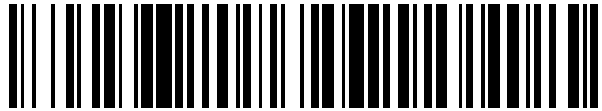


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 571 136**

51 Int. Cl.:

**H01S 3/30** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.10.2007 E 07817680 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.02.2016 EP 2111677**

54 Título: **Influencia en la propagación de la velocidad de señales en fibras ópticas**

30 Prioridad:

**09.11.2006 DE 102006052860**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

**24.05.2016**

73 Titular/es:

**DEUTSCHE TELEKOM AG (100.0%)  
FRIEDRICH-EBERT-ALLEE 140  
53113 BONN, DE**

72 Inventor/es:

**SCHNEIDER, THOMAS**

74 Agente/Representante:

**CARBONELL CALLICÓ, Josep**

**ES 2 571 136 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).

## DESCRIPCION

Influencia en la propagación de la velocidad de señales en fibras ópticas

5 La invención se refiere a un procedimiento para influir, especialmente para reducir, la velocidad de propagación de señales luminosas que se propagan con una velocidad de grupo dentro de una guía de ondas, especialmente en una fibra de vidrio, en la dirección de propagación, en el que se acopla en la guía de ondas una radiación de bombeo de un rango de frecuencia limitado en contra de la dirección de propagación de las señales luminosas, en el que tiene lugar entre la radiación de bombeo y las señales luminosas una dispersión estimulada de Brillouin (SBS),  
10 en el que, adicionalmente a la primera radiación de bombeo se acopla en la guía de ondas una segunda radiación de bombeo, cuya frecuencia está desplazada respecto a la primera radiación de bombeo de manera que el espectro de ganancia de la segunda radiación de bombeo solapa al menos parcialmente el espectro de pérdida de la primera radiación de bombeo. La invención se refiere además a un sistema para la realización del procedimiento.

15 Un procedimiento de este tipo se conoce por Chin et al. Optics Express, vol. 14, n.º 22, páginas 10684 a 10692. En él se acopla en la guía de ondas adicionalmente a la primera radiación de bombeo una segunda radiación de bombeo, cuya frecuencia está desplazada respecto a la primera radiación de bombeo de manera que el espectro de ganancia de una radiación de bombeo solapa al menos parcialmente el espectro de pérdida de la otra radiación de bombeo. Sin embargo, en este caso se solapa una ganancia de banda estrecha con una pérdida de banda ancha,  
20 para desacoplar el retardo de los pulsos de la amplificación de los pulsos.

Es sabido que las señales, que también pueden presentarse en forma de pulsos luminosos, pueden retardarse respecto a otras señales atravesando un conductor más largo que las otras. Sobre esta base se conoce un tipo de almacenamiento óptico, en el que se usan fibras de diferente longitud como líneas de retardo en combinación con interruptores ópticos. El retardo está determinado por el tiempo que necesita la señal para propagarse en la fibra en cuestión. Dependiendo del retardo deseado, el interruptor conduce la señal a la fibra con la longitud correspondiente. Este tipo de sistemas requieren mucho espacio, son costosos e inflexibles en la medida en que solo pueden ajustarse a un múltiplo de un determinado tiempo fijo de retardo. Además, en estos sistemas se producen fuertes pérdidas que requieren una amplificación adicional de las señales.  
25

30 Mientras que estos almacenes intermedios ópticos "convencionales" envían la señal a través de caminos de diferente longitud, en un enfoque denominado "slow light" se modifica la velocidad de propagación de las señales a lo largo de un único camino. Esto se produce mediante una reducción o un incremento de la velocidad de grupo de las señales en un determinado recorrido del camino. Así, en experimentos se pudo demostrar que la velocidad de propagación de las señales puede variarse entre casi cero y la velocidad superlumínica en vacío.  
35

Para el retardo de los pulsos pueden utilizarse diferentes mecanismos y sistemas de materiales. Por ejemplo, el índice de velocidad de grupo puede adoptar una magnitud de  $10^6$  en gases atómicos ultrafríos y calientes, lo que, tal y como se demostró, puede reducir la velocidad de los pulsos a 17 m/s. Se obtuvieron resultados similares también con vapor de rubidio, nanoestructuras semiconductoras, estructuras de onda cuántica y de punto cuántico, así como guías de onda sobre la base de la refracción de banda fotónica.  
40

Además se sabe que la velocidad del grupo también se puede modificar en fibras de vidrio ópticas. En este sentido, esta tecnología puede utilizarse en la transmisión óptica de informaciones y en el futuro también en sistemas informáticos ópticos. En este caso, la ganancia de banda estrecha de diferentes efectos no lineales se utiliza para modificar la velocidad del grupo. De este modo se pudieron retardar señales con dispersión de Raman, con amplificación paramétrica asistida por Raman, así como con una combinación de mezcla de cuatro ondas y dispersión lineal ("slow light"). Con la dispersión estimulada de Brillouin (SBS) también se pudo alcanzar un retardo de los pulsos ópticos en fibra de vidrio.  
45

50 El procedimiento de la SBS tiene diferentes ventajas: así, la SBS solo necesita, al menos en fibras largas, rendimientos de bombeo reducidos de pocos mW para generar grandes retardos. Además, la SBS funciona en todo tipo de fibras y, al menos en un rango de transparencia, en todas las longitudes de onda. Esto es especialmente aplicable a fibras que se utilizan actualmente en la tecnología de las telecomunicaciones ópticas. Además, resulta ventajoso el hecho de que pueden utilizarse los componentes estándar económicos y fiables de la ingeniería de telecomunicaciones. Puesto que se requieren solo potencias de bombeo reducidas, es incluso posible usar sencillos diodos láser DFB como fuentes de bombeo. Asimismo, supone una ventaja que con la SBS se puede controlar la velocidad del grupo a lo largo de un rango amplio comprendido entre menos de 71.000 km/s y la velocidad súperlumínica en vacío.  
55

60 Se sabe que la SBS es el resultado de la interacción de dos ondas que se propagan en dirección contraria respectivamente, a saber, una onda fuerte de bombeo y una onda débil de prueba. Cuando se cumple la ley de la conservación de la energía y del impulso, o de la condición de adaptación de frecuencia y fase, se genera en la fibra una onda acústica en la que pueden dispersarse fotones de la onda de bombeo hacia la onda de prueba, lo que en  
65

determinadas condiciones da lugar a una interacción estimulada. La SBS puede describirse como proceso de amplificación, en el que una onda de bombeo fuerte con la frecuencia  $f_p$  genera en dirección contraria a ella una ganancia de banda estrecha en un rango espectral de  $f_p - f_b$  (Stokes) y una pérdida de  $f_p + f_b$  (anti-Stokes). Aquí  $f_b$  es la frecuencia de la onda acústica generada.

Este denominado desplazamiento de Brillouin depende de la clase de fibra y de las condiciones del entorno. Según las relaciones de Kramers-Kronig, el proceso de la ganancia de Brillouin o de la pérdida de Brillouin va acompañado de una modificación del índice de refracción en la fibra, que en consecuencia presenta en ambos rangos espectrales arriba citados una fuerte dependencia de la frecuencia. Debido a la fuerte modificación del índice de refracción con la frecuencia resulta un índice de refracción del grupo de banda estrecha grande

$$n_g = n + \omega \, dn / d\omega \quad (1)$$

dentro de la fibra. Este a su vez reduce la velocidad del grupo de los pulsos que se propagan contra la propagación de la luz de bombeo y genera un retardo del momento de su llegada a la salida de la fibra de

$$\Delta T_g = g_0 P_p L / (\Gamma_\beta A_{\text{eff}}) \quad (2)$$

Siendo  $g_0$  coeficiente de ganancia de Brillouin,  $L$  la longitud y  $A_{\text{eff}}$  la superficie efectiva de la fibra. Se denomina  $P_p$  la potencia de la onda de bombeo y  $\Gamma_\beta / 2\pi$  el ancho de banda de Brillouin dentro de la fibra. Según la ecuación (2), el tiempo de retardo depende linealmente de la potencia de bombeo dentro de la fibra.

La llegada de un pulso a un nodo de conmutación, por tanto, se puede controlar a través de la potencia óptica de una onda de bombeo introducida en la fibra en el sentido contrario desde ese nodo de conmutación. Sin embargo, si la potencia de bombeo o la propia señal son demasiado grandes, esta relación sencilla ya no es aplicable, ya que la ganancia de Brillouin alcanza la saturación, lo que limita el tiempo de retardo máximo de los pulsos. Por regla general, el tiempo de retardo máximo se sitúa en aproximadamente 30 ns en fibras de pocos kilómetros de longitud. En experimentos se consiguieron tiempos de retardo de 60 ns con fibras de 50 km de longitud. Estos tiempos de retardo pueden incrementarse mediante retardos en cascada, mediante la separación de segmentos de la fibra con reductores unidireccionales de banda ancha. Puesto que la amplificación de señal se compensa una y otra vez, pueden impedirse una amplificación de la emisión espontánea de Brillouin y la saturación del proceso de amplificación. Con cuatro segmentos de fibra iguales pudo obtenerse un tiempo de retardo máximo de 152 ns.

Sin embargo, la SBS también presenta inconvenientes para este tipo de aplicaciones: por un lado, es especialmente estrecha de banda, y por otro, el retardo va acompañado de una fuerte distorsión de los pulsos, y la distorsión está relacionada con el reducido ancho de banda de la SBS. Así, la propagación de pulsos en la salida de la línea de retardo es indirectamente proporcional al ancho de banda de la SBS de la fibra. En una onda de bombeo coherente de 1550 nm de longitud de onda, la ganancia de Brillouin presenta en fibras monomodo estándar (SSMF) una envolvente con forma lorentziana de una anchura a media altura espectral de 30 MHz. Con este ancho de banda reducido pueden retardarse solamente velocidades de transmisión de unos 15 Mbit/s, y un retardo de 152 ns va acompañado de una propagación de pulsos de 42 ns a 102 ns.

Además de esta propagación de pulsos, las señales de datos en estas líneas de retardo de SBS están sometidas a otras distorsiones. Se trata, por ejemplo, de un aumento del tiempo de subida y caída de los pulsos, una ganancia variable sobre el ancho de pulso y un retardo variable dentro del ancho de pulso. Así, por ejemplo, se estudiaron las distorsiones generadas por la SBS en pulsos con una frecuencia de 10 MHz y un ancho de 40 ns, para lo cual se modificó continuamente la amplificación del máximo de pulso entre 0 dB y 23 dB. Los retardos obtenidos de esta forma se situaron entre 0 y 23 ns. Mediante un filtrado de banda estrecha se incrementaron los tiempos de subida y caída de los pulsos de 12,7 ns a 30,3 ns. Aquí el efecto de filtrado en señales cuadradas da lugar a que la forma de la onda se debilite por la falta de altas frecuencias y se reduzca la apertura del diagrama de ojo.

También se estudiaron posibilidades para aumentar el ancho de banda de la ganancia de Brillouin. Así, por ejemplo, la corriente del láser de bombeo se moduló por un valor inferior al 1 % con una secuencia pseudoaleatoria de bits (pseudorandom bit sequence PRBS) de una velocidad de transmisión de 38 Mbit/s. El resultado fue un espectro de bombeo acompañado aumentado a 325 MHz. Aquí la ganancia de Brillouin en la fibra es el plegado entre el espectro de la bomba y el espectro de Brillouin natural con forma lorentziana, que presenta un ancho de aproximadamente 30 MHz. Cuando la onda de bombeo tiene un espectro más ancho, el ancho del espectro total es determinado esencialmente por el ancho espectral de la onda de bombeo. Con el sistema anteriormente citado se retardaron pulsos de una duración temporal de 2,7 ns por un poco más de su longitud de pulso. Debido al gran ancho de banda, la propagación de pulsos fue inferior al 25 %.

Como otra posibilidad para obtener grandes anchos de banda slow light, se describió la modulación de la corriente del láser con una fuente de ruido. De esta forma, el ancho de banda slow light se pudo incrementar a 1,9 GHz. Con este ancho de banda pueden procesarse velocidades de transmisión de aproximadamente 1 Gb/s, y pulsos

de 400 ps de longitud se retardaron a 1 ns. El mismo concepto se usó también para incrementar el ancho de banda slow light a 12 GHz.

En todos los procedimientos aplicados hasta el momento para slow light y fast light sobre la base de la SBS se aprovechó la ganancia de banda estrecha para ralentizar los pulsos ópticos y la pérdida para acelerarlos. Para ello, el ancho de banda se incrementó mediante una modulación de la onda de bombeo. Sin embargo, dado que la onda de bombeo genera al mismo tiempo ganancia y pérdida, el ancho de banda máximo que se puede alcanzar está limitado por el desplazamiento de frecuencia de Brillouin. Así, al principio existe una gran separación entre la ganancia y la pérdida. Pero si el ancho de banda de la dispersión de Brillouin se incrementa mediante modulación, la ganancia y la pérdida se encuentran cuando el ancho de banda se corresponde con el desplazamiento de frecuencia de Brillouin. Si el ancho de banda se incrementa aún más, la ganancia y la pérdida se compensan en el rango de la frecuencia  $f_p$ . Si ambas se anulan mutuamente, el índice de refracción del grupo resultante se corresponde con el de una fibra sin onda de bombeo. El ancho de banda máximo que se puede obtener con un láser de bombeo asciende por tanto aproximadamente al doble del desplazamiento de Brillouin en la fibra. Con una longitud de onda de bombeo de 1550 nm, esto son en SSMF cerca de 22 GHz. La velocidad de transmisión máxima procesada así se sitúa en la magnitud del medio ancho de banda, es decir cerca de 10 Gbit/s, siendo la distorsión resultante relativamente grande. Los sistemas modernos de telecomunicaciones ópticas, sin embargo, transmiten velocidades de transmisión de 40 Gbit/s y más. Con esas velocidades de transmisión tan elevadas, los sistemas conocidos fracasan.

El objetivo de la invención es ahora crear un procedimiento que se pueda realizar de forma económica con medios sencillos y que permita retardos y aceleraciones de señales también con velocidades de transmisión elevadas. Además, la invención tiene como objetivo crear un sistema para realizar el procedimiento.

Estos objetivos se logran mediante el procedimiento según la reivindicación 1 y el sistema según la reivindicación 7. En las reivindicaciones subordinadas se describen configuraciones ventajosas.

La idea esencial de la invención consiste en utilizar al menos dos fuentes de bombeo de ancho de banda casi idéntico y solapar compensar o incluso "sobrecompensar" uno de los dos picos de Brillouin generados por la primera fuente de bombeo con el pico de Brillouin de signo invertido de la segunda fuente de bombeo al menos en una medida considerable: cuando una pérdida de Brillouin de una fuente de bombeo está "apagada", el ancho de banda de la ganancia de Brillouin de esta fuente de bombeo puede, no obstante, incrementarse por encima de la medida del desplazamiento de Brillouin. Esta compensación se obtiene porque, además de la radiación del primer bombeo se introduce una segunda radiación de bombeo en la guía de ondas, cuya frecuencia está desplazada respecto a la primera radiación de bombeo de forma que el espectro de ganancia del segundo se compensa al menos parcialmente con el espectro de pérdida del primero. Esto se puede lograr cuando las frecuencias de ambas fuentes de bombeo se ajustan de forma que estén separadas entre sí aproximadamente el doble del desplazamiento de Brillouin.

En este punto hay que subrayar que el término "ganancia de Brillouin" se refiere al espectro de banda estrecha (Stokes peak) con la frecuencia reducida por el desplazamiento de Brillouin y "pérdida de Brillouin" se refiere al espectro de banda estrecha (anti-Stokes peak) con la frecuencia incrementada por el desplazamiento de Brillouin con respecto a la frecuencia de las señales y signo contrario. Una interacción con la "ganancia de Brillouin" da lugar a un retardo de las señales, mientras que la "pérdida de Brillouin" causa una aceleración. Cuando se describe a continuación la invención esencialmente con la ayuda de la ganancia de Brillouin y el retardo, se aplica lo mismo a la pérdida de Brillouin y por tanto a la consecuente aceleración de las señales.

Para estas medidas para influir en la velocidad de propagación de las señales formadas por pulsos luminosos existen diferentes aplicaciones. Con el retardo puramente óptico según la invención, por ejemplo, se pueden realizar almacenes intermedios en sistemas de la transmisión óptica de paquetes o se pueden sincronizar diferentes flujos de bits en redes de conmutación ópticas. Además puede utilizarse para la corrección de pulsos ópticos perturbados y para el control de la característica de emisión o recepción de sistemas de antenas. Los almacenes intermedios ópticos realizados con la tecnología según la invención pueden representar un componente clave en los futuros sistemas de procesamiento ópticos de comunicaciones e información.

A fin de obtener la mejor compensación posible de los picos, los anchos de banda de las fuentes ópticas que generan las radiaciones de bombeo, que están especialmente formados por láseres ("láseres de bombeo"), se ajustan al menos a una medida casi idéntica. Entonces, cuando se incrementa artificialmente el ancho de banda del primer láser que genera el pico "útil" a efectos de un mayor retardo de las señales luminosas, por ejemplo, mediante modulación, resulta ventajoso implementar esta modulación también al láser de bombeo "compensador".

La posibilidad de incrementar aún más el ancho de banda de la ganancia se logra conectando otros láseres de bombeo de esta forma, y la ganancia del siguiente siempre compensa la pérdida del anterior.

Puesto que el espectro slow light en el tipo según la invención puede adaptarse a cada aplicación, también pueden utilizarse simultáneamente varias unidades de bombeo para, por ejemplo, retardar independientemente entre sí diferentes canales de un sistema multiplexado compacto por división en longitudes de onda (WDM). El retardo máximo que se puede obtener con un sistema de este tipo sobre la base de la SBS depende del ancho de banda de la ganancia de Brillouin y el comportamiento de saturación de la SBS. Si la potencia de bombeo es demasiado grande, se produce un proceso estimulado. En este caso, la onda de bombeo pierde en gran medida potencia óptica en el pulso que se propaga en dirección contraria y ya no puede retardarlo más. Este proceso de saturación da lugar a que con líneas de retardo SBS se pueda realizar normalmente un retardo máximo de 30 ns. Si se incrementa el ancho de banda slow light, el tiempo de retardo se reduce. Se sabe que es posible un incremento del retardo mediante la disposición en cascada de varias líneas SBS, lo que sin embargo está asociado a un gran coste técnico. Ahora, con la invención se pueden lograr grandes tiempos de retardo en una única línea de retardo mediante la reducción de la saturación del proceso de Brillouin con una fuerte reducción del coste técnico. Para ello se genera una ganancia de banda estrecha en un amplio espectro de pérdida.

A continuación se explica la invención con más detalle con la ayuda de las figuras 1 a 6. Se muestran:

**Figura 1** la disposición espectral de los picos de dos fuentes de bombeo

**Figura 2** el incremento del ancho de banda

**Figura 3** un sistema para la realización del procedimiento

**Figura 4** la superposición con un espectro de ganancia de banda estrecha

**Figura 5** la modificación del índice de refracción del grupo y

**Figura 6** resultados de mediciones.

La figura 1 muestra en primer lugar la idea básica del procedimiento aquí propuesto. En dirección contraria a la propagación de las señales en una fibra de vidrio se alimenta a la fibra de vidrio un primer láser de bombeo 1 con una frecuencia  $f_{p1}$ . Este genera un espectro de ganancia 2 en la frecuencia  $f_{p1} - f_B$  y un espectro de pérdida 3 en la frecuencia  $f_{p1} + f_B$  (línea discontinua). De la misma forma se acopla en la fibra de vidrio un segundo láser de bombeo 4, en el que la frecuencia de este se ajusta de tal forma que su "pico de ganancia" 5 se sitúa en la frecuencia del "pico de pérdida" 3 del primer láser de bombeo 1. La frecuencia del segundo láser de bombeo 4 se sitúa por tanto en  $f_{p2} = f_{p1} + 2f_B$ . Este genera asimismo una ganancia 5 en  $f_{p2} - f_B$  y una pérdida 6 en  $f_{p2} + f_B$  (línea de trazos y puntos). Puesto que aquí los anchos de banda de ambos láseres de bombeo son idénticos, la pérdida 3 del primer láser de bombeo 1 aparece en el mismo rango espectral que la ganancia 5 del segundo láser de bombeo 4, ya que  $f_{p2} - f_B = f_{p1} + 2f_B - f_B = f_{p1} + f_B$ . Si las potencias de ambos láseres de bombeo fueran idénticas, se produciría una compensación completa recíproca de los picos. Por tanto, la pérdida del primer láser de bombeo en cierta medida ya no existe, de forma que el ancho de banda puede incrementarse por la medida conocida, por ejemplo, mediante modulación.

Si la potencia del segundo láser de bombeo 4, tal y como se muestra aquí, es mayor que la del primero 1, se produce una sobrecompensación de la pérdida de Brillouin 3 del primer láser de bombeo 1, de forma que en ambos lados de la frecuencia del primer láser de bombeo 1 aparece un "espectro de ganancia" 7 (línea continua). Si ahora se incrementa el ancho de banda de ambos láseres de bombeo mediante modulación, ambas ganancias se solapan. El resultado es una ganancia especialmente ancha de banda.

La figura 2 muestra el incremento del ancho de banda en tres etapas, en el que los anchos de banda están medidos en la dimensión del desplazamiento de Brillouin  $f_B$ . En este caso, el pico de pérdida de la primera fuente de bombeo se sobrecompensa hasta tal medida que el pico de ganancia 8 correspondiente y el pico de pérdida 9 sobrecompensado tienen el mismo valor. La línea de trazos y puntos muestra dos láseres de bombeo del ancho de banda de  $1/5 f_B$ . Ambos picos están claramente separados entre sí. La línea discontinua muestra dos láseres de bombeo del ancho de banda de  $f_B$ . En este caso los picos ya se solapan, y el solapamiento en el ancho de banda de  $2f_B$  es casi completo (línea continua).

En la figura 3 está representado un sistema para la realización del procedimiento. En él, unas señales, aquí en forma de dos secuencias de bits 10 y 11, proceden de una red óptica 12. La secuencia de bits 11 en la longitud de onda portadora  $\lambda_2$  debe retardarse con respecto a la secuencia de bits 10 en la longitud de onda portadora  $\lambda_1$  y conducirse a una unidad de procesamiento 13.

La secuencia de bits 11 que se debe retardar se mueve de derecha a izquierda a través del medio de Brillouin, que está formado por una SSMF 14. En dirección contraria se propagan dos ondas de bombeo de los diodos de láser 15 y 16, que generan una ganancia de Brillouin en la fibra 14. Las ondas de bombeo se alimentan a la fibra 14 a través

de un circulador 17 a través del puerto 1->2 de este. Las secuencias de bits 11 y 12 se desacoplan de la fibra 14 a través del mismo circulador 17 a través del puerto 2->3 de este y se conducen a la unidad de procesamiento 13.

5 El espectro de ganancia para el retardo de la secuencia de bits 11 es generado por la unidad de bombeo 18. Esta incluye los dos diodos de láser 15 y 16, una fuente de ruido 19, un acoplador ajustable 20 y un potenciómetro 21. Para que los dos diodos de láser 15 y 16 tengan el mismo ancho de banda, son modulados por la fuente de ruido 19 común directamente a través de la corriente de excitación de esta. El ancho de banda de un diodo del láser modulado directamente depende del grado de modulación y por tanto de la intensidad de la corriente de la fuente de ruido. Esta se puede ajustar mediante el potenciómetro 21.

10 También son posibles otros tipos de ampliación de la ganancia de Brillouin, como, por ejemplo, una modulación externa de los láseres o una modulación con una secuencia de bits. Fuentes de bombeo, además de los diodos de láser, pueden ser también otros láseres como, por ejemplo, láseres de gas o de estado sólido.

15 Las longitudes de onda de ambos láseres se ajustan de la forma descrita anteriormente, de modo que el espectro de ganancia de uno de los láseres compensa el espectro de pérdida del otro, y las intensidades se ajustan de forma que se produce una sobrecompensación. Puesto que en este ejemplo debe retardarse la secuencia de bits 11 con respecto a la secuencia de bits 12, esto se ajusta mediante el espectro de ganancia sumada generado por los diodos de láser 15 y 16 de tal forma que este se corresponde con el espectro de la señal que se debe retardar. Si el espectro de la señal que se debe retardar es muy ancho de banda, se le puede adaptar el espectro de ganancia mediante la adición de otros láseres de bombeo.

20 Para conseguir un espectro de ganancia de Brillouin lo más plano posible, las potencias ópticas de los diodos de láser 15 y 16 se ajustan en una determinada relación entre sí. Esto se realiza con el acoplador ajustable 20. Se pueden acoplar otros láseres de bombeo mediante otros acopladores ajustables correspondientes. Mediante el amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA) 22 se amplifica la potencia de bombeo, y se mantiene la relación de las potencias ópticas de las ondas de bombeo entre sí. Además del EDFA 22 también se pueden usar todos los demás métodos de amplificación óptica. Entonces las señales se desacoplan de la fibra 14 a través del puerto 2->3 del circulador 17 y se transmiten para su posterior procesamiento.

25 En una línea de retardo SBS convencional, la saturación, y por tanto el retardo máximo, es una función del valor de la ganancia SBS, mientras que el retardo o la aceleración de los pulsos dependen de la medida de la modificación de la ganancia de Brillouin con la frecuencia. Si aquella se modifica lentamente, entonces el índice de refracción del grupo y, por tanto, también el retardo, son reducidos. Sin embargo, si se modifica rápidamente, ambos son elevados. Una reducción del valor de la ganancia manteniendo al mismo tiempo la modificación con la frecuencia da lugar por tanto a unos tiempos de retardo más grandes. Esto se logra mediante la generación de un espectro de ganancia de banda estrecha con el segundo de los dos láseres de bombeo dentro de un amplio espectro de pérdida que es generado por el primero de los láseres de bombeo. Esta disposición de las frecuencias de los dos láseres de bombeo 23 y 24 se muestra en la figura 4. Esta disposición se corresponde en principio con la de la figura 1. La diferencia está, sin embargo, en que ahora el espectro de pérdida 25 del láser de bombeo 23 (línea discontinua) es más ancho que el espectro de ganancia 26 del láser de bombeo 24 (línea de trazos y puntos). En el solapamiento 27 (línea continua) de la ganancia 26 y la pérdida 25, la pérdida, que es generada por  $f_p$ , presenta un fuerte desplome en el centro.

35 Por tanto, un sistema slow light convencional es al mismo tiempo también un amplificador óptico. Cuando se retarda la señal, al mismo tiempo se amplifica. El retardo máximo está limitado entonces por la saturación del amplificador. Tal como se muestra, se puede reducir la saturación del amplificador con la ayuda de un espectro de pérdida, que sea más ancho que el espectro de ganancia. De esta forma se alcanzan tiempos de retardo de aproximadamente 100 ns. Al contrario que los sistemas de retardo SBS convencionales, en este caso el retardo es independiente de la intensidad de las señales. Así, con la invención se puede adaptar la potencia de salida de las señales retardadas a la aplicación correspondiente.

40 La figura 5 muestra la modificación del índice de refracción del grupo y por tanto el retardo previsible de una ganancia de Brillouin pura (línea discontinua) y la ganancia de Brillouin modificada con el método aquí descrito (línea continua). Tal y como se puede ver, la ganancia absoluta para un láser de bombeo individual es más elevada (imagen pequeña a la izquierda) que cuando se genera al mismo tiempo una pérdida con el segundo láser (imagen pequeña a la derecha). A pesar de ello, la modificación del índice de refracción del grupo se comporta para ambos de forma casi idéntica y el retardo máximo alcanzable es idéntico. Un ancho de banda slow light de este tipo puede conseguirse, p. ej., mediante una modificación del ajuste del potenciómetro. Esto ocasiona una modificación independiente de la parte de ruido en la corriente de excitación de ambos diodos de láser. Puesto que con la modulación directa el ancho de banda de la onda de bombeo se determina por la profundidad de modulación de la corriente de excitación, esto permite modificar el ancho de banda de ambos láseres de forma independiente entre sí.

En vez de alojar una ganancia en un espectro de pérdida para lograr una desaceleración de las señales, el método arriba descrito permite alojar también una pérdida en un espectro de ganancia para hacer que las señales vayan más de prisa.

5 La figura 6 muestra los resultados medidos para la modificación del espectro de ganancia de Brillouin. En la figura superior 6a, un láser de bombeo ha generado a derecha e izquierda una ganancia de Brillouin mediante el método de la figura 1. En la figura inferior a la izquierda 6b se generó un espectro de ganancia en uno de pérdida, y en la figura inferior derecha 6c, un espectro de pérdida en uno de ganancia.

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

## REIVINDICACIONES

- 5 1. Procedimiento para influir en la velocidad de propagación de señales luminosas (10, 11) que se propagan con una velocidad de grupo dentro de una guía de ondas (14) en la dirección de propagación, en el que se acopla en la guía de ondas (14) una primera radiación de bombeo de un rango de frecuencia limitado en contra de la dirección de propagación de las señales luminosas (10, 11), en el que tiene lugar entre la primera radiación de bombeo y las señales luminosas (10, 11) una dispersión estimulada de Brillouin (SBS), en el que, adicionalmente a la primera radiación de bombeo, se acopla en la guía de ondas (14) una segunda radiación de bombeo, cuya frecuencia está desplazada respecto a la primera radiación de bombeo de manera que el espectro de ganancia (5) de la segunda radiación de bombeo solapa al menos parcialmente el espectro de pérdida (3) de la primera radiación de bombeo,  
10 **caracterizado porque,**  
los anchos de banda de las fuentes ópticas (15, 16) que generan las radiaciones de bombeo se ajustan a una medida al menos casi idéntica, y el espectro de ganancia (5) y el espectro de pérdida (6) se compensan al menos parcialmente.
- 15 2. Procedimiento según la reivindicación 1,  
**caracterizado porque,**  
el ancho de banda de las dos fuentes ópticas (15, 16) que generan las radiaciones de bombeo se incrementa con medios separados (19), especialmente mediante modulación.
- 20 3. Procedimiento según la reivindicación 1 o 2,  
**caracterizado porque,**  
la intensidad de la segunda fuente óptica (16) se incrementa por encima de la medida de la intensidad de la primera fuente óptica (15) para lograr una sobrecompensación.
- 25 4. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,  
**caracterizado porque,**  
se acopla a la guía de ondas (14) radiación de bombeo de una o varias fuentes ópticas adicionales en contra de la dirección de propagación, cuyas frecuencias están separadas entre sí aproximadamente el doble del desplazamiento de Brillouin, de forma que se produce una compensación de los espectros de fuentes ópticas adyacentes.
- 30 5. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,  
**caracterizado porque,**  
se utilizan como fuentes ópticas (15, 16) láseres de bombeo (1, 4), y el segundo láser de bombeo se ajusta a una potencia mayor que el primer láser de bombeo.
- 35 6. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,  
**caracterizado porque,**  
con el primer láser de bombeo (1) de la frecuencia  $f_{p1}$  se genera un espectro de ganancia (2) con una frecuencia  $f_{p1} - f_B$  y el espectro de pérdida (3) con una frecuencia  $f_{p1} + f_B$ , y porque con el segundo láser de bombeo (4) de una frecuencia  $f_{p2}$  se genera el espectro de ganancia (5) con una frecuencia  $f_{p2} - f_B$  y un espectro de pérdida (6) con una frecuencia  $f_{p2} + f_B$ .
- 40 7. Sistema para la realización del procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,  
**caracterizado por,**  
una unidad de bombeo (18) con al menos dos fuentes de bombeo, especialmente con láseres de bombeo (15, 16), de un ancho de banda casi idéntico para la generación de radiación de bombeo de diferente frecuencia, en el que existe un medio (17) que permite un acoplamiento de la radiación de bombeo de ambas fuentes en una guía de ondas (14) en contra de la dirección de propagación de señales luminosas (10, 11) que se propagan en esta, en el que las frecuencias de las fuentes de bombeo están escogidas de tal forma que el espectro de ganancia (5) y el espectro de pérdida (6) se compensan al menos parcialmente.
- 45 8. Sistema según la reivindicación 7,  
**caracterizado porque,**  
la unidad de bombeo (18) presenta una fuente de ruido (19) para modificar el ancho de banda de al menos uno de los láseres de bombeo (15, 16), en el que el grado de modulación puede ajustarse a través de la intensidad de la corriente existente en la fuente de ruido (19).
- 50 55 60



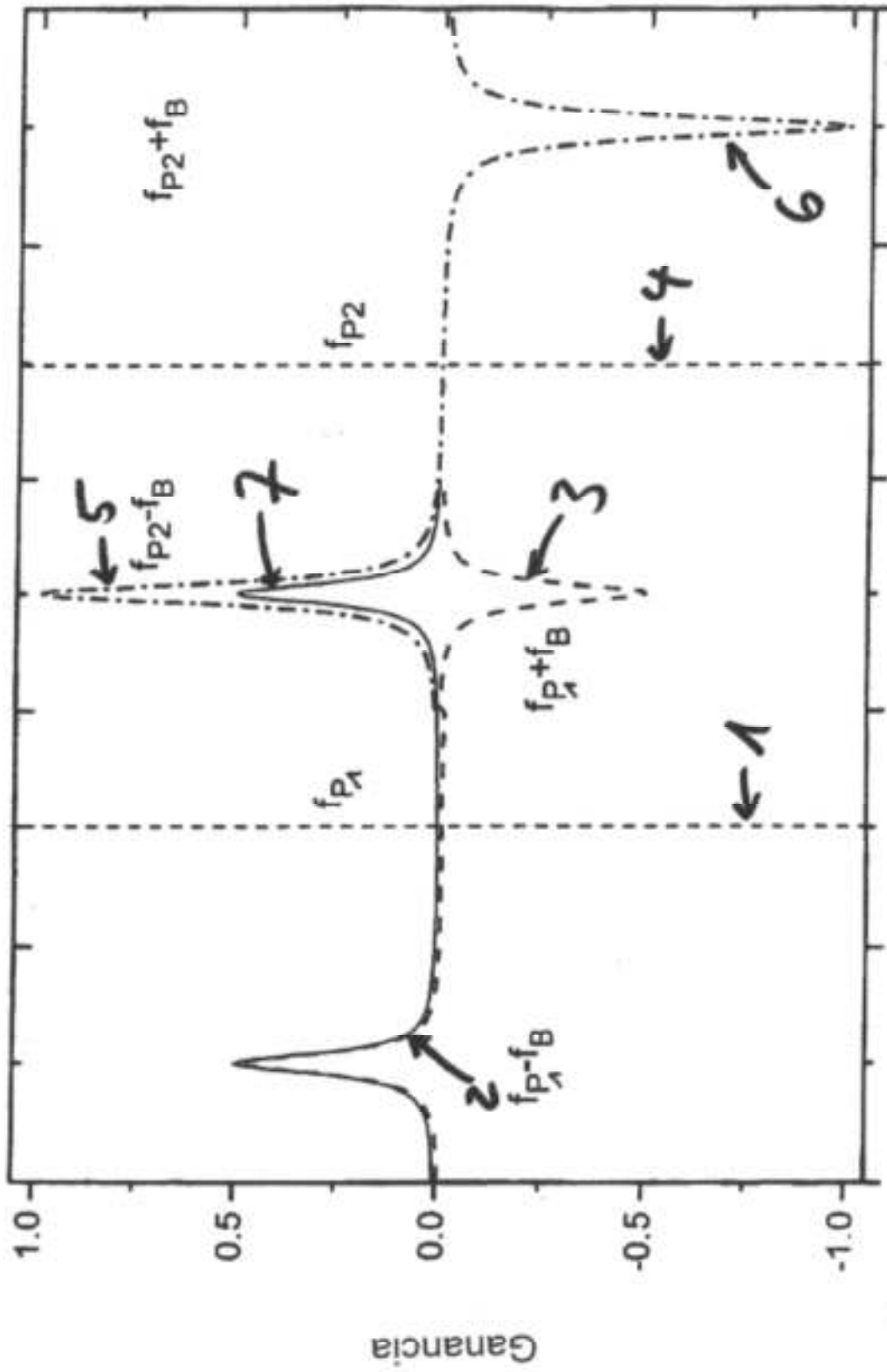


Fig. 1

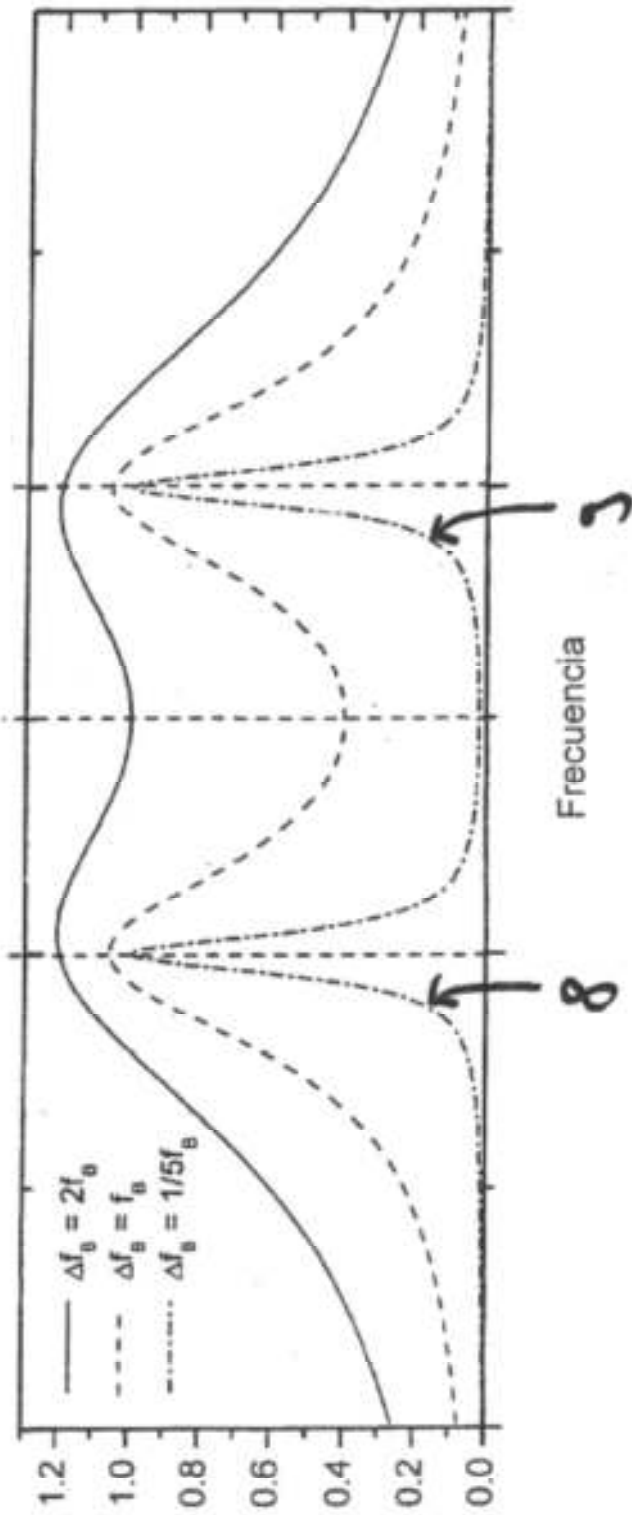


Fig. 2

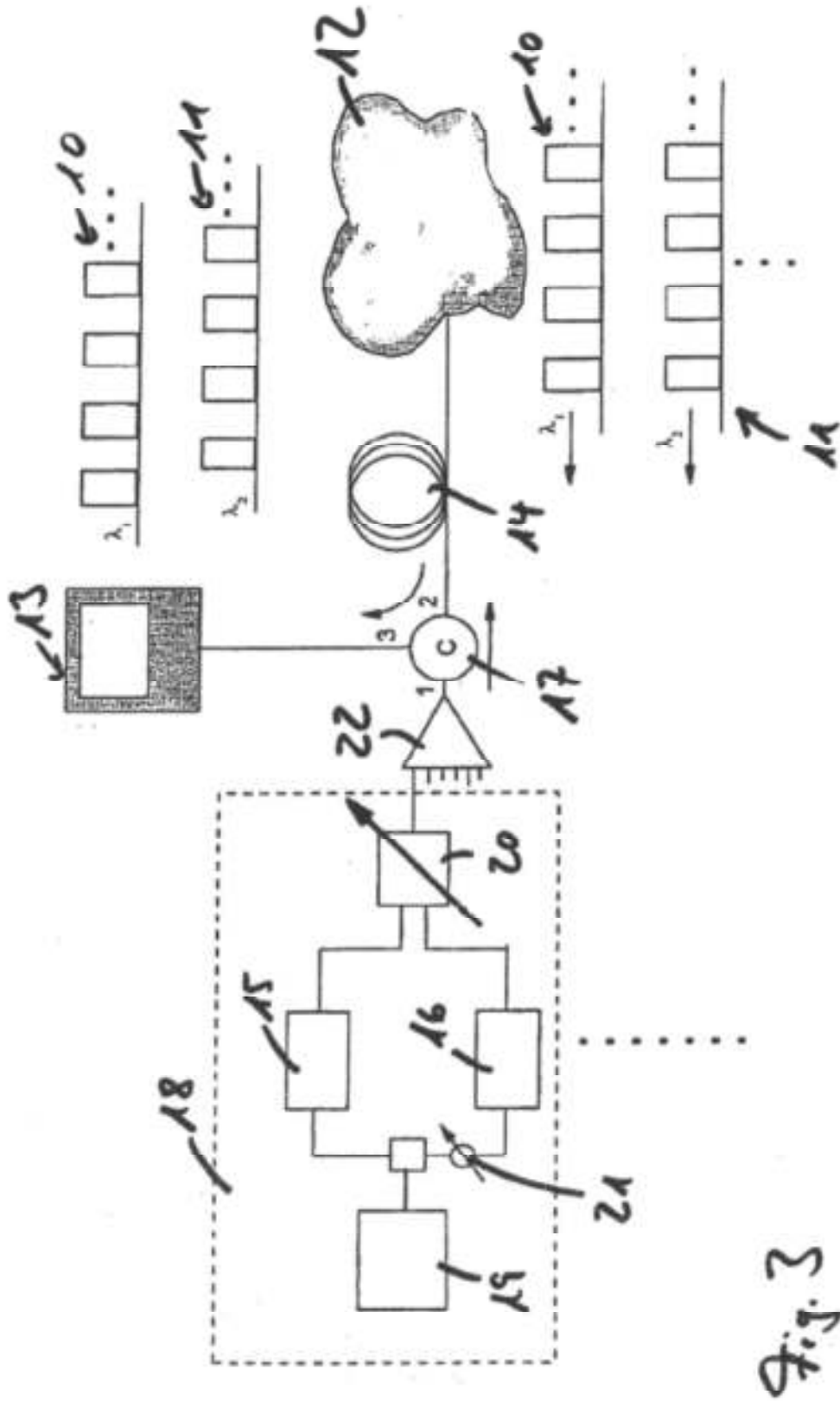


Fig. 3

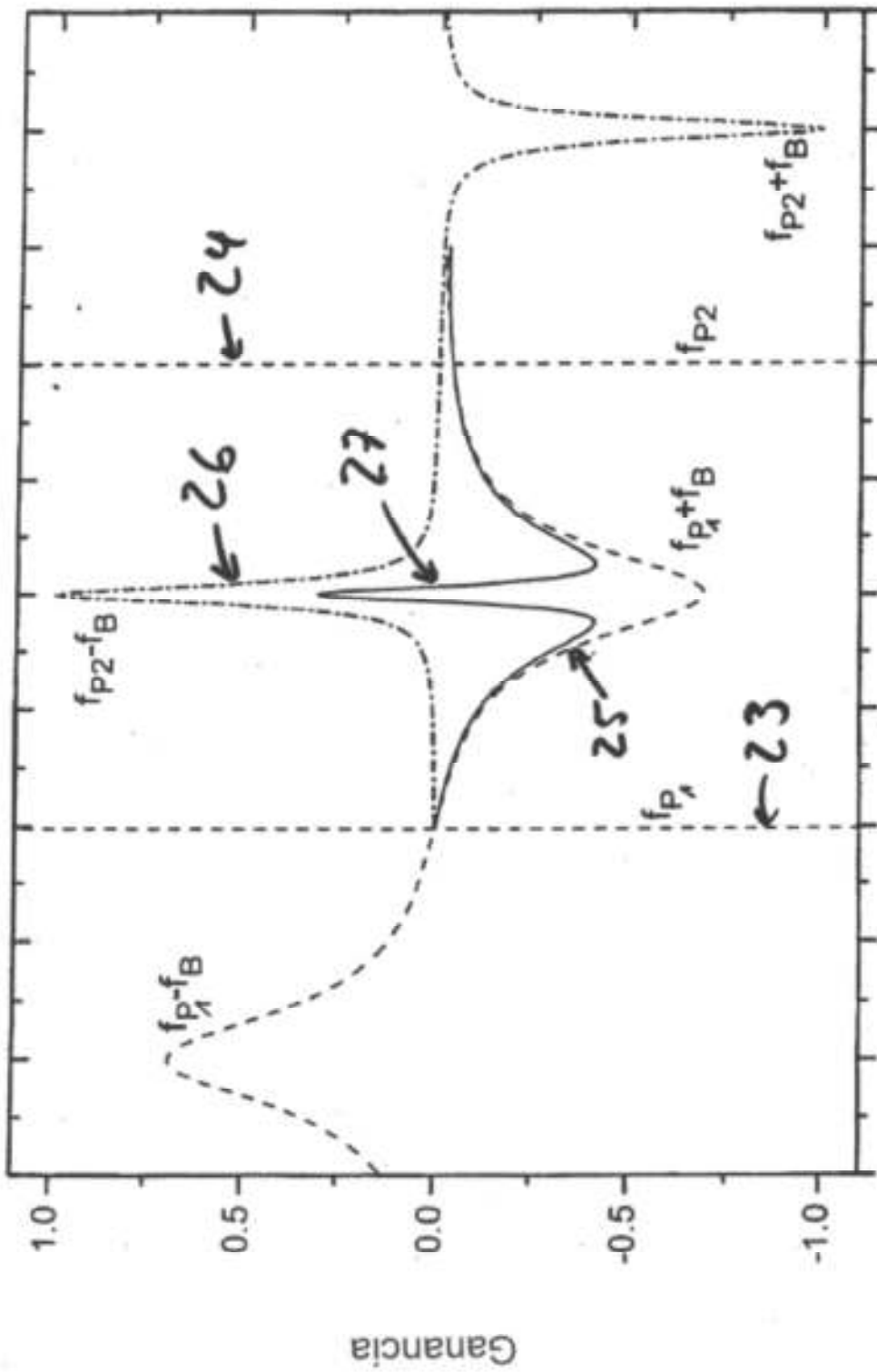


Fig. 4

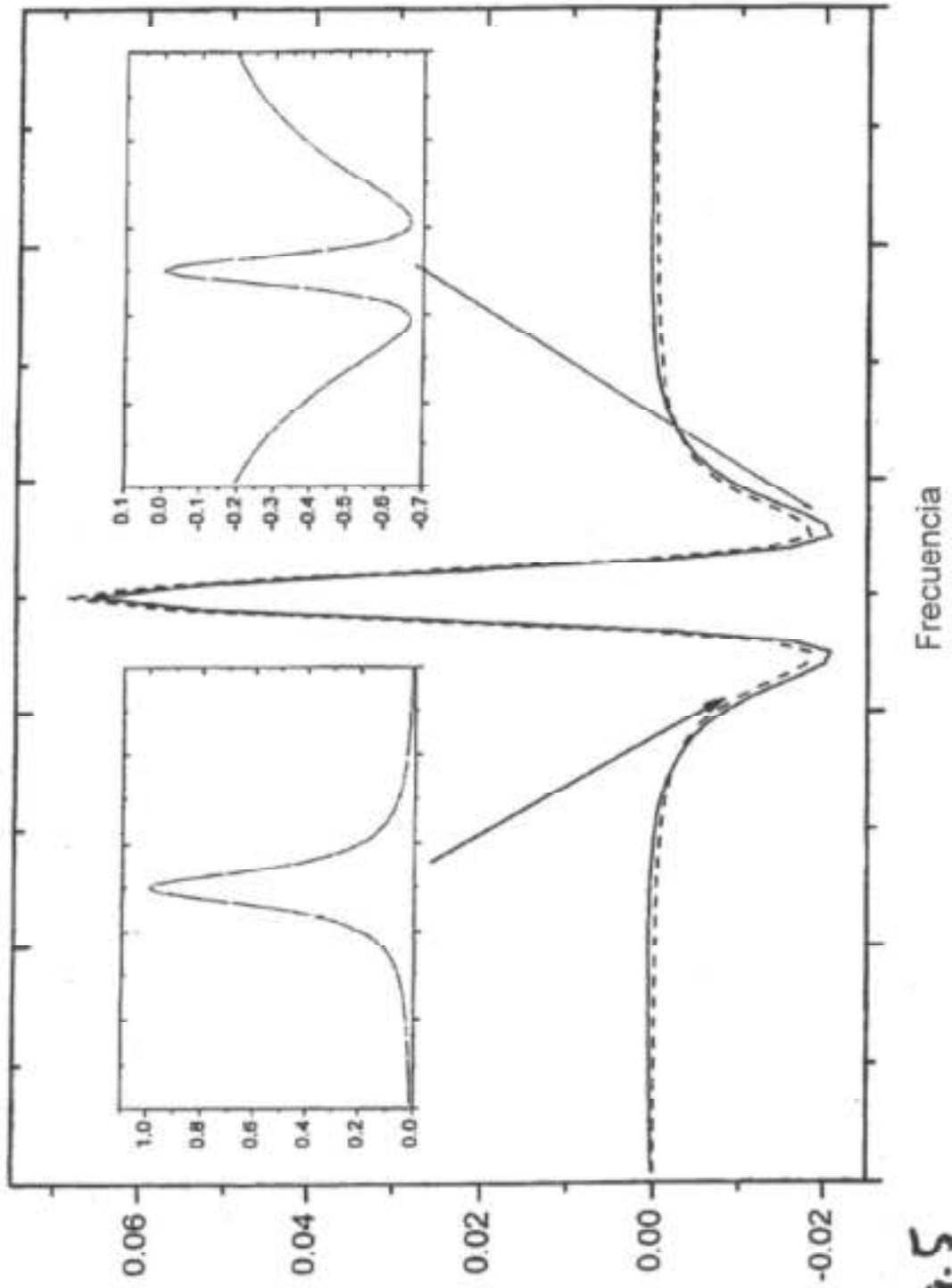


Fig. 5

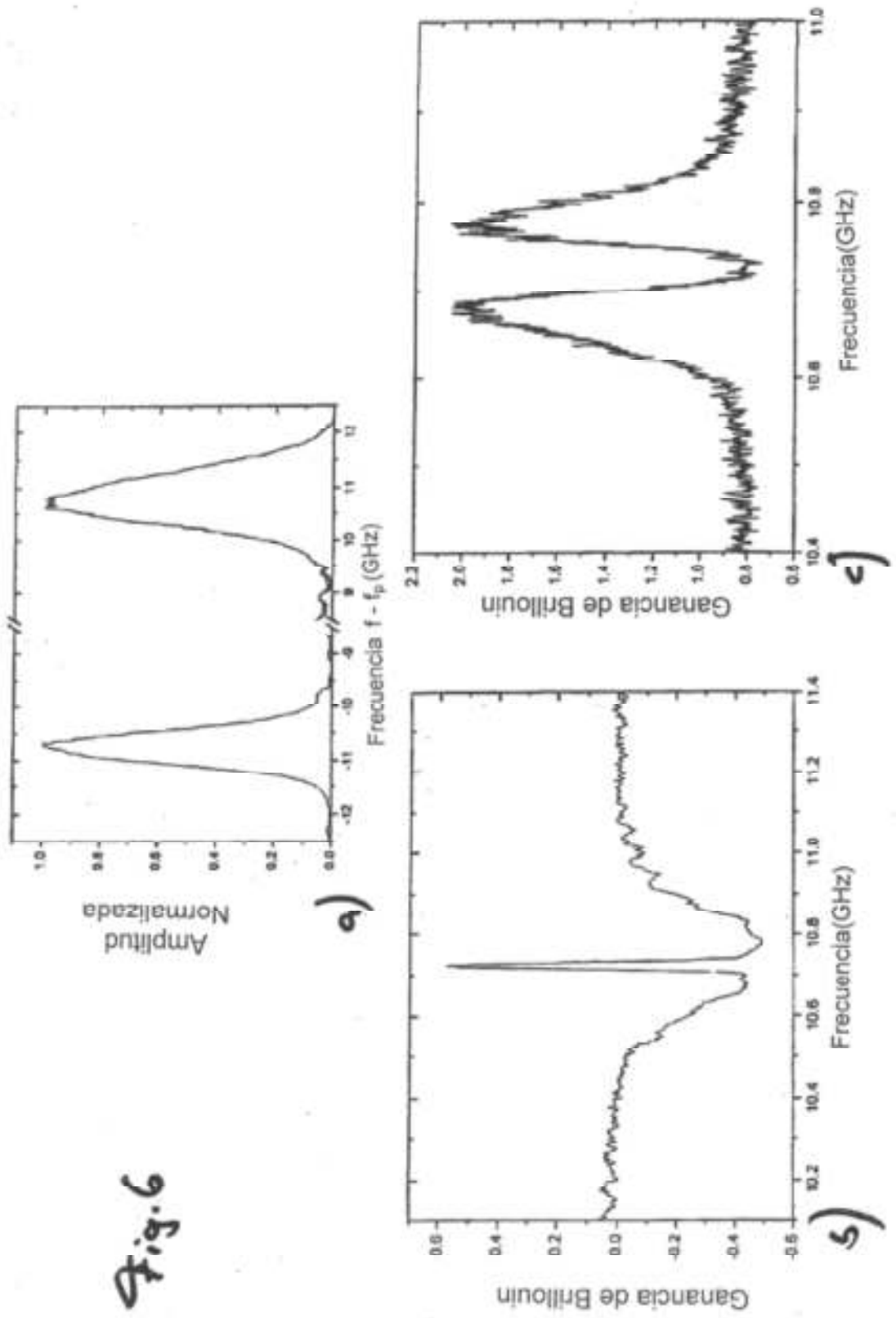


Fig.6