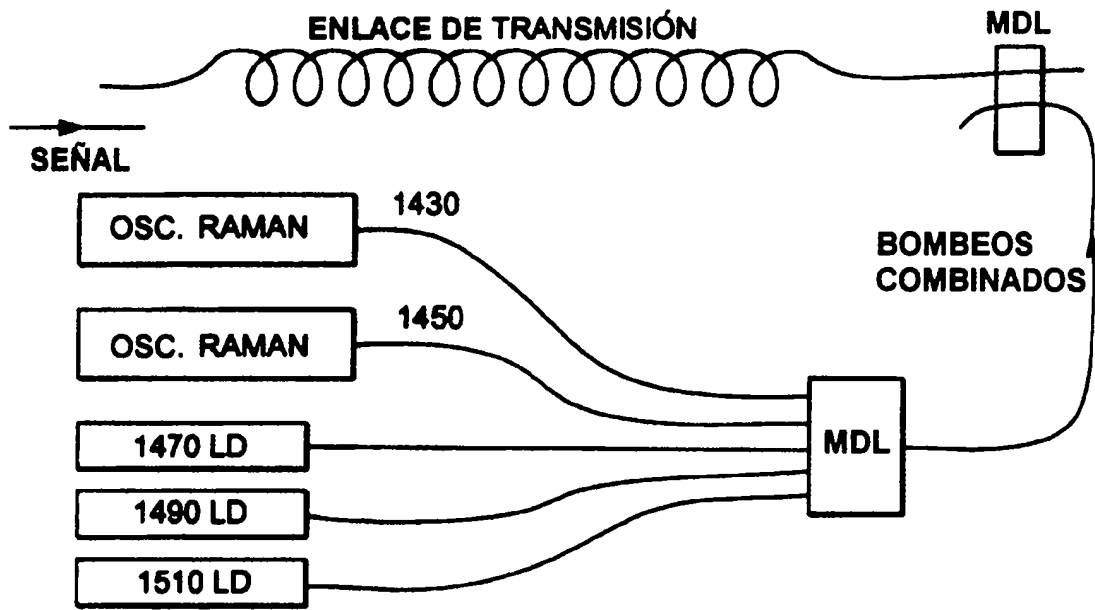


FIG. 22(a)

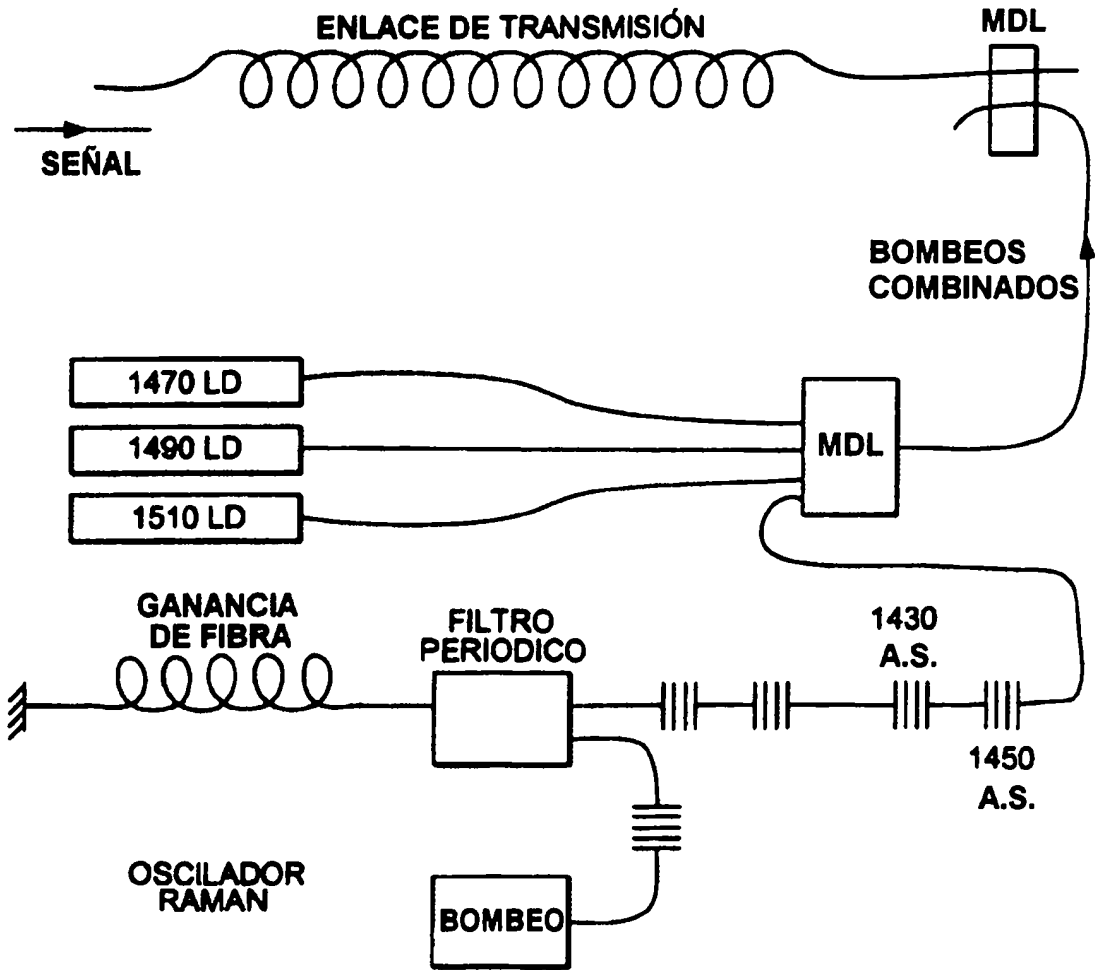


FIG. 22(b)

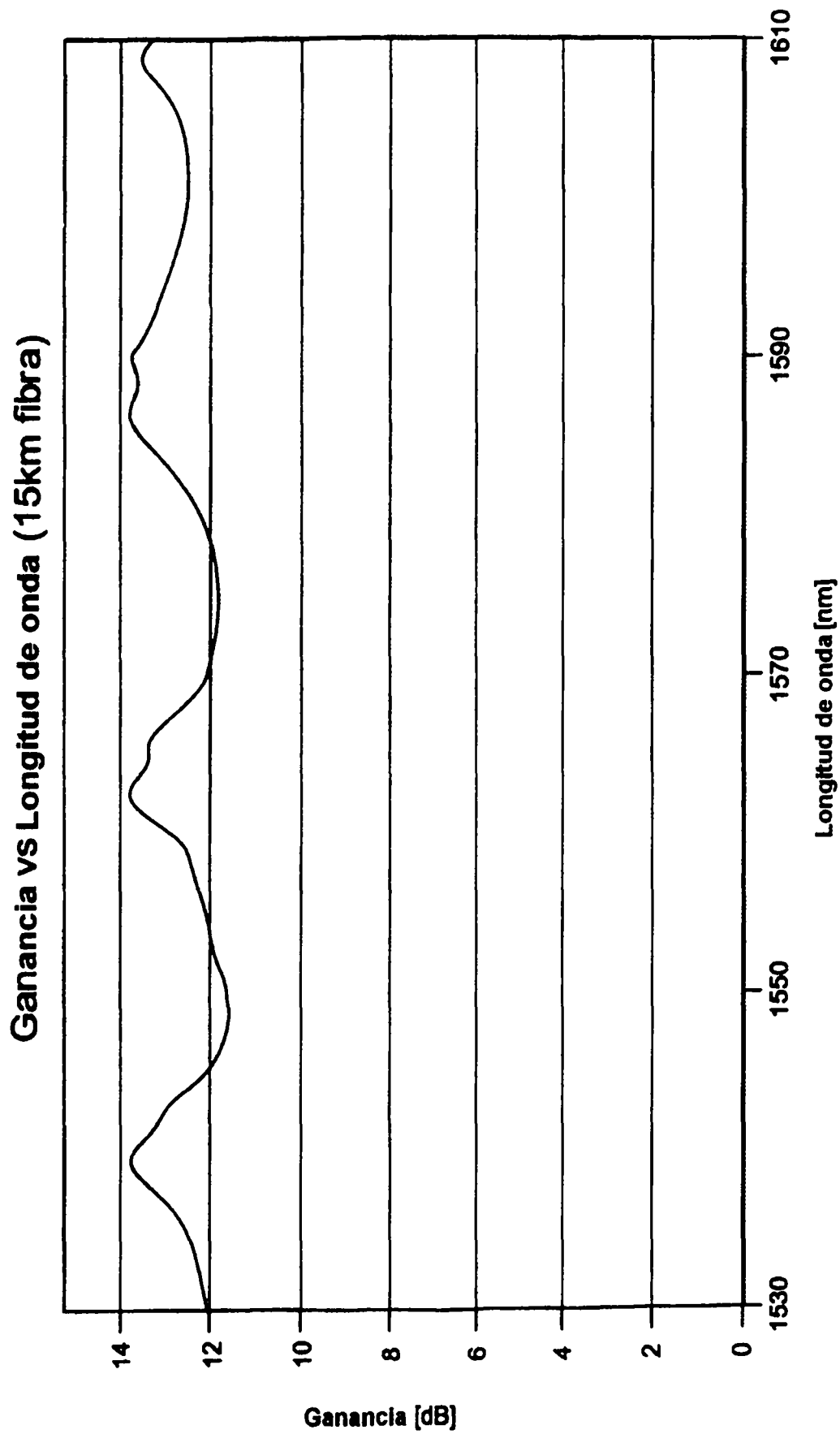
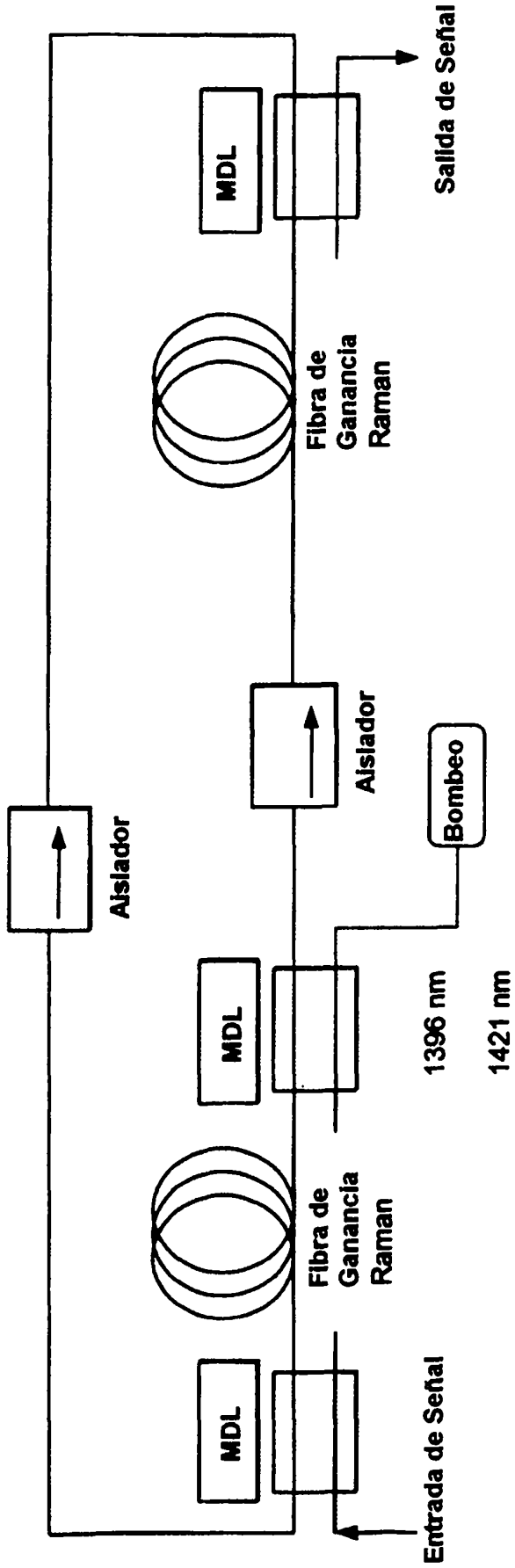


FIG. 23

Diseño de amplificador de Fase Doble



- La primera fase es un preamp. de bajo ruido
- La segunda fase es un amplificador de potencia, reduciendo potencia de bombeo
- Aisladores reducen la interferencia de ruta multiple (IRM) de doble difusión Rayleigh

FIG. 24

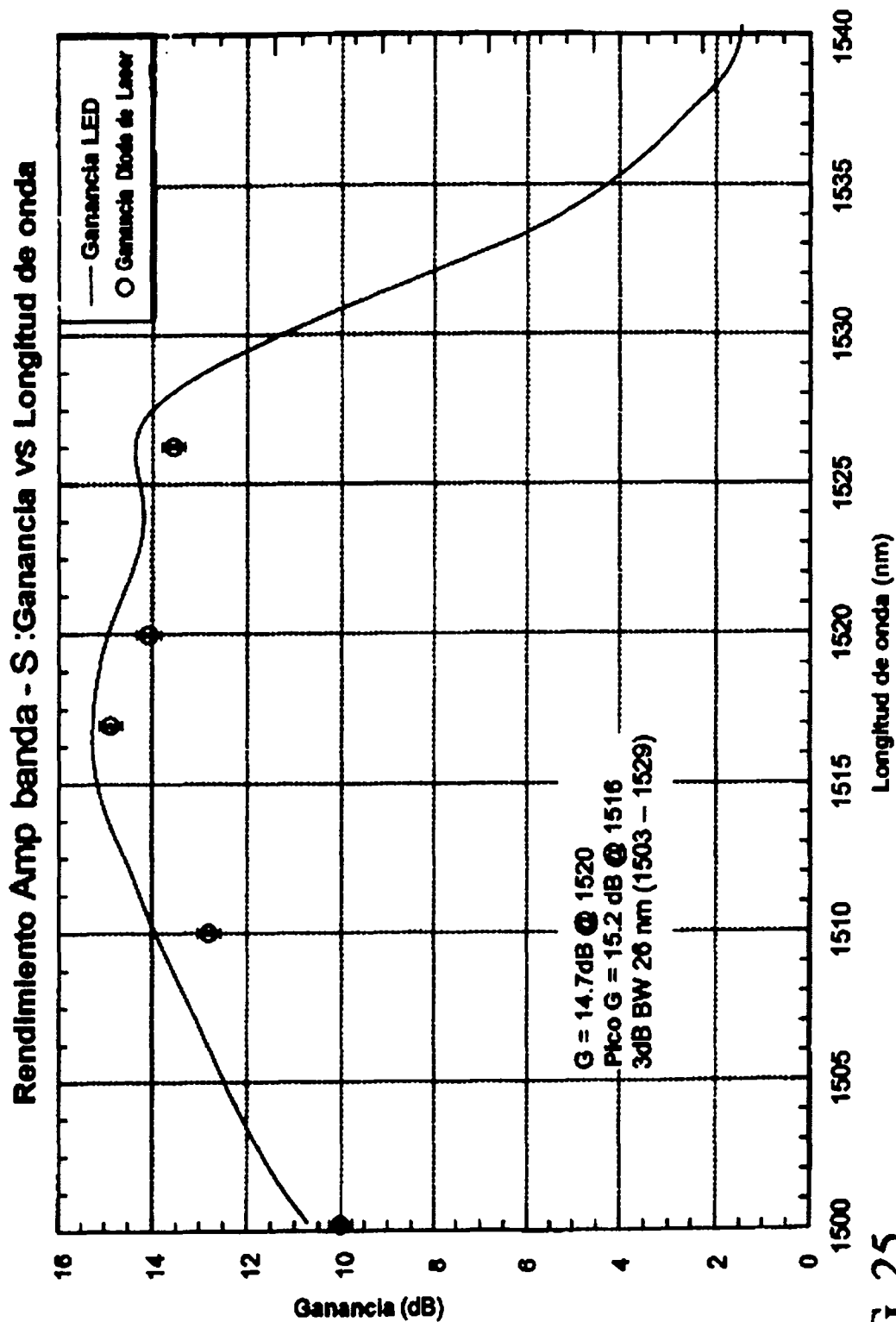


FIG. 25

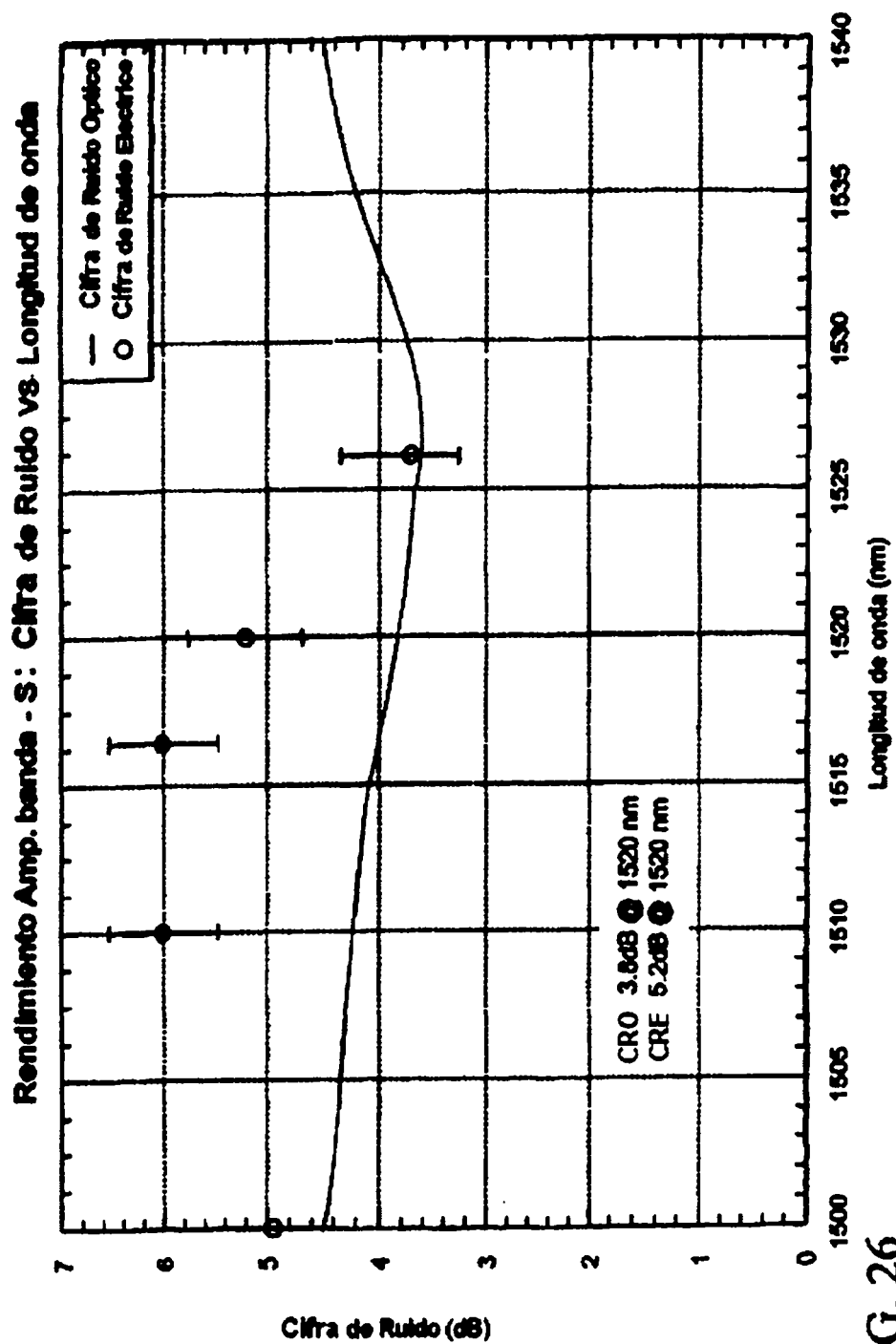


FIG. 26

Crecimiento en el Numero de Canales de MDL

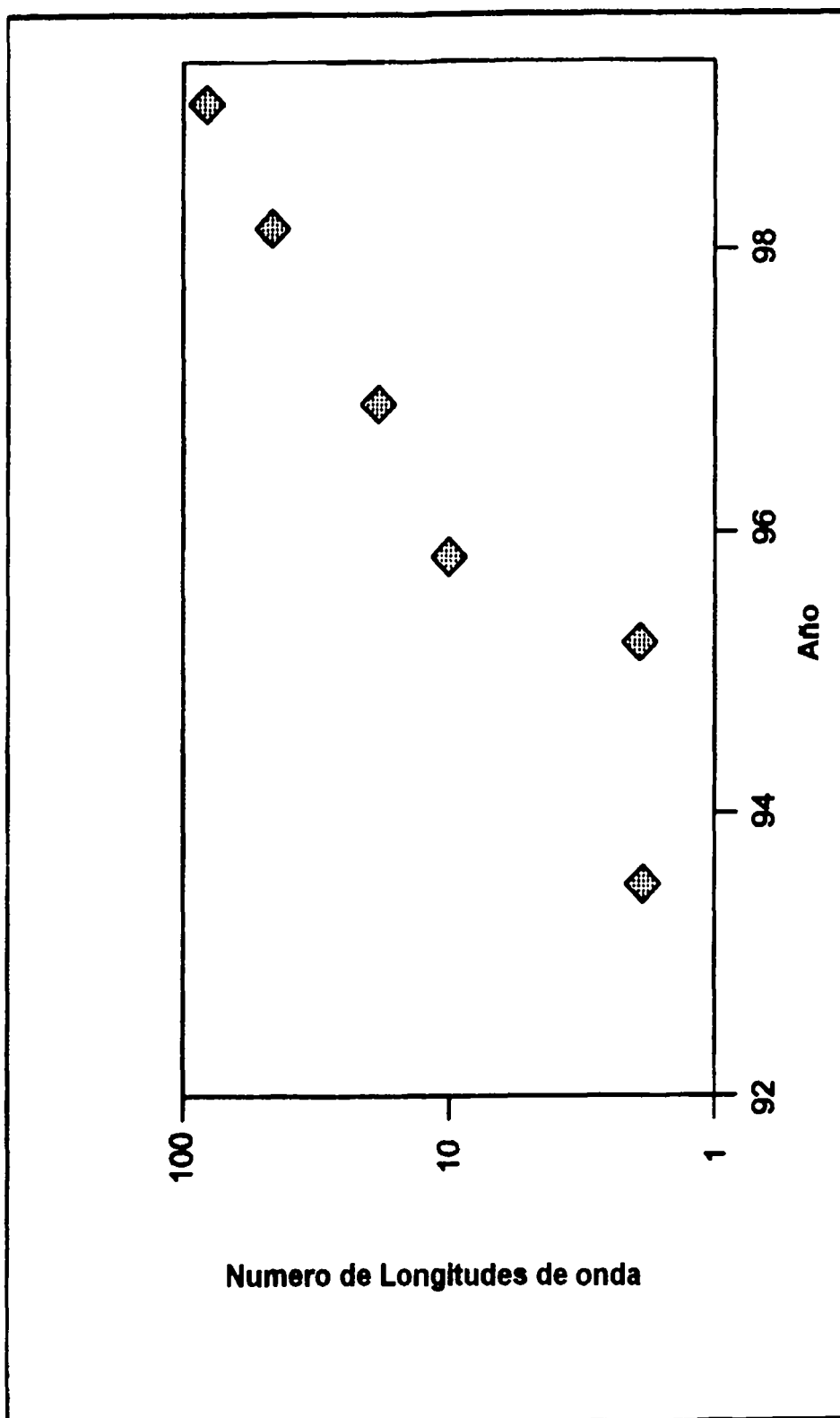


FIG. 27

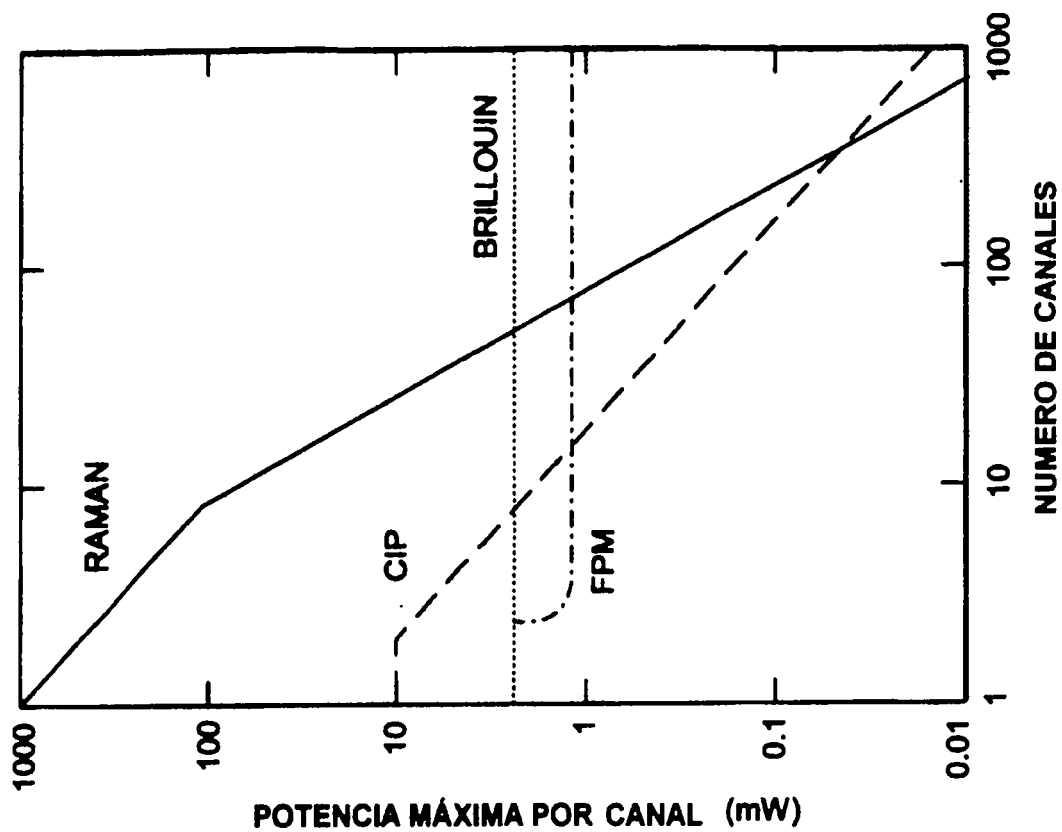


FIG. 28.(b)

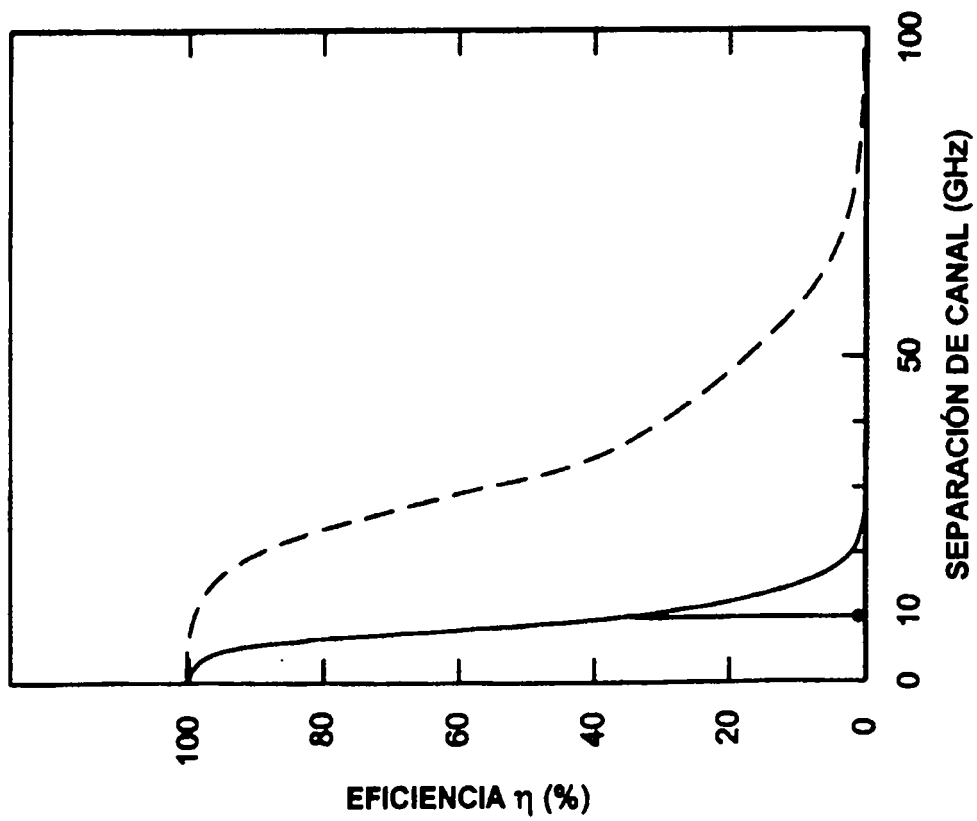


FIG. 28.(a)

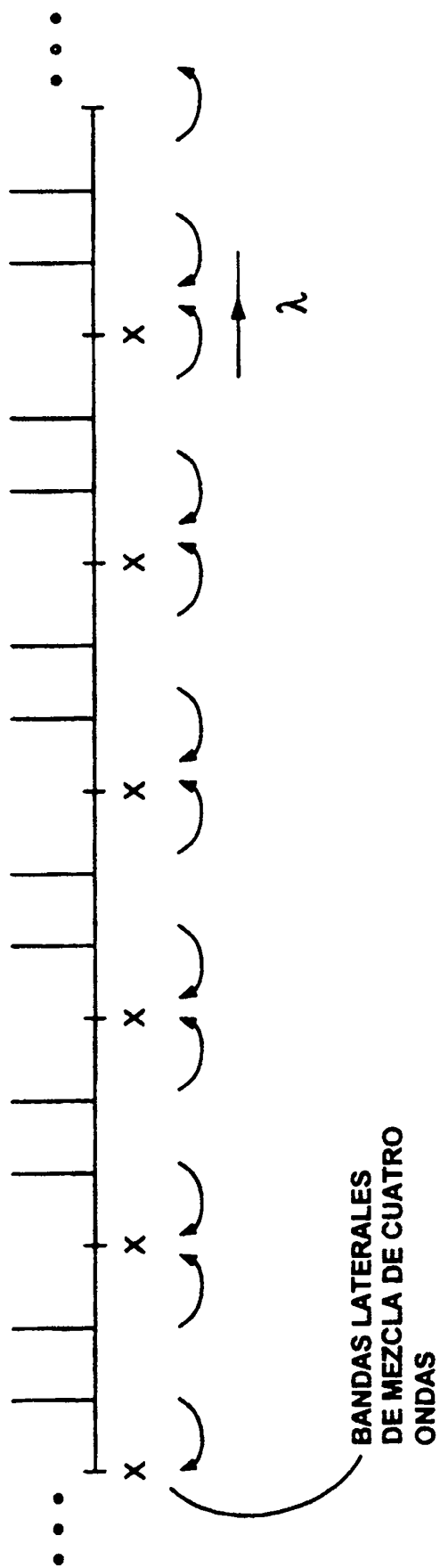


FIG. 29

Sistema de Transmisión MDLD con Espacio de Canal de 10 GHz

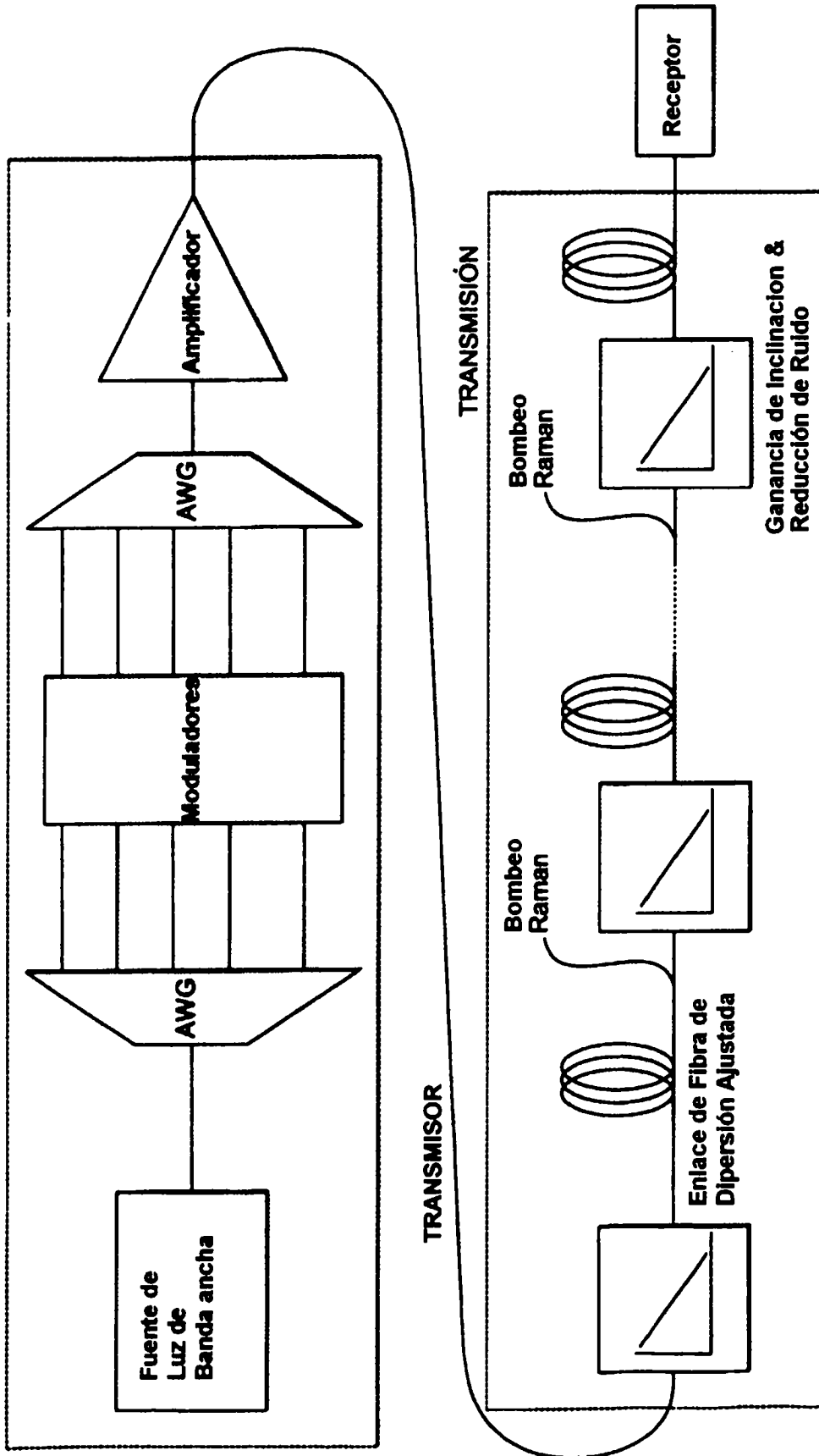


FIG. 30

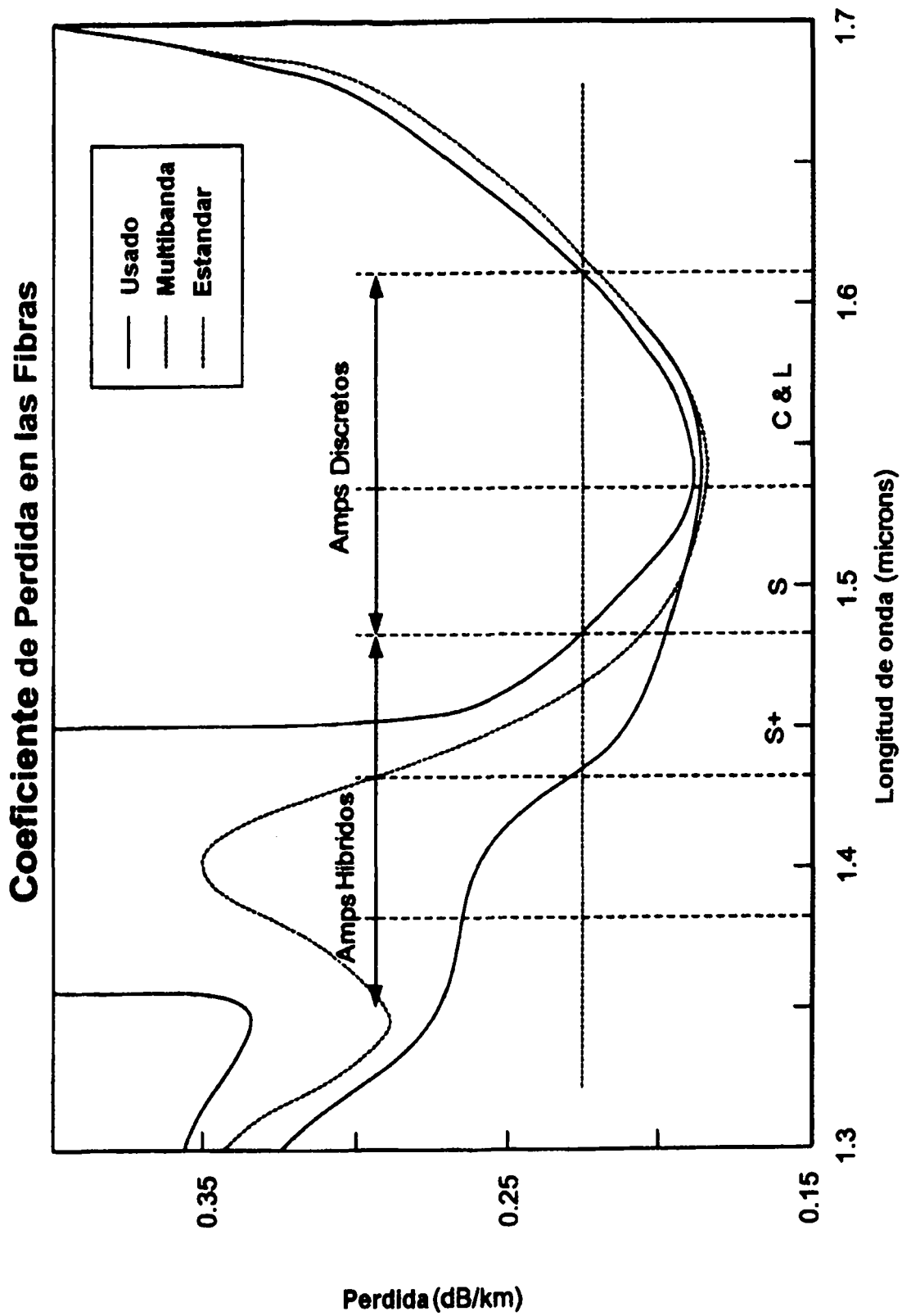


FIG. 31

Amps Raman Distribuidos en la banda S⁺

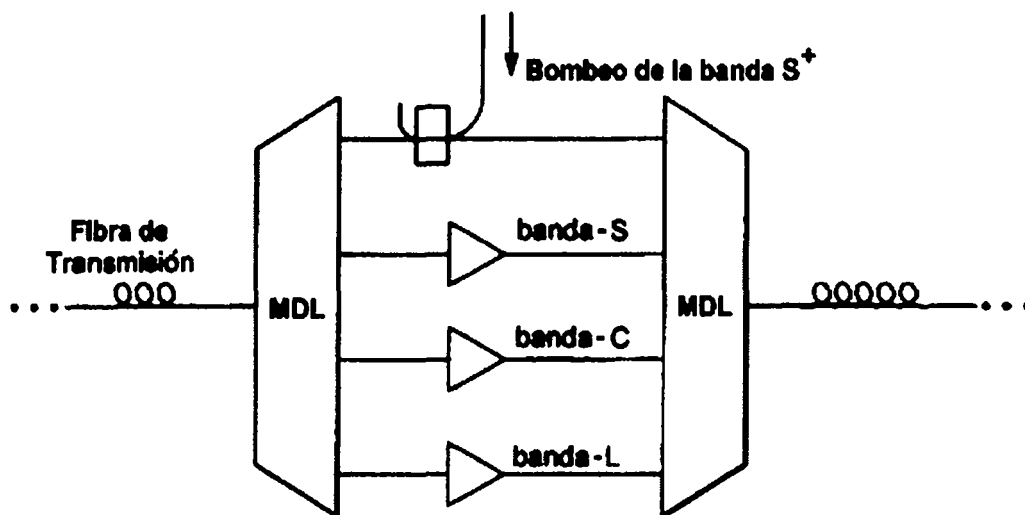


FIG. 32 (a)

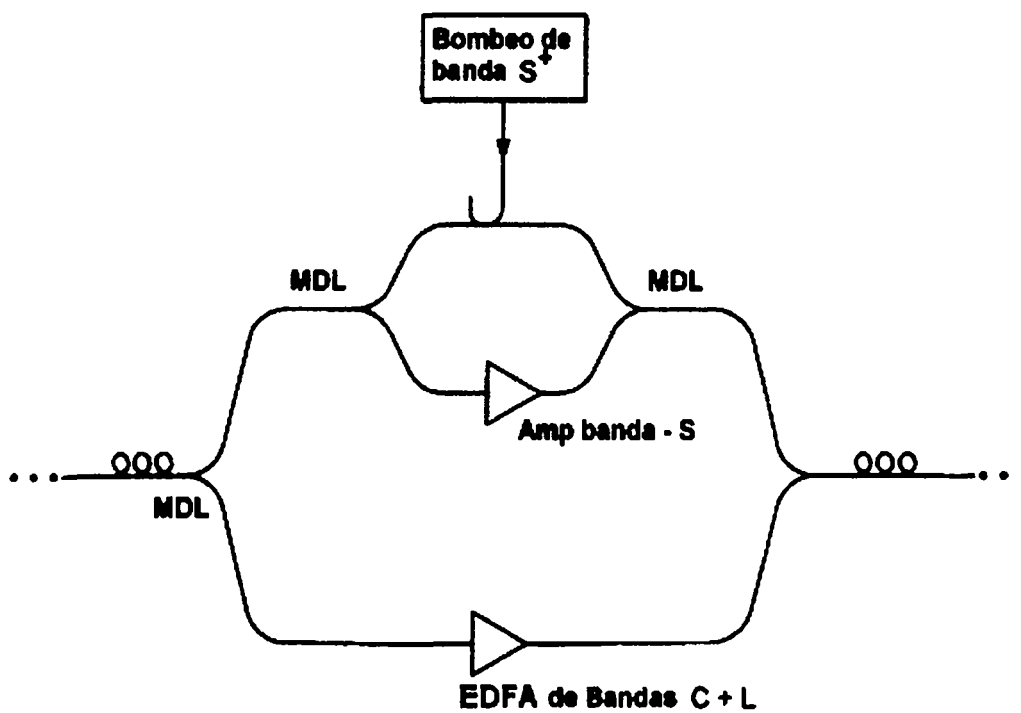


FIG. 32 (b)

2. Amps Raman Híbridos en la banda S⁺

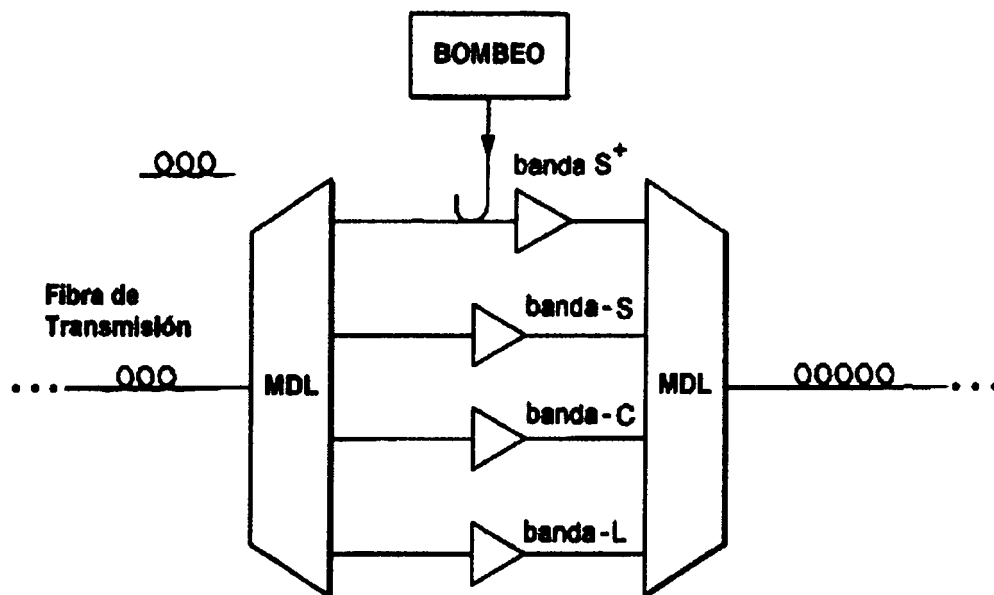


FIG. 33 (a)

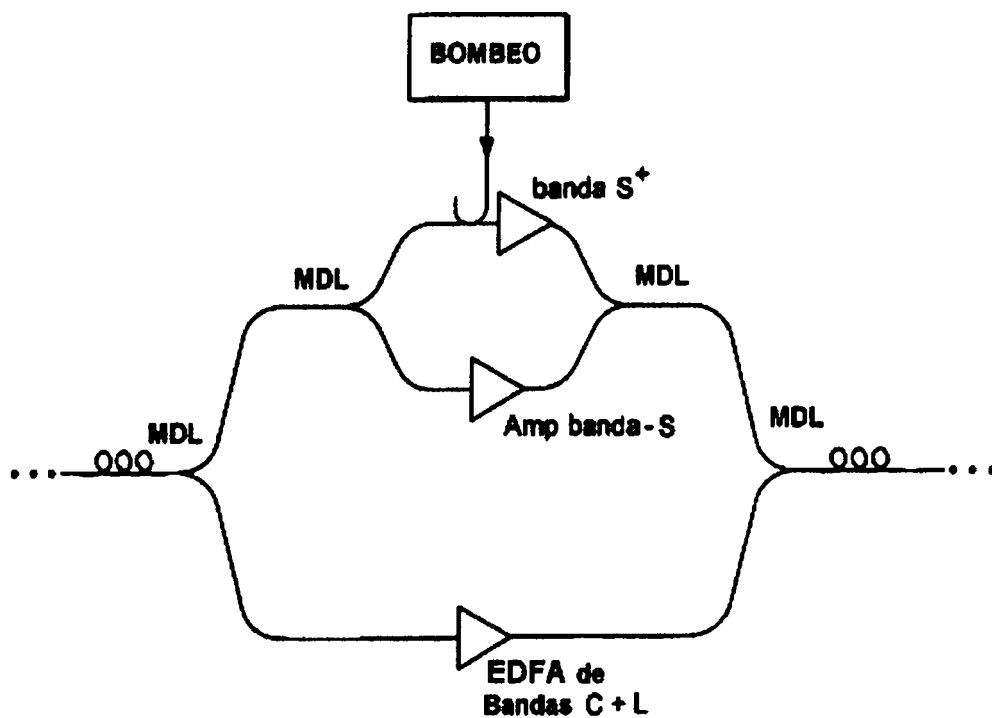


FIG. 33 (b)

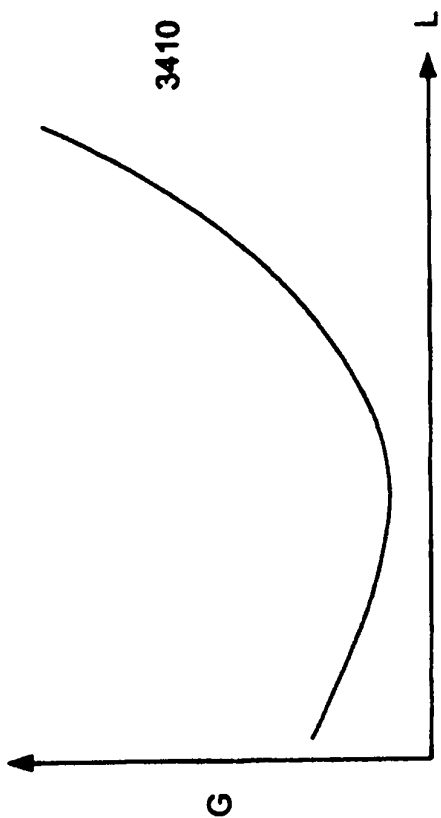


FIG. 34(b)

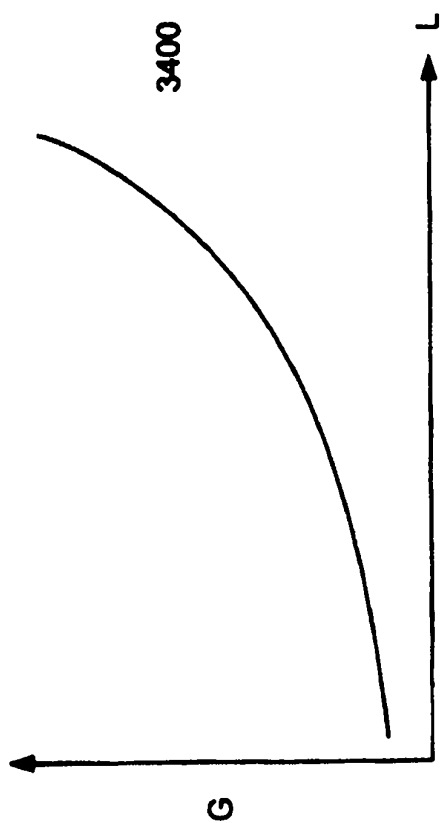


FIG. 34(a)

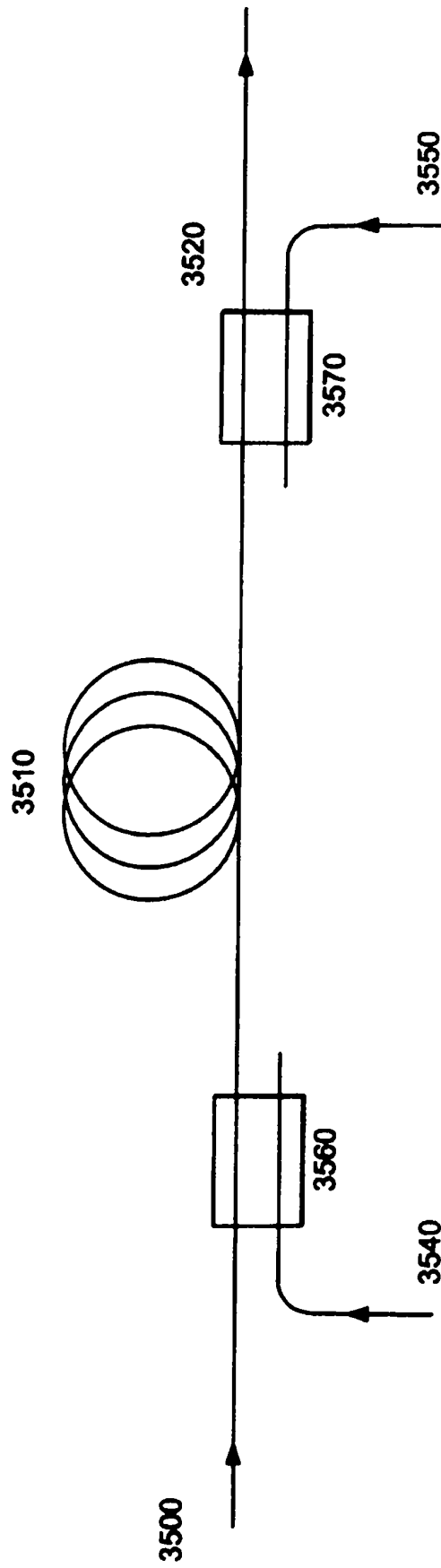


FIG. 35

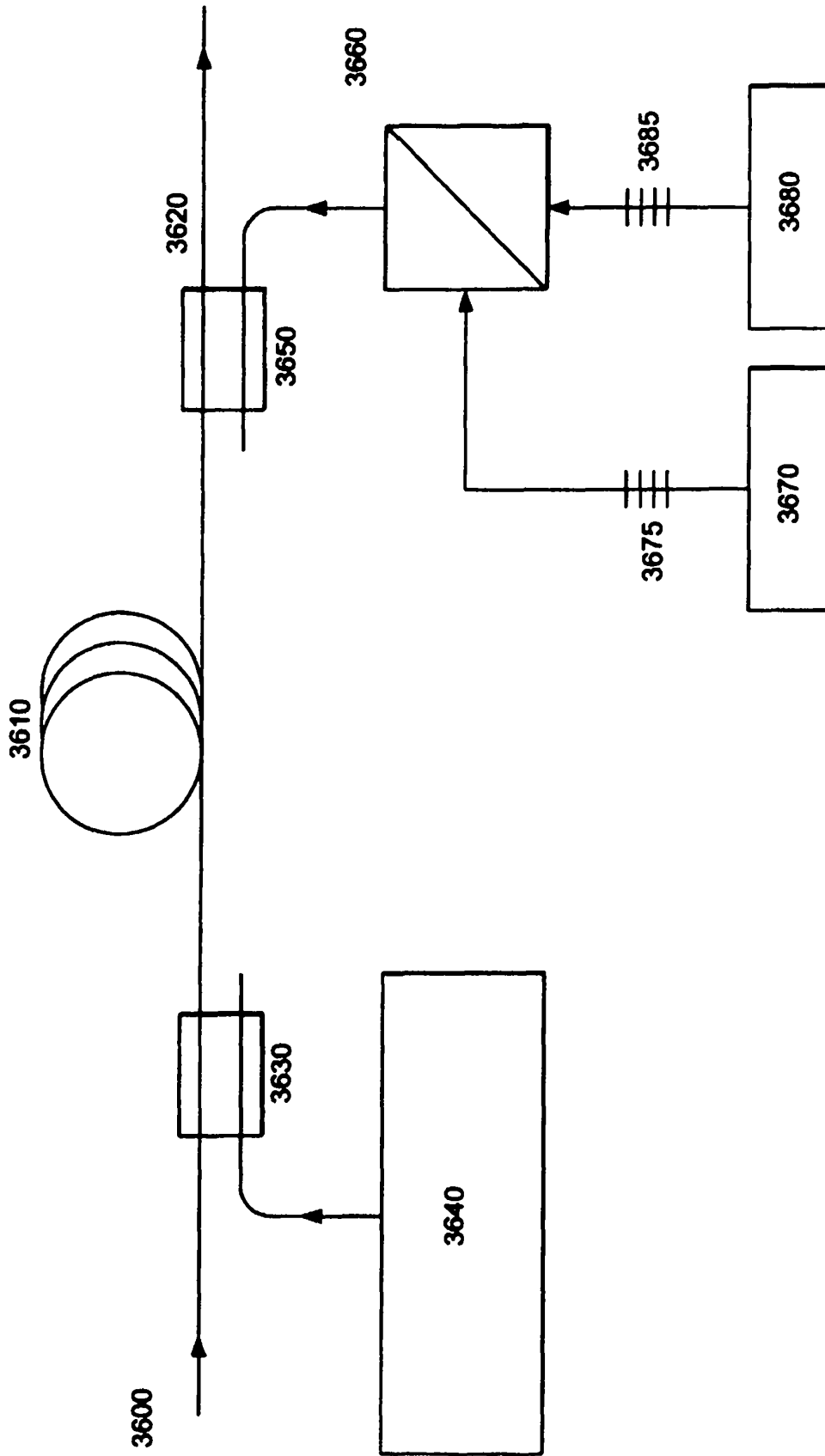


FIG. 36

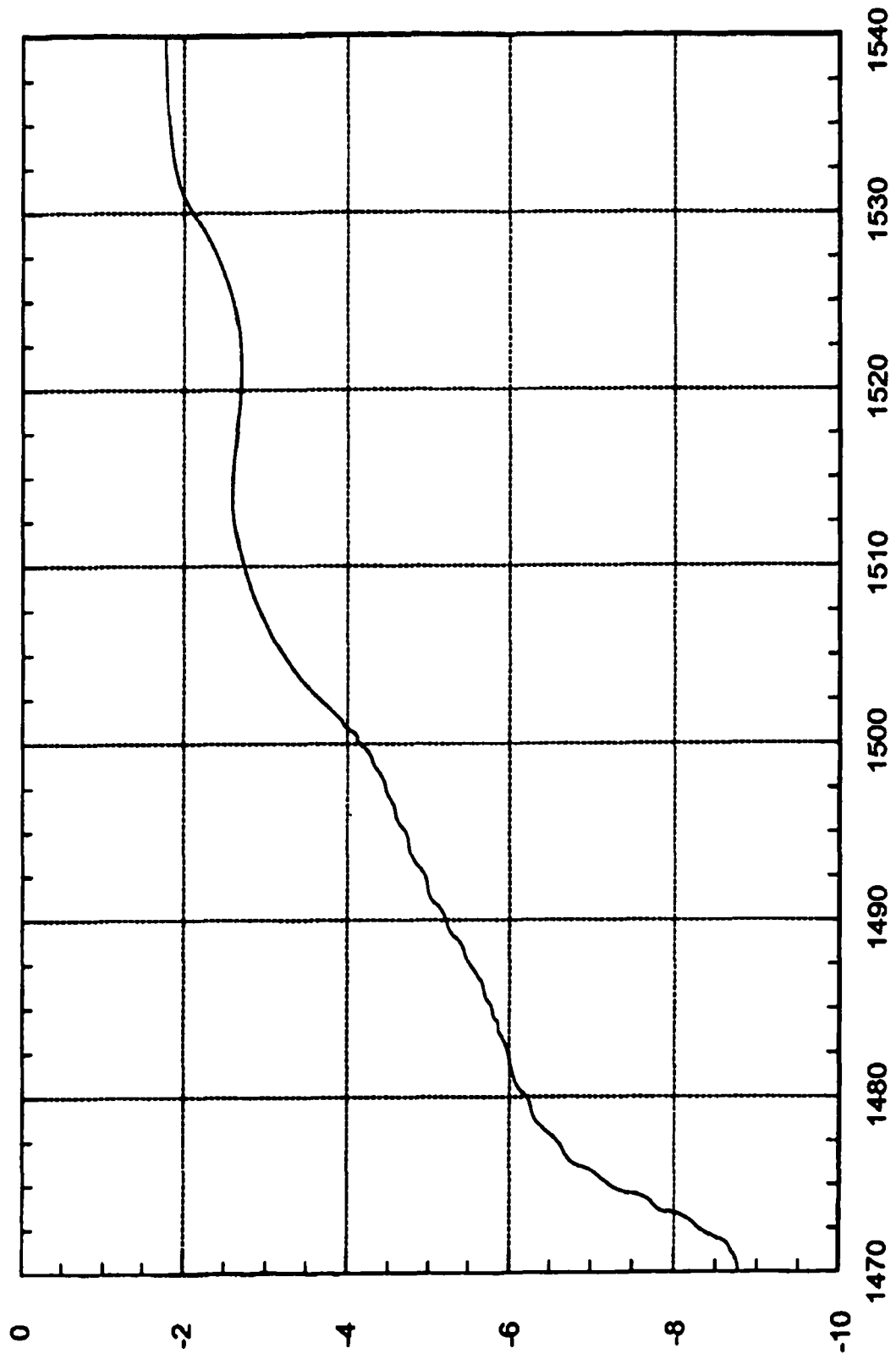


FIG. 37

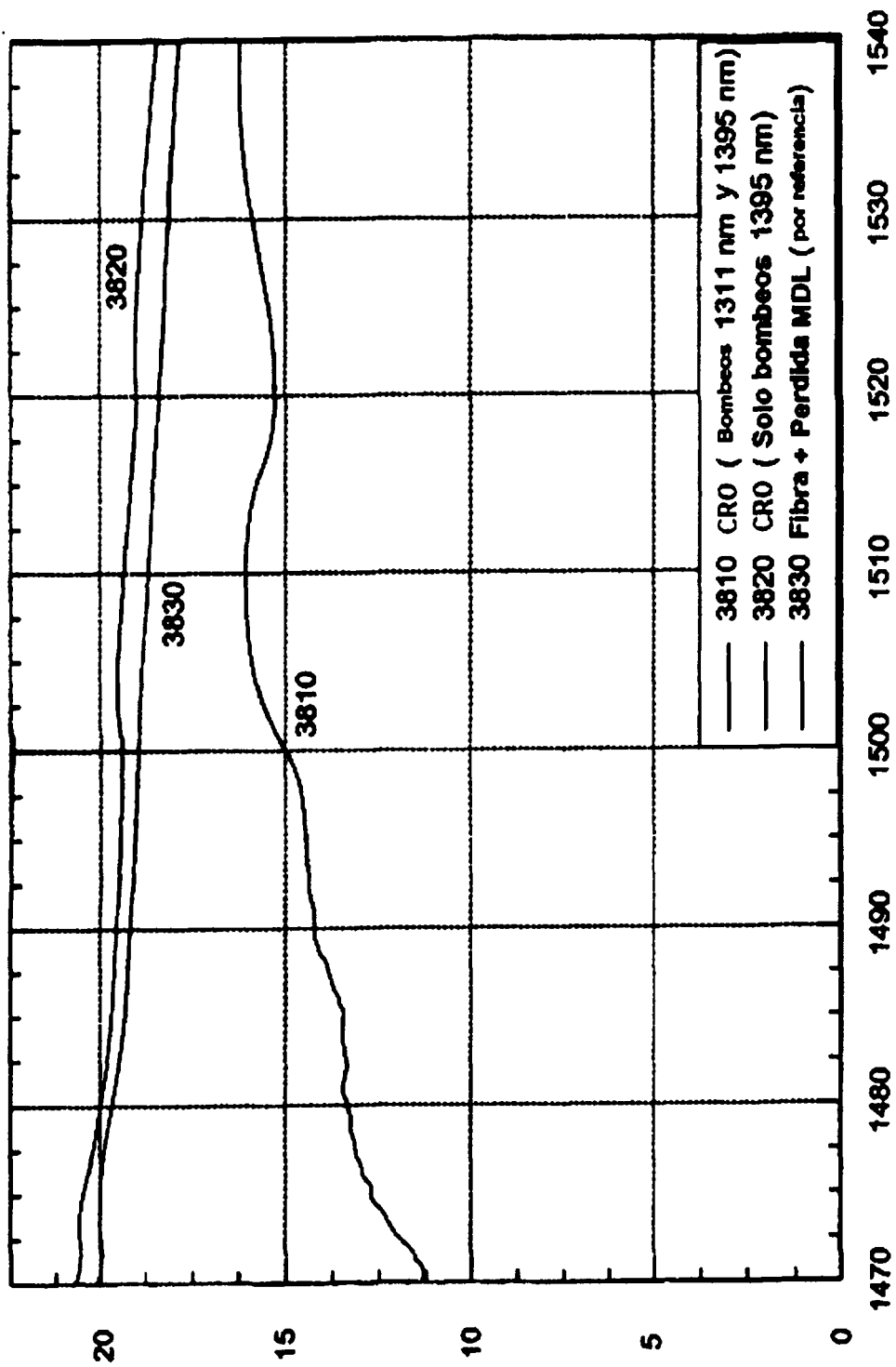


FIG. 38

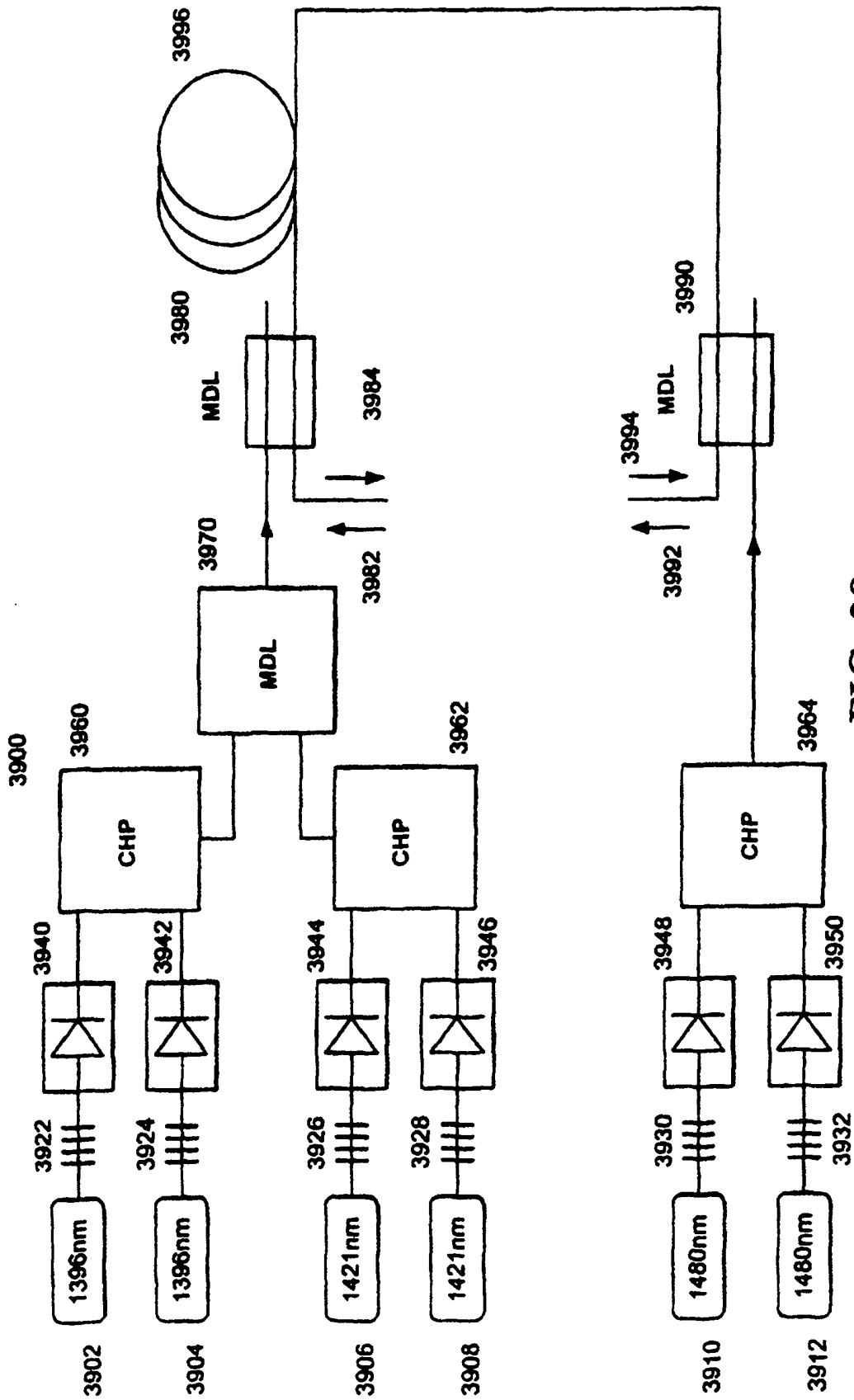


FIG. 39

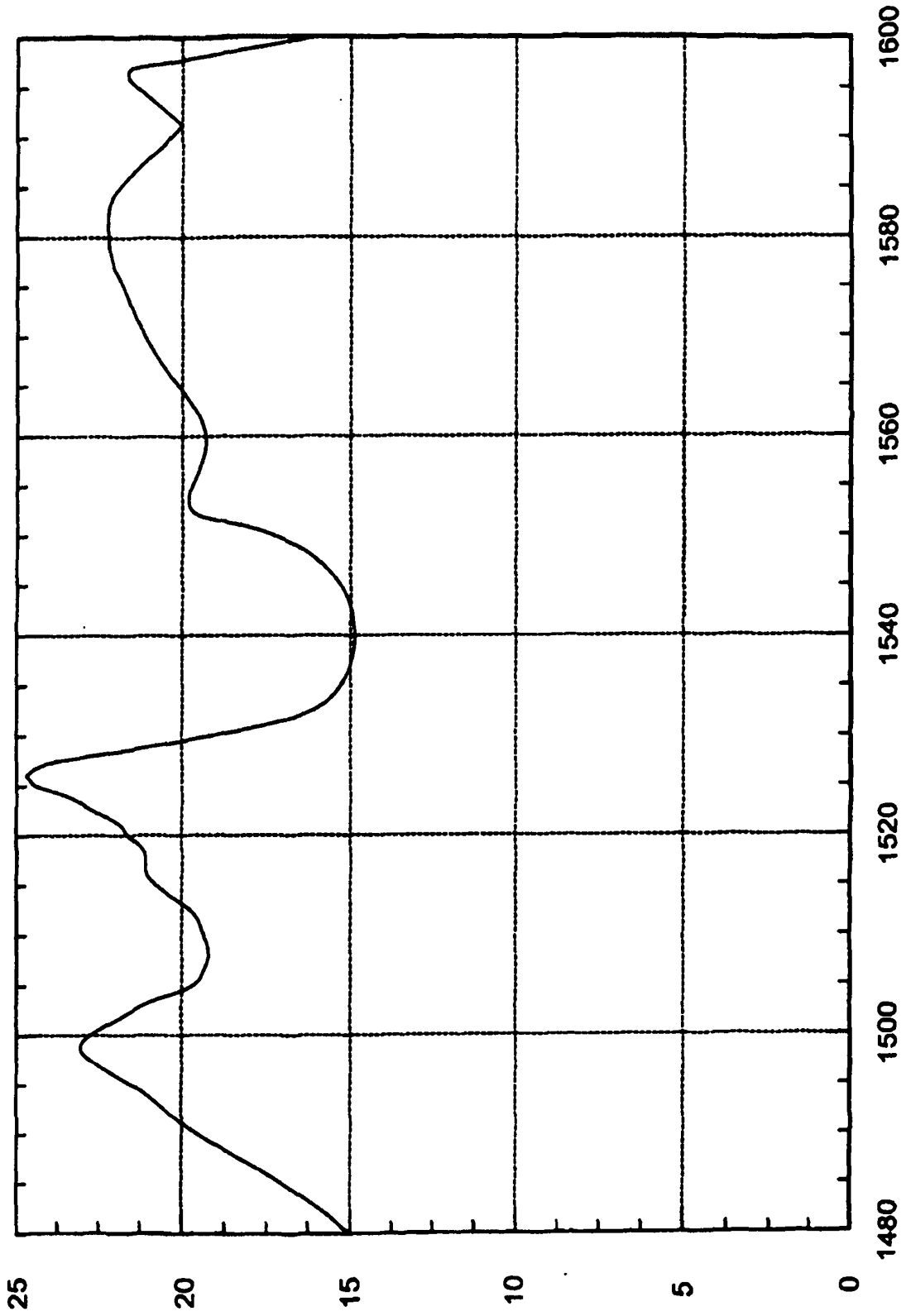


FIG. 40

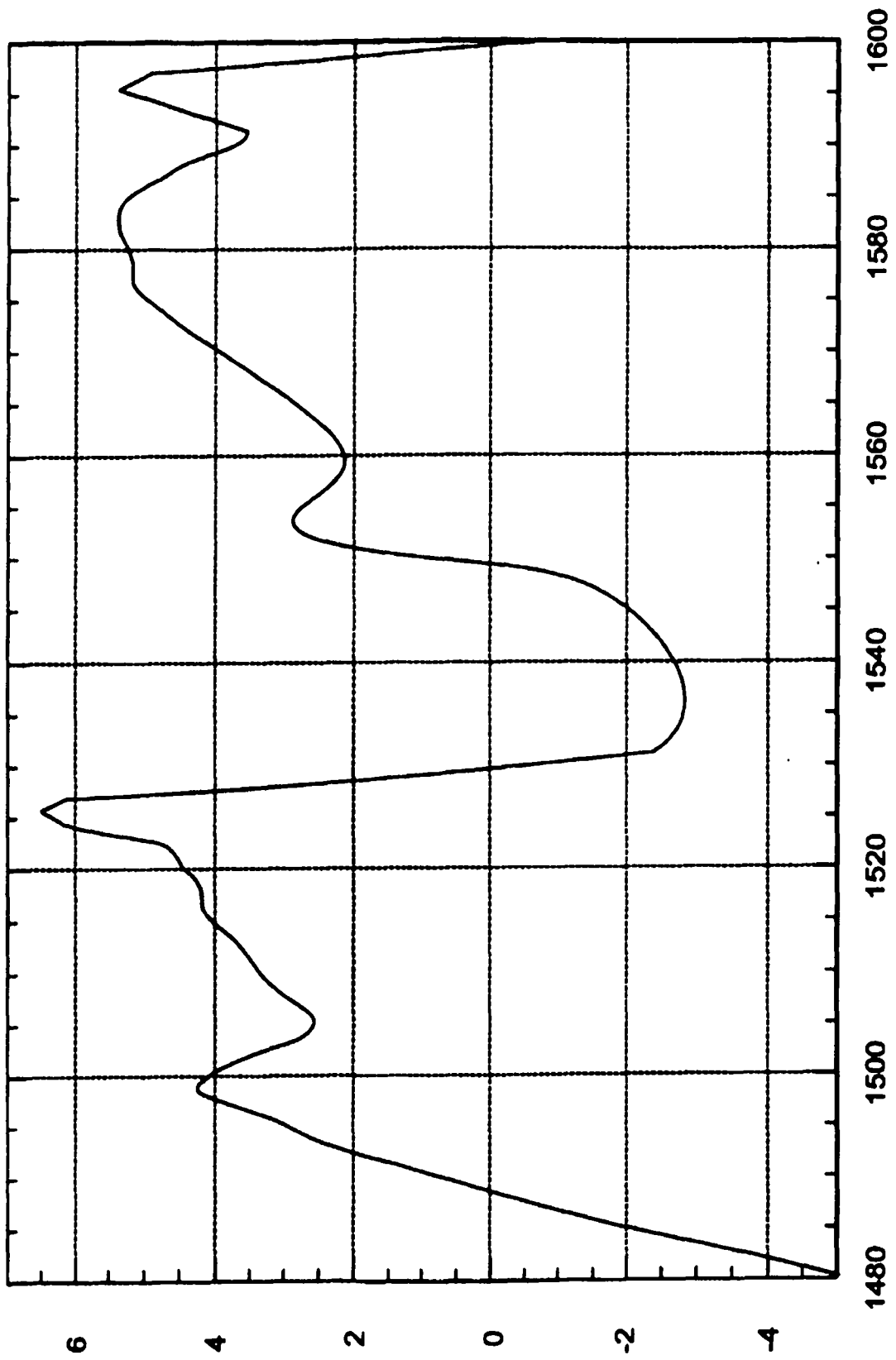


FIG. 41

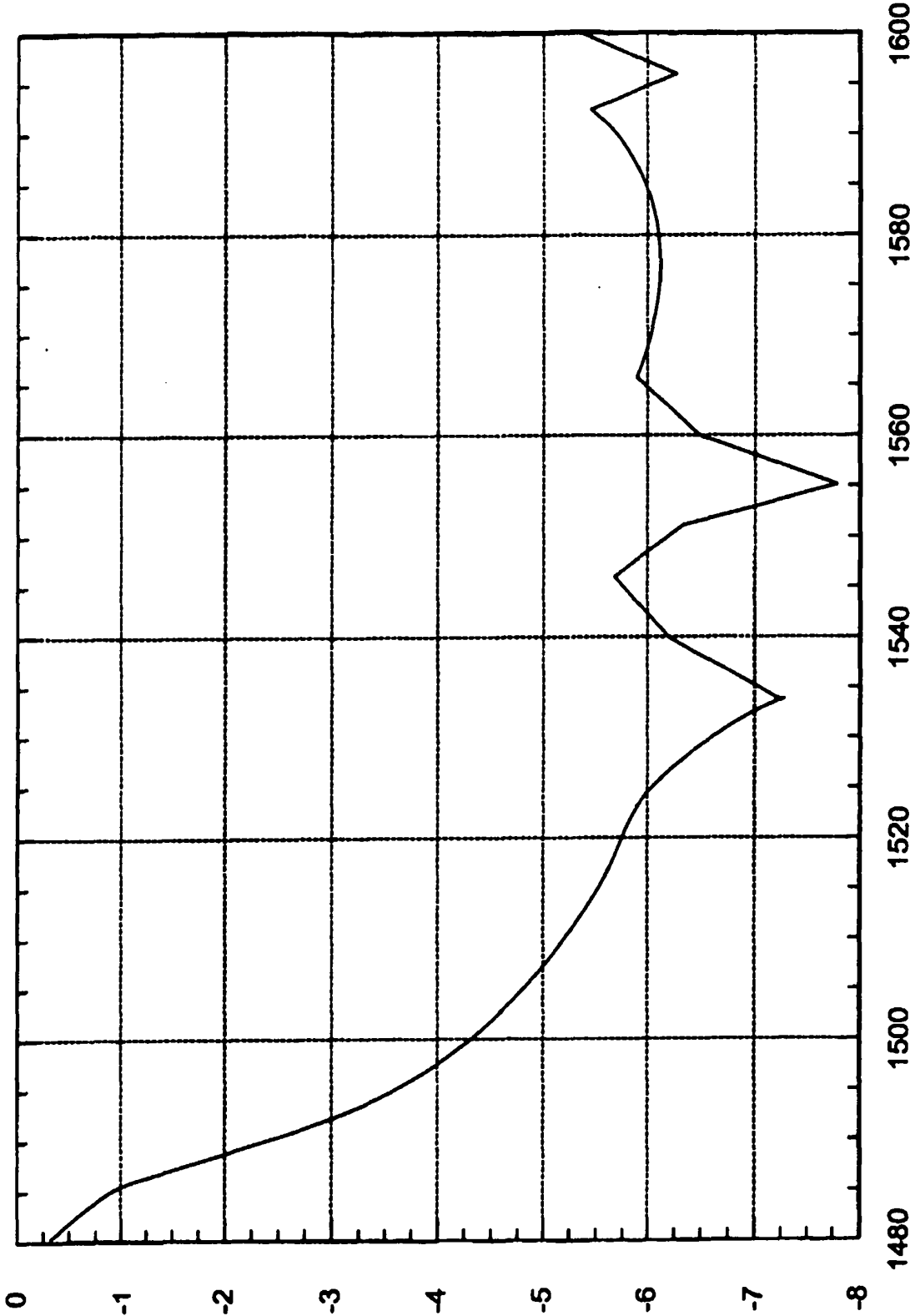


FIG. 42

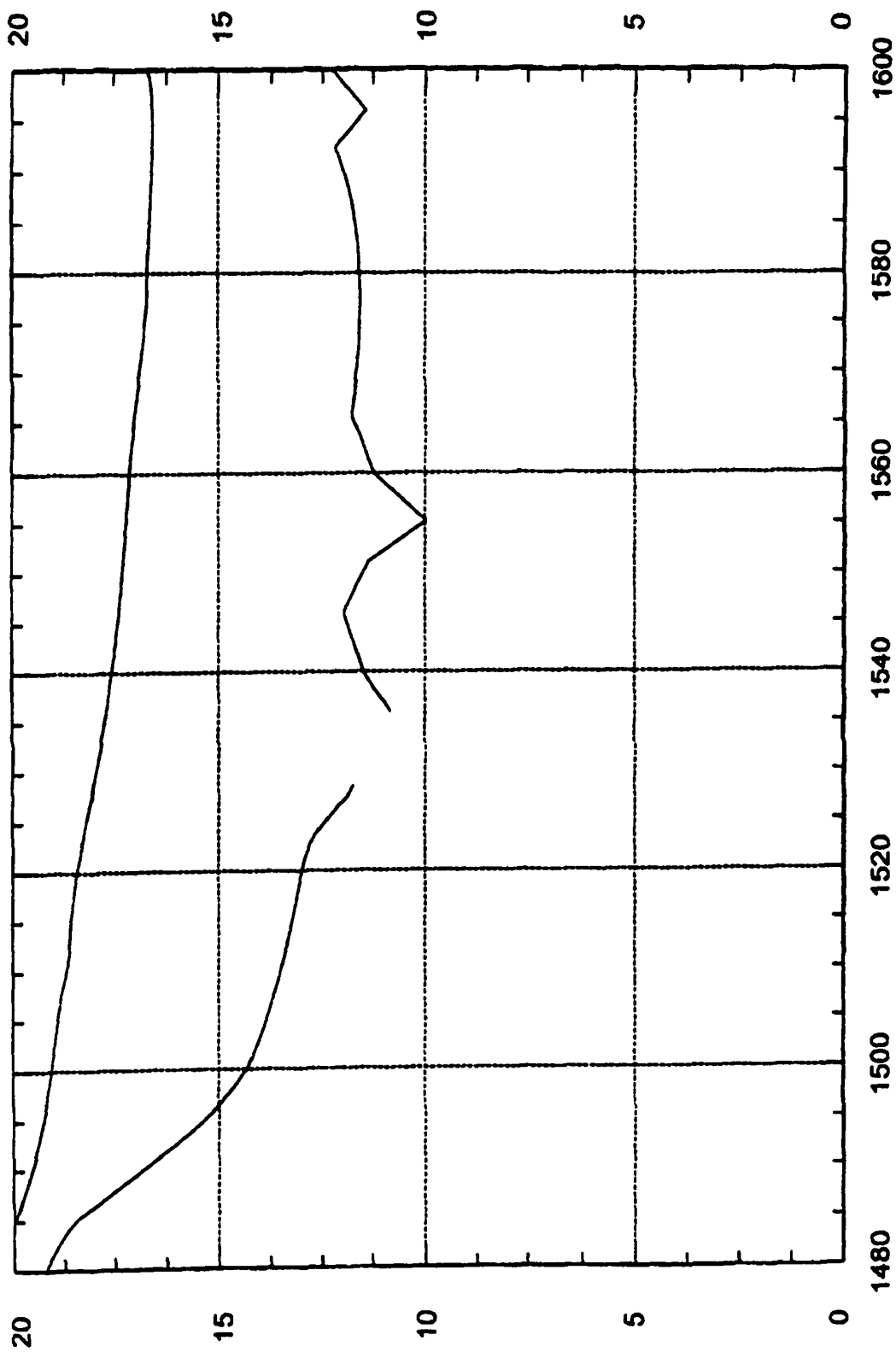


FIG. 43

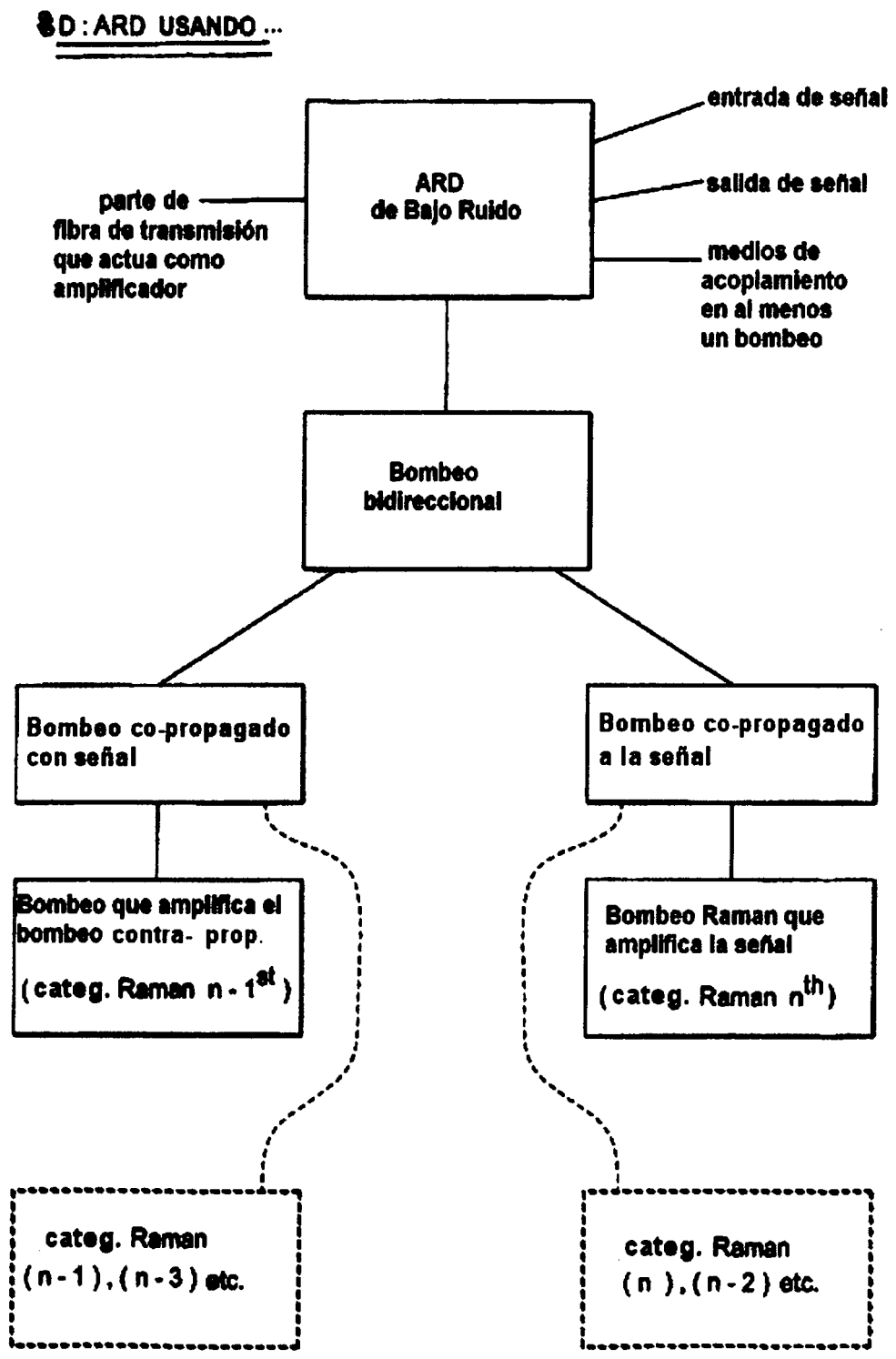


FIG. 44

D : ARD USANDO...

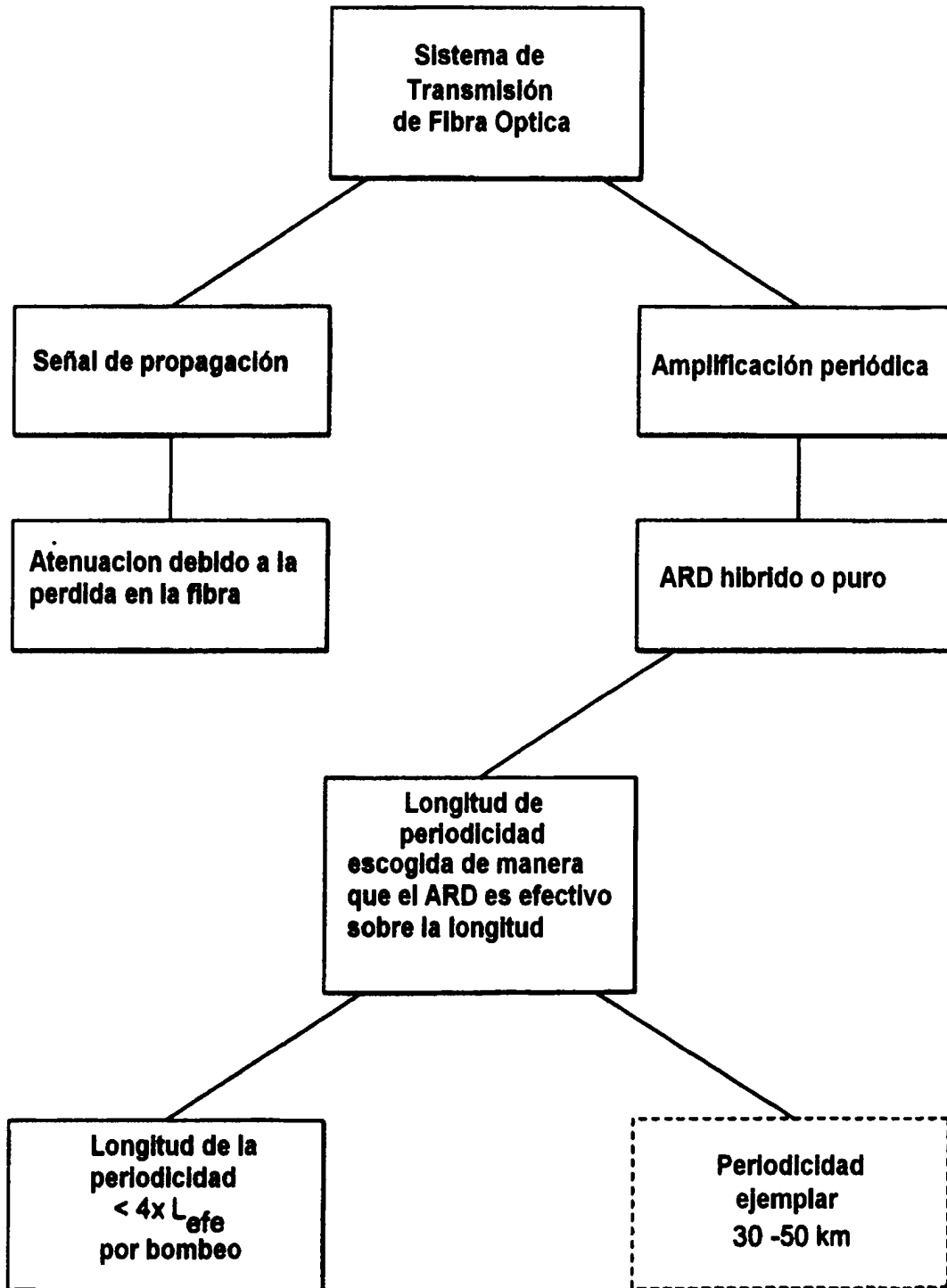


FIG. 45

8 E. CONFIGURACIONES DE BOMBEO...

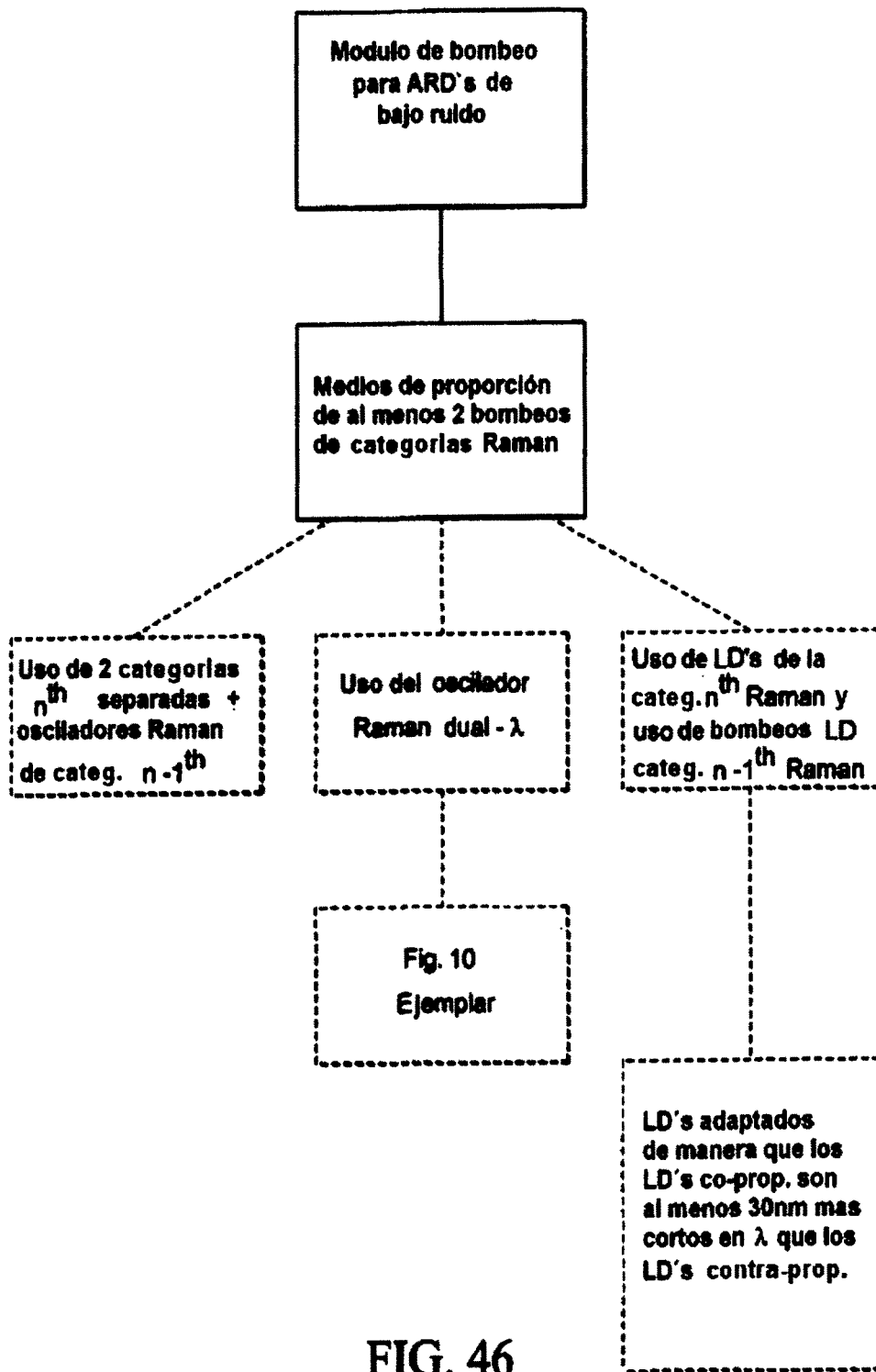


FIG. 46

8.F. AMP DISCRETO ... MULTIPLE

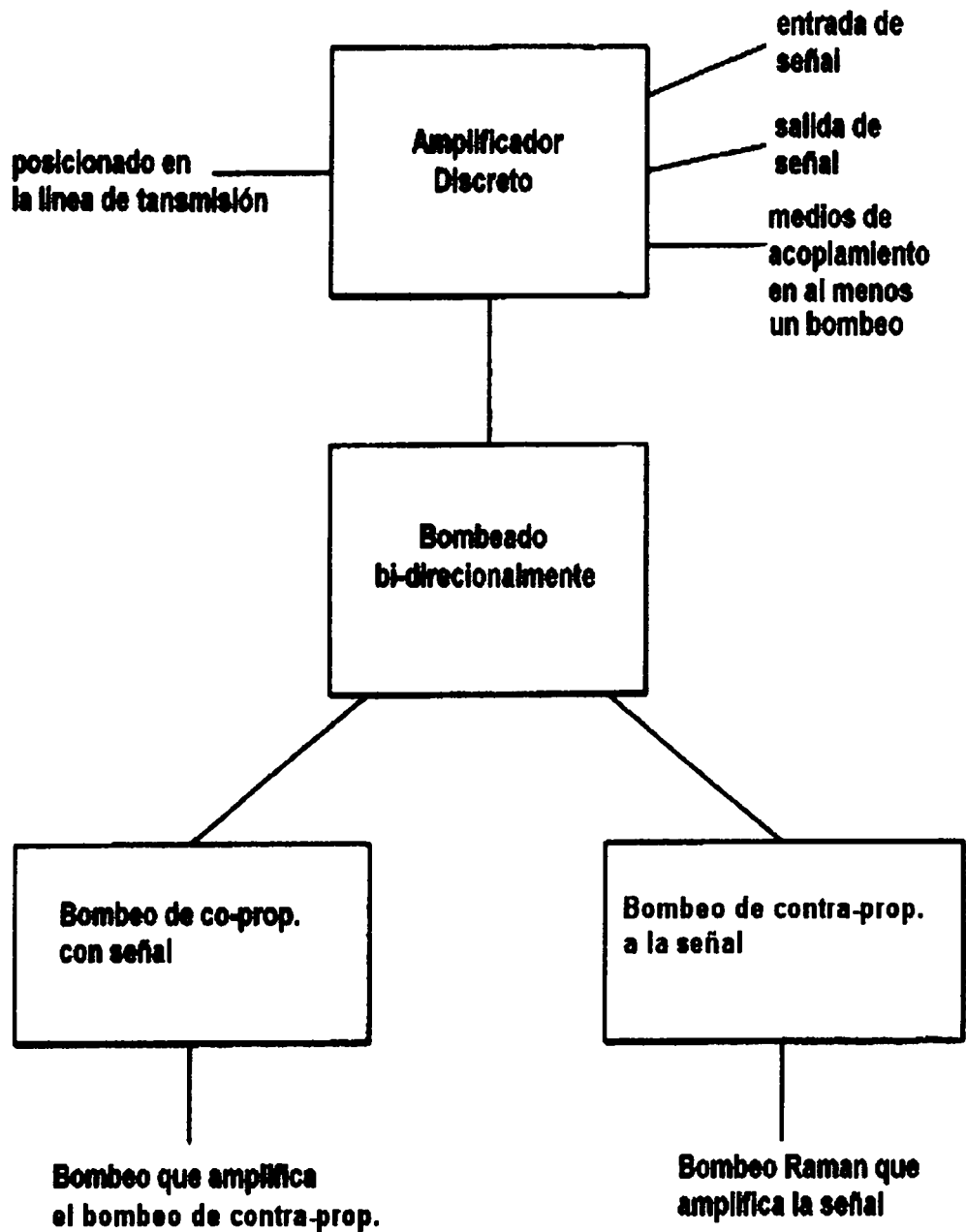


FIG. 47

G : ARD's de BANDA ANCHA ...

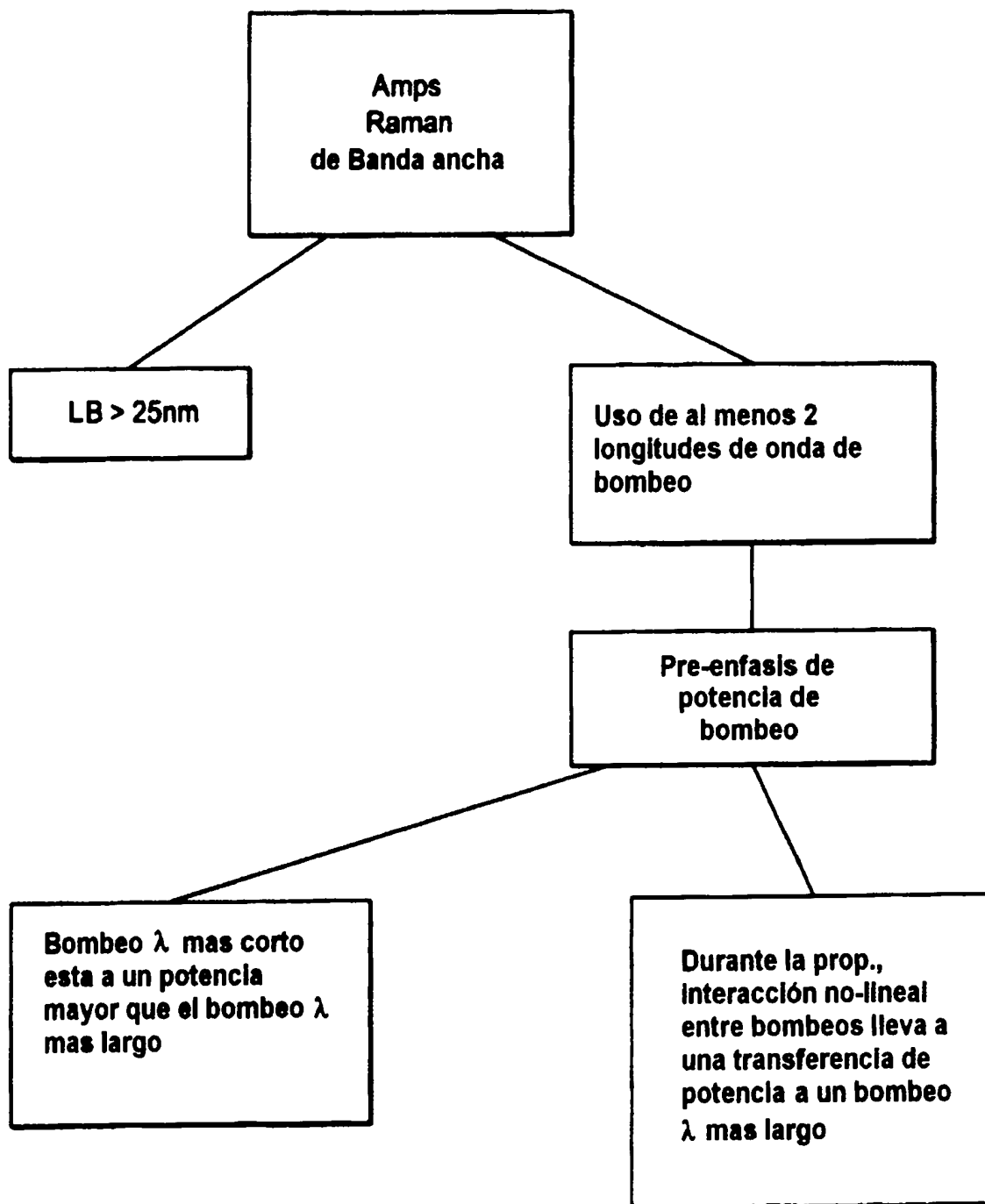


FIG. 48

H: POTENCIA MENOR ...

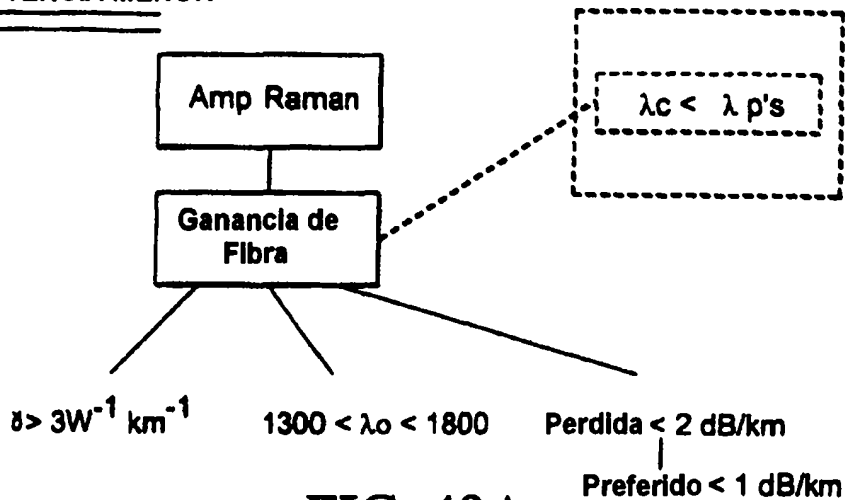


FIG. 49A

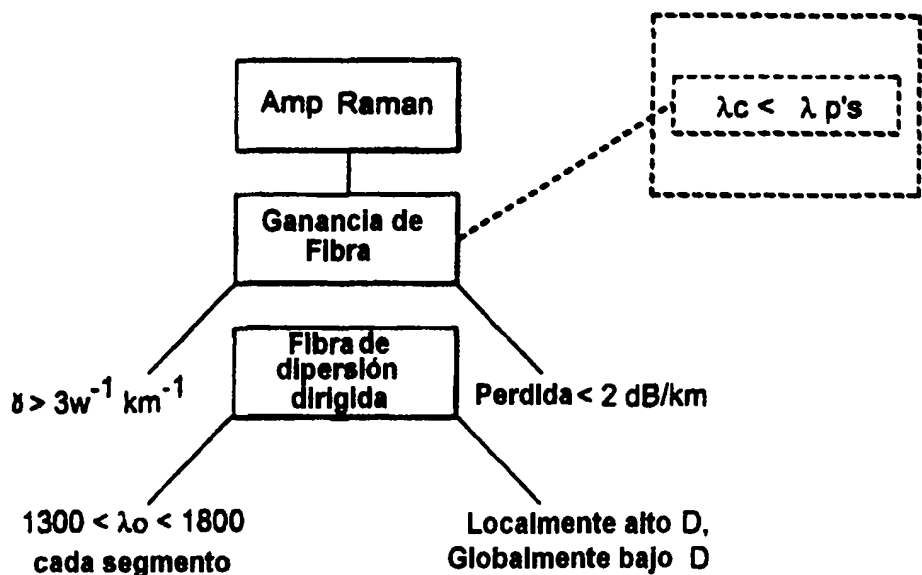


FIG. 49B

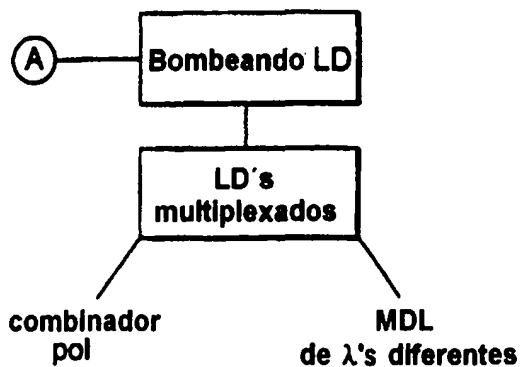


FIG. 49C

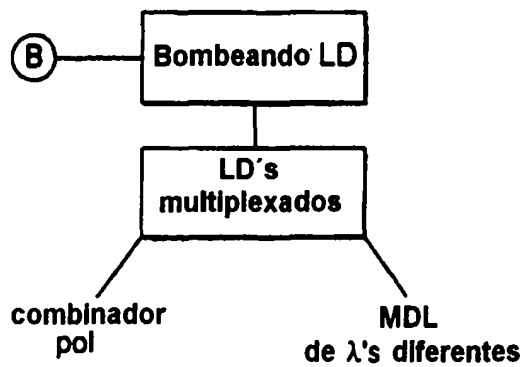


FIG. 49D

§1: Sistemas B-MDLD ...

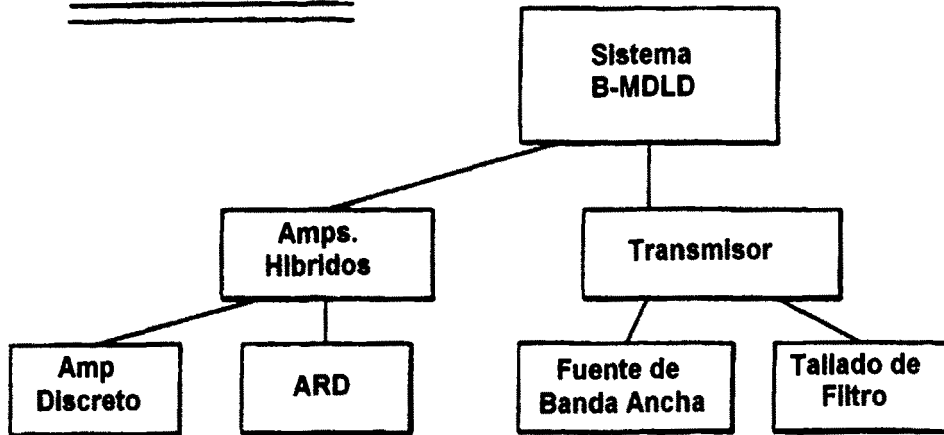


FIG. 50A

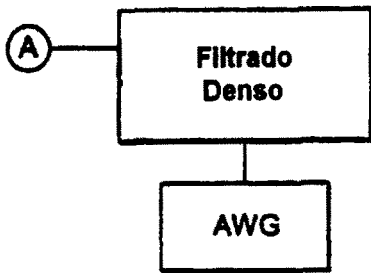


FIG. 50B

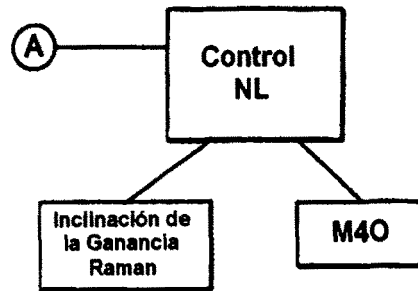


FIG. 50C

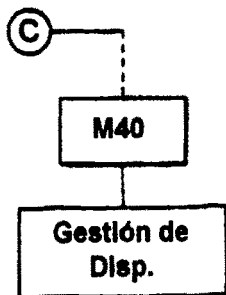


FIG. 50D

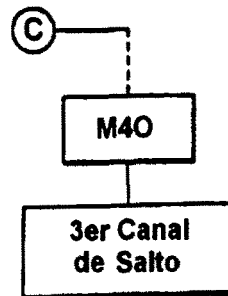


FIG. 50E

§J: USO ÓPTIMO

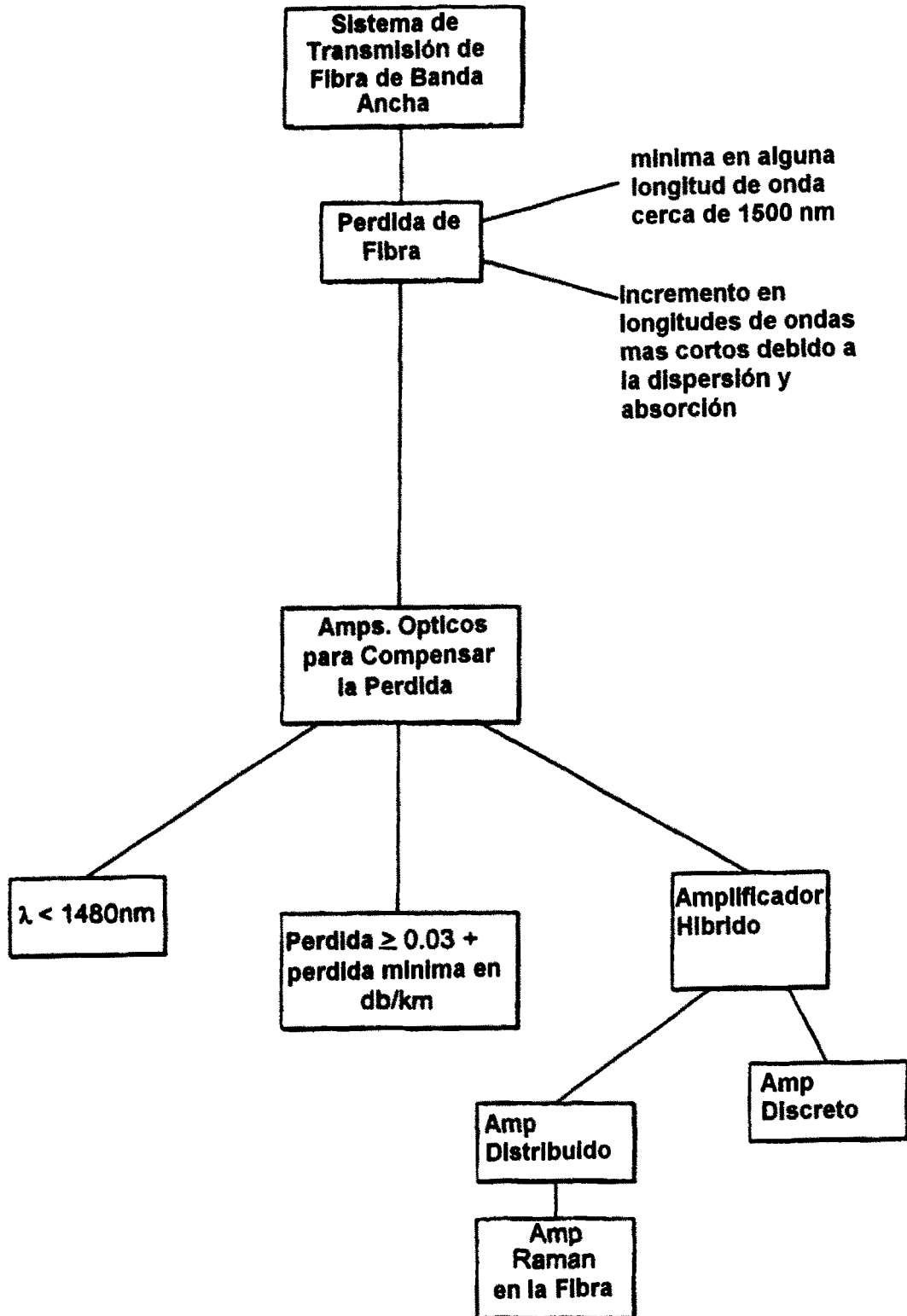


FIG. 51

§ J: USO ÓPTIMO

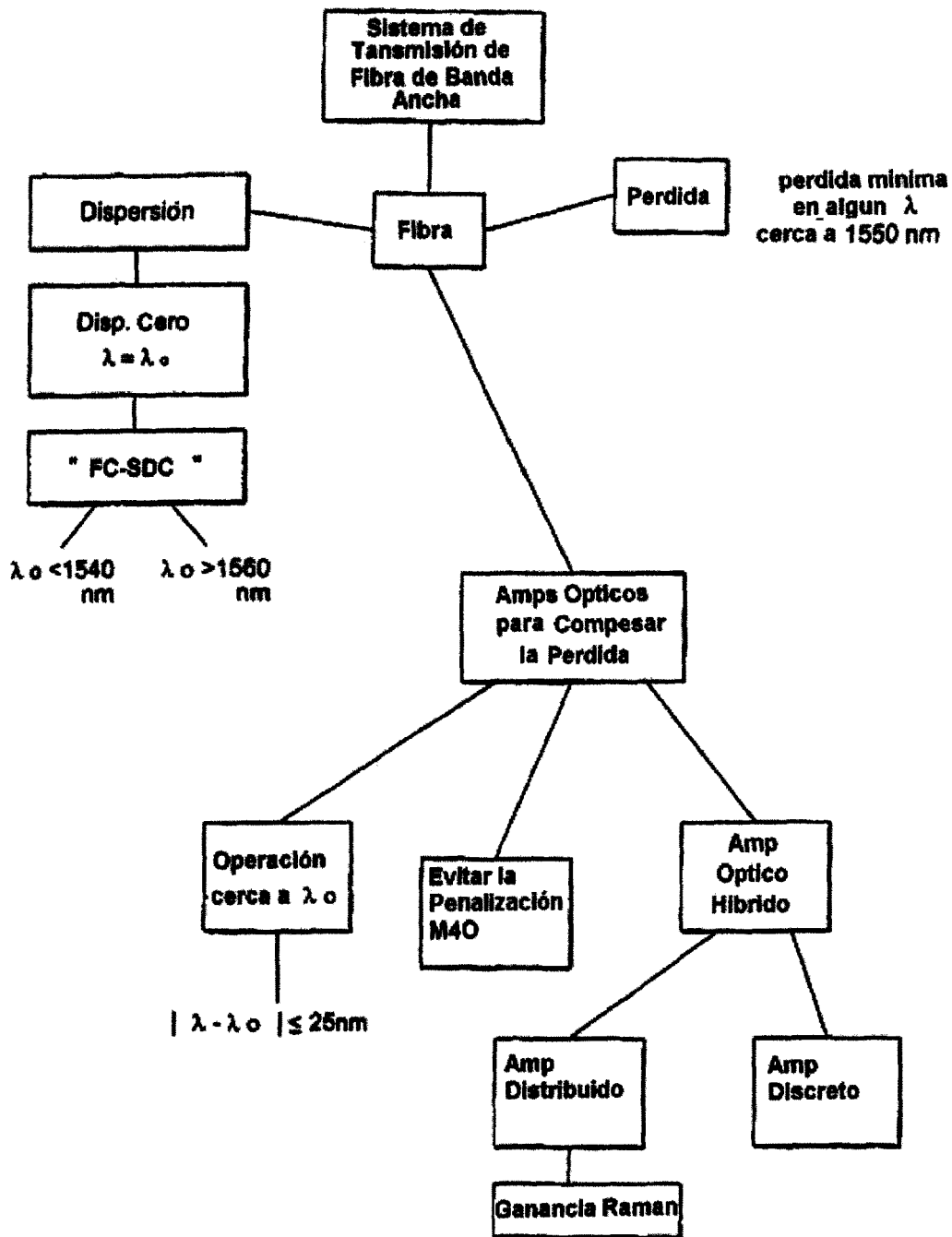


FIG. 52