

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 372 771**

51 Int. Cl.:  
**G02B 6/122** (2006.01)  
**G02B 26/02** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **07735206 .0**  
96 Fecha de presentación: **21.03.2007**  
97 Número de publicación de la solicitud: **2008134**  
97 Fecha de publicación de la solicitud: **31.12.2008**

54 Título: **PROCEDIMIENTO PARA PRODUCIR DISPOSITIVOS FOTÓNICOS REGRABABLES.**

30 Prioridad:  
**22.03.2006 IT TO20060216**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**26.01.2012**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**26.01.2012**

73 Titular/es:  
**Consiglio Nazionale delle Ricerche  
Piazzale Aldo Moro 7  
00185 Roma, IT**

72 Inventor/es:  
**WIERSMA, Diederik Sybolt;  
VIGNOLINI, Silvia;  
TÜRCK, Volker y  
INTONTI, Francesca**

74 Agente: **Linage González, Rafael**

ES 2 372 771 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**

Procedimiento para producir dispositivos fotónicos regrabables.

5 La presente invención se refiere a un procedimiento para producir un dispositivo fotónico espacialmente regrabable.

En la tecnología de telecomunicaciones y electrónica moderna existe una tendencia hacia la creación de dispositivos y circuitos ópticos. Con el fin de producir estos componentes de cristales fotónicos, se usan los también denominados materiales fotónicos de banda prohibida.

10 Un cristal fotónico es un material dieléctrico con variaciones periódicas en la constante dieléctrica. Este fenómeno tiene una influencia sobre la propagación de la luz que es similar a la que tiene el potencial del cristal atómico sobre la estructura electrónica. Esta variación periódica da como resultado, de hecho, la formación de una banda óptica prohibida, de una manera muy similar a la que se produce en el interior de los semiconductores con respecto a los niveles de energía que están prohibidos para los electrones.

15 Las ondas electromagnéticas con una frecuencia comprendida dentro de un cierto intervalo, denominada la banda fotónica prohibida, son incapaces de propagarse en el interior del cristal fotónico y también se evita la emisión espontánea de luz dentro de este intervalo de frecuencias.

20 La frecuencia central, y la anchura de esta de esta energía prohibida dependen de la variación en el índice de refracción, que en estos materiales puede verse modificado externamente.

25 La introducción de defectos en el interior del cristal fotónico da como resultado la formación de estados de energía permitidos en el interior de la banda fotónica prohibida o da como resultado la modificación de los estados prohibidos.

30 Un cristal fotónico bidimensional se construye creando en el interior de una estructura planar homogénea un efecto periódico en dos direcciones; esto se puede obtener, por ejemplo, formando una sucesión periódica de poros cilíndricos que se extienden por el espesor total de la estructura planar.

35 La introducción de defectos en este cristal fotónico permite la propagación de modos comprendidos dentro del intervalo de frecuencias que comienza con la banda fotónica prohibida o da como resultado la formación de estados localizados.

La creación de estos defectos, sin embargo, es una operación técnicamente compleja. La tecnología actual para la creación de estos defectos consiste, por ejemplo, en la inserción de poros con dimensiones diferentes de entre los que forman el cristal o en la eliminación de algunos poros de la matriz porosa.

40 El documento WO 02/086615 da a conocer un procedimiento y un aparato para conmutar señales ópticas con un dispositivo fotónico de banda prohibida; el documento WO 02/14913 da a conocer un dispositivo para guiado de ondas mediante un cristal fotónico activo; el documento US 2005/0111804 da a conocer fibras de cristal fotónico de material compuesto y un procedimiento de producción.

45 El documento WO 02/082042 da a conocer un procedimiento para la creación de un dispositivo fotónico que comprende las etapas de proporcionar un cristal fotónico que tiene una pluralidad de cavidades e inyectar selectivamente en cavidades predeterminadas una microcantidad de un líquido con el fin de permitir la introducción de estados permitidos dentro de la banda fotónica prohibida del cristal o la modificación de los estados prohibidos.

50 El preámbulo de la reivindicación 1 se basa en el documento WO 02/082042.

55 Un objeto de la presente invención es proponer un procedimiento innovador para la introducción de defectos en un cristal fotónico con el fin de poder construir fácilmente dispositivos y circuitos fotónicos que sean regrabables o capaces de grabarse, borrarse y regrabarse.

Estos y otros objetos se consiguen de acuerdo con la invención mediante un procedimiento, cuyos principales rasgos característicos se definen en las reivindicaciones adjuntas.

60 De acuerdo con el procedimiento de la invención, según se define en la reivindicación 1, los defectos se crean por medio de la inyección selectiva de un líquido en poros predeterminados del cristal fotónico, en un modelo adecuado para permitir la propagación de longitudes de onda específicas que de otra forma quedarían inhibidas.

65 En principio, el líquido usado puede ser cualquier líquido que tenga una viscosidad tal que permita su suministro por medio de micropipeta.

La volatilidad y la viscosidad del líquido se pueden escoger dependiendo de las características de estabilidad

deseadas del dispositivo fotónico.

Las características y ventajas adicionales de la invención llegarán a ser evidentes a partir de la descripción detallada que sigue, proporcionada meramente por medio de un ejemplo no limitante con referencia a los dibujos adjuntos en los que:

- La Figura 1 es un diagrama del aparato de prueba usado para implementar el procedimiento de acuerdo con la invención;

- La Figura 2 es un diagrama que ilustra el funcionamiento de un microscopio en modo reflexión, usado para controlar el proceso de infiltración;

- La Figura 3 es un diagrama que ilustra el funcionamiento en modo luminiscencia del microscopio de acuerdo con la Figura 2;

- La Figura 4 es una imagen de una muestra infiltrada usando el procedimiento de acuerdo con la invención;

- La Figura 5 es una imagen que muestra un detalle de una muestra con las respectivas gráficas de fotoluminiscencia;

- La Figura 6 es una imagen que muestra la variación de la constante dieléctrica y la distribución espacial del modo TE del detalle de acuerdo con la Figura 5;

- La Figura 7 es una imagen que muestra una guía de ondas creada con el procedimiento de acuerdo con la invención;

- La Figura 8 es el diagrama de bandas para los modos TE de la estructura que se muestra en la Figura 7;

- La Figura 9 muestra la intensidad del campo eléctrico y del campo magnético asociado a un modo TE de la guía de acuerdo con la Figura 8; y

- La Figura 10 es una imagen que muestra los campos eléctrico y magnético asociados a un modo TE de una cavidad anular creada con el procedimiento de acuerdo con la invención.

En la Figura 1, 1 denota el aparato de prueba usado para implementar el procedimiento de acuerdo con la invención.

Este aparato 1 comprende un cristal fotónico bidimensional 2 constituido por un soporte 4 y una pluralidad de cavidades cilíndricas 6. Estas cavidades 6 solo se abren en un lado 8 del soporte 4 por medio de orificios circulares 10.

Estas cavidades 6 se infiltran con un líquido 12 suministrado por medio de una micropipeta 14. El procedimiento para llevar a cabo esta infiltración requiere un control muy preciso del aparato de prueba completo debido a que las cantidades típicas de líquido que deben introducirse en las cavidades 6 del cristal fotónico 2 son del orden de decenas de femtolitros, es decir, aproximadamente cuatro órdenes de magnitud más pequeños que la cantidad de líquido que emerge de los cabezales de la impresora de chorro de tinta más sofisticada. El proceso de infiltración se controla mediante un microscopio de barrido de láser confocal (MBLC) indicado en la Figura 1 por 16. Este microscopio se monta normalmente sobre un microscopio comercial normalizado y está equipado con un sistema de microinfiltración desarrollado para aplicaciones moleculares, con el fin de transferir cantidades controladas de líquido al interior de las células.

El sistema de microinfiltración consiste en una serie de micropipetas 14 que tienen un diámetro externo de entre 0,1  $\mu\text{m}$  y 1  $\mu\text{m}$  y que se pueden desplazar, sobre la superficie de la muestra, con una precisión menor de o igual a 0,1  $\mu\text{m}$ . La transmisión hidráulica del desplazamiento de las pipetas reduce drásticamente las vibraciones.

Cuando la pipeta está situada en la posición correcta sobre la muestra, se aplica una presión controlada a la misma. La fuerza ejercida por esta presión produce la infiltración del líquido. En general, es preferible usar un líquido cuya tensión de vapor sea tal que el líquido infiltrado en los poros no está sujeto a evaporación total a temperatura ambiente durante un plazo de al menos un día.

Dado que las fuerzas de capilaridad ralentizan enormemente la evaporación en el interior de los poros, se usan también líquidos que son relativamente volátiles tales como el agua o hidrocarburos. Estas fuerzas de capilaridad son capaces de retener el líquido en el interior de las cavidades incluso si estas últimas no fuesen ser orificios pasantes o no deberían estar cerrados en un extremo como en el ejemplo descrito en el presente documento; esto es posible debido al hecho que las fuerzas de capilaridad que aparecen en estos casos, cuando los diámetros de los orificios son muy pequeños, son mayores que la correspondiente fuerza de la gravedad que podría obligar por otra parte a causar que el líquido fluya hacia el exterior.

Otros líquidos que se pueden usar con éxito en este procedimiento son suspensiones de micropartículas o nanopartículas, tales como puntos cuánticos, en un líquido, o aceites, que se pueden usar para obtener dispositivos fotónicos que son estables durante un periodo prolongado de algunos años o similar.

5 Una alternativa que es de particular interés es la de los cristales líquidos. Estos son de particular interés debido a que tienen un índice de refracción que depende de la temperatura y de un posible campo eléctrico externo que se aplica a los mismos. En este caso, es posible producir dispositivos sintonizables, concretamente, dispositivos que varían su comportamiento dependiendo de la variación de temperatura o del campo eléctrico aplicado. Por ejemplo,  
10 es posible producir un desviador capaz de enviar la luz en diferentes direcciones tras la variación del campo eléctrico aplicada localmente a diferentes puntos del cristal fotónico.

La capacidad de sintonización de un dispositivo puede, además, obtenerse también mezclando dos o más líquidos que tienen diferentes índices de refracción.

15 Se puede llevar a cabo la eliminación del líquido de los poros con el fin de permitir la regrabación del dispositivo, por ejemplo, disponiendo el cristal fotónico infiltrado en el interior de un baño de ultrasonidos.

20 Con el fin de obtener dispositivos fotónicos permanentes (no regrabables) se prevé el uso de líquidos que sean capaces de endurecerse o reticularse tales como prepolímeros resistentes o líquidos, por ejemplo.

En una realización preferida, se añade al líquido un trazador, por ejemplo, un colorante fluorescente, capaz de emitir una radiación en la gama visible cuando se excita. La presencia de este trazador permite controlar las etapas de infiltración, permitiendo la localización del líquido en el interior de los poros.

25 En un ejemplo de la realización de este procedimiento, es posible infiltrar en las cavidades de un cristal fotónico bidimensional una disolución de agua y Rodamina 6G, un tinte orgánico que, cuando se excita adecuadamente, emite luz en el visible. El cristal fotónico puede ser, por ejemplo, una muestra de silicio macroporoso producido por medio de grabado electroquímico de un sustrato de silicio del tipo p; los poros se pueden organizar en una simetría triangular caracterizada por dos constantes de red diferentes, iguales a 1,5  $\mu\text{m}$  y 4,2  $\mu\text{m}$ .  
30

Las propiedades químicas y físicas de la disolución infiltrada son muy interesantes: en primer lugar, el índice de refracción de la disolución acuosa es de 1,33 y, debido a que la disolución actúa como un defecto local, se crean de esta manera estados permitidos dentro de la banda fotónica prohibida. La viscosidad del líquido es de 1 mPa/s y por tanto, es tal que facilita su deposición en el interior de las cavidades del cristal. Finalmente, debido a la luminiscencia de la disolución, es posible verificar la ejecución correcta de la etapa de infiltración observando la superficie de la muestra con el microscopio MBLC en la configuración de luminiscencia. Si la disolución no puede ser luminiscente, esta verificación se puede llevar a cabo usando el MBLC en modo reflexión. Se explicarán a continuación estos dos modos de funcionamiento del microscopio.  
35

40 Las propiedades de emisión de la tintura orgánica dependen, en general, del disolvente en el que se disuelven. La disolución de Rodamina 6G y agua se caracteriza por un espectro de emisión ligeramente asimétrico centrado alrededor de los 550 nm, con una cola pequeña en el lado de las mayores longitudes de onda. Cuando el agua se evapora, el espectro de emisión cambia, la posición del pico se desplaza hacia los 570 nm y la asimetría llega a ser más pronunciada hacia las mayores longitudes de onda. Este desplazamiento hacia el rojo de la emisión proporciona un mecanismo valioso para controlar la evolución en el tiempo, y por tanto la evaporación, de los defectos introducidos intencionadamente.  
45

La Figura 2 muestra el funcionamiento del microscopio MBLC 16 en la configuración de reflexión. 18a denota un rayo impactando en una pantalla deflectora de separación o divisor de haces 20. El rayo 18a que ha pasado a través del divisor de haces 20 alcanza el microscopio 16; la luz 22 reflejada por el cristal fotónico situado por debajo del microscopio, que impacta en el divisor de haces 20, se desvía hacia un detector que no se muestra en la figura.  
50

La Figura 3, por otra parte, ilustra el funcionamiento del microscopio MBLC 16 en la configuración de luminiscencia. 18a denota el rayo incidente que, pasando en primer lugar a través de un espejo dicróico 24 y a continuación por el microscopio 16, alcanza el cristal fotónico, excita la Rodamina 6G que produce una señal de fotoluminiscencia 26. Esta señal 26 se desvía mediante el espejo 24 y alcanza un filtro óptico de paso de banda 28 que permite que solo pasen a su través las longitudes de onda emitidas por la molécula fluorescente.  
55

La Figura 4 muestra algunas imágenes de una muestra tratada con este procedimiento. La imagen 4a muestra seis infiltraciones sucesivas llevadas a cabo en la región del poro individual, en la muestra con una mayor constante de red, que produce un defecto lineal bien definido. Se obtuvo la imagen con el microscopio en la configuración de luminiscencia, excitando a una longitud de onda de 488 nm y detectando la señal de fotoluminiscencia emitida por la Rodamina. El microscopio está provisto de un espejo dicróico centrado a 510 nm y un filtro de paso de banda que transmite dentro del intervalo de 520-560 nm de tal manera que tiene una buena superposición con la señal producida por la Rodamina.  
60  
65

4b denota a su vez la imagen obtenida con el microscopio en la configuración de reflexión. En este caso, se sustituye el espejo dicróico por un divisor de haces 50/50 normalizado y ha elimina el filtro de paso de banda.

5 Debido a que las muestras están constituidas por agujeros de aire organizados con simetría triangular, las regiones oscuras, que indican baja reflexividad, corresponden a los agujeros de aire, mientras que las regiones luminosas indican las zonas de silicio situadas entre los agujeros.

10 La imagen 4c muestra la misma parte de muestra que la imagen 4a obtenida, de nuevo en modo luminiscencia, 24 horas después de llevar a cabo el procedimiento de infiltración. Como se puede señalar fácilmente, no existen modificaciones significativas. Esto es una indicación de la estabilidad del procedimiento.

15 La Figura 4d muestra la misma parte de muestra que la imagen 4a, obtenida de nuevo en modo luminiscencia, en la que sin embargo, se sustituye el filtro de paso de banda por un filtro de paso de banda a 585 nm, que tiene una superposición mayor con la señal producida por la Rodamina. En este caso, como se puede observar, la fotoluminiscencia se emite solo procedente de tres poros. Si comparamos la Figura 4d con la Figura 4e, que tiene la misma imagen obtenida en modo reflexión, se puede establecer que la señal está localizada en el borde de los poros. A partir de esto, se puede concluir que, después de un día, la Rodamina en el interior de los poros está todavía en forma de disolución, mientras que cualquier gotícula de líquido accidentalmente depositada alrededor de los poros, sobre la superficie de la muestra, se ha evaporado. De hecho, los pequeños volúmenes de líquido se evaporan rápidamente si se encuentran en un espacio libre o sobre una superficie; viceversa, en el interior de los poros, las fuerzas capilares ralentizan enormemente esta evaporación.

25 Las Figuras 5a y 5b muestran las imágenes, en modo emisión y reflexión, respectivamente, de un poro infiltrado individualmente con un radio de 550 nm. Las gráficas 5c y 5d muestran los perfiles horizontal y vertical, respectivamente, tomados en el centro de las imágenes 5a y 5b. La perfecta superposición entre el máximo de las curvas de fotoluminiscencia y el mínimo de las curvas de reflexión confirma que la disolución está presente solo en el poro individual seleccionado.

30 Cuando se llevaron a cabo las pruebas de infiltración sobre los poros en las muestras con una constante de red más pequeña, es decir, de 1,5  $\mu\text{m}$ , no se señalaron diferencias significativas. Esto conduce a creer que este procedimiento se puede aplicar también a muestras con constantes de red de hasta 700 nm, correspondiendo este valor a cristales que tienen una banda fotónica prohibida en el intervalo de longitudes de onda para las comunicaciones, concretamente aproximadamente 1,5  $\mu\text{m}$ .

35 La Figura 6a muestra la variación periódica de la constante dieléctrica con la introducción de un defecto. Los poros se caracterizan por un radio de 0,45a en el que a es la constante de red del cristal fotónico; se indica el poro infiltrado con agua por 30 y se caracteriza por una constante dieléctrica de 1,77, mientras que el sustrato de silicio tiene una constante dieléctrica de 12.

40 La Figura 6b muestra la distribución espacial  $E^2$  del modo TE del campo eléctrico, introducido por el defecto, a una longitud de onda de  $0,47\omega a/2\mu\text{c}$ . La creación del defecto produce un estado localizado, como es evidente a partir de la localización marcada de la intensidad del campo eléctrico alrededor de la posición del poro infiltrado.

45 La Figura 7 muestra un ejemplo de un dispositivo óptico creado con este procedimiento. 34 denota una guía de ondas formada con la sucesiva microinfiltración de líquido, repitiendo un bloque básico de cuatro poros infiltrados organizados en una geometría predeterminada. Se obtuvo la imagen en la configuración de emisión.

50 La Figura 8 muestra el diagrama de bandas de la propagación de los modos TE de la estructura de la Figura 7. 36 denota la banda fotónica prohibida del cristal, que se extiende desde una longitud de onda de  $0,3\omega a/2\mu\text{c}$  a una longitud de onda de  $0,5\omega a/2\mu\text{c}$ , de una pequeña banda de modos guiados 38 comprendida dentro de este intervalo 36 en la que se inhibe la propagación de la luz.

55 La Figura 9a muestra la intensidad del campo eléctrico y la Figura 9b muestra el campo magnético asociados a uno de los modos TE introducido por la guía de ondas en la banda prohibida del cristal fotónico.

60 La Figura 10a muestra otro ejemplo de un dispositivo óptico creado con este procedimiento, en particular, una infiltración de una cavidad anular 40 de tal manera que el campo magnético (figura 10b), y la intensidad del campo eléctrico (figura 10c), asociados a uno de los modos TE introducidos por la guía de ondas en la banda prohibida del cristal fotónico, se localizan en la región del defecto introducido.

65 Por medio de una alternativa a los ejemplos que se muestran en las Figuras 7 a 10, con este procedimiento es posible obtener otros muchos componentes ópticos tales como, por ejemplo, microláseres, transistores, resonadores, filtros, conmutadores ópticos o LED que se pueden combinar para crear un circuito fotónico para la transmisión de señales ópticas.

Naturalmente, el principio de la invención sigue siendo el mismo, las realizaciones y detalles de la construcción se pueden variar ampliamente con respecto a las descritas anteriormente e ilustrarse meramente por medio de un ejemplo no limitante, sin apartarse por tanto del alcance de la protección de la invención según se define en las reivindicaciones adjuntas.

**REIVINDICACIONES**

1. Procedimiento para la creación de un dispositivo fotónico regrabable que comprende las etapas de:
- 5 - proporcionar un cristal fotónico (2) que tiene una pluralidad de cavidades (6);  
- inyectar selectivamente en las cavidades predeterminadas una microcantidad de un líquido (12) de tal manera que permita la introducción de estados permitidos dentro de la banda fotónica prohibida del cristal (2) o la modificación de los estados prohibidos;  
10 caracterizándose el procedimiento porque dicha inyección se lleva a cabo usando un sistema de micropipetas (14) y medios para desplazar las micropipetas (14) sobre la superficie del cristal fotónico.
2. Procedimiento de acuerdo con la Reivindicación 1, en el que el líquido (12) contiene una sustancia trazadora capaz de emitir, si se excita adecuadamente, una radiación en el visible con el fin de permitir la fácil localización de dicho líquido (12) en el interior de las cavidades (6).
- 15 3. Procedimiento de acuerdo con la Reivindicación 1 o 2, en el que el líquido (12) es un disolvente, la tensión de vapor del mismo es tal que la inyección de dicho líquido (12) en las cavidades (6) produce una modificación en el cristal fotónico permanente (2) durante un plazo de no menos de un día.
- 20 4. Procedimiento de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el líquido (12) se escoge entre agua, hidrocarburos, aceites, cristales líquidos, o suspensiones de micro o nanopartículas en un líquido.
- 25 5. Procedimiento de acuerdo con la Reivindicación 1, en el que el líquido (12) es capaz de endurecerse.
6. Procedimiento de acuerdo con la Reivindicación 5, en el que el líquido (12) se escoge entre líquidos resistentes o prepolímeros líquidos.
- 30 7. Procedimiento de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la inyección del líquido (12) se controla mediante un MBLC (16).

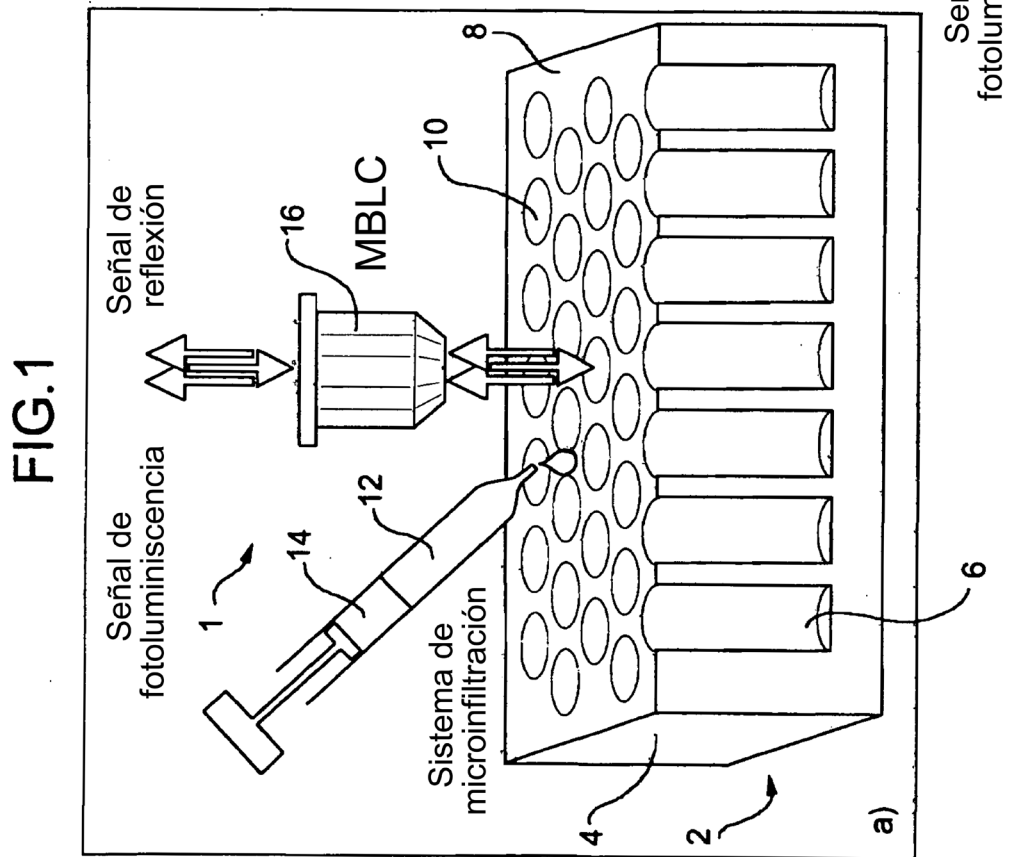
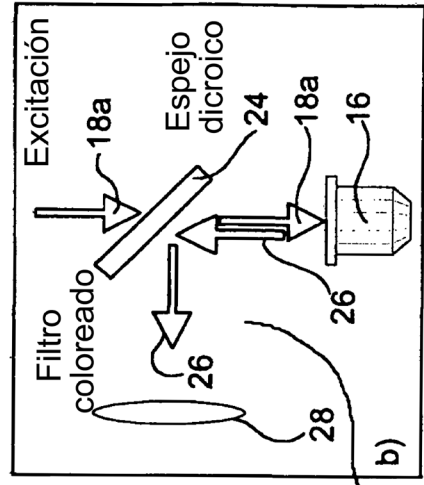
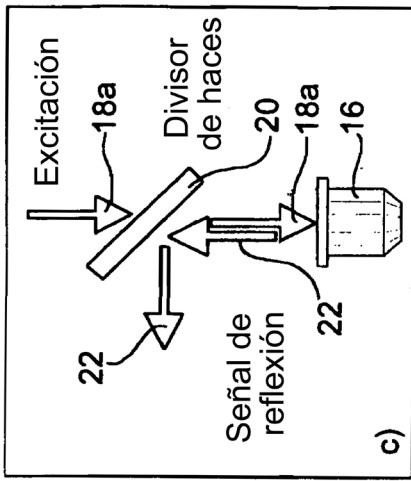




FIG.4

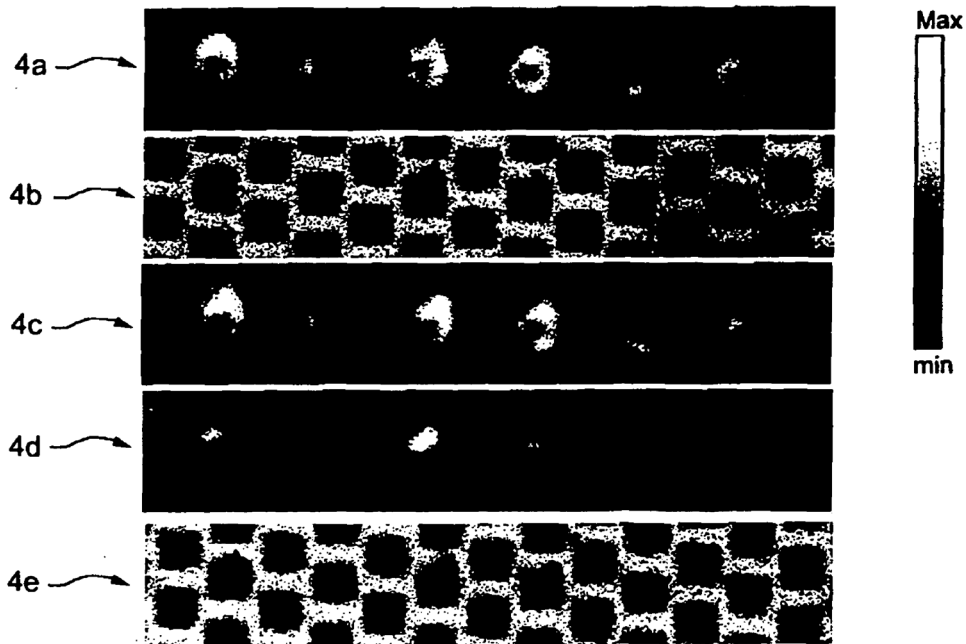


FIG.5

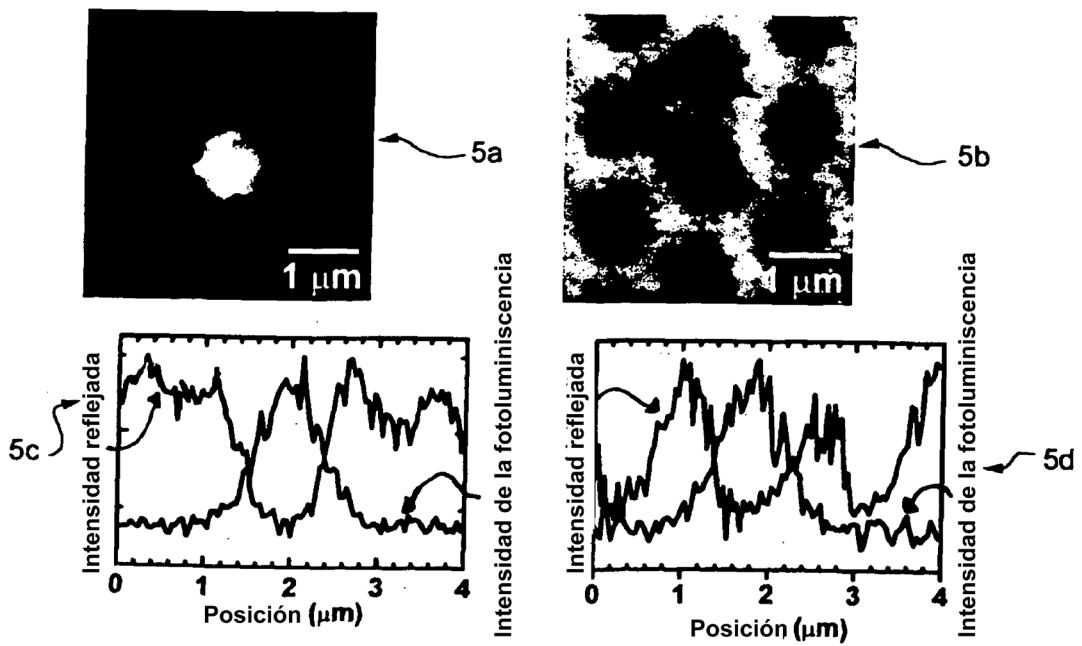


FIG.6

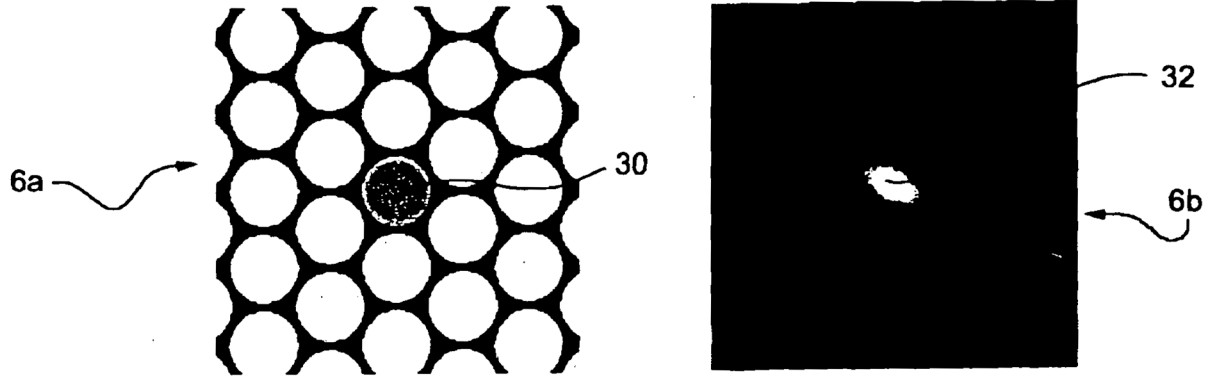


FIG.9

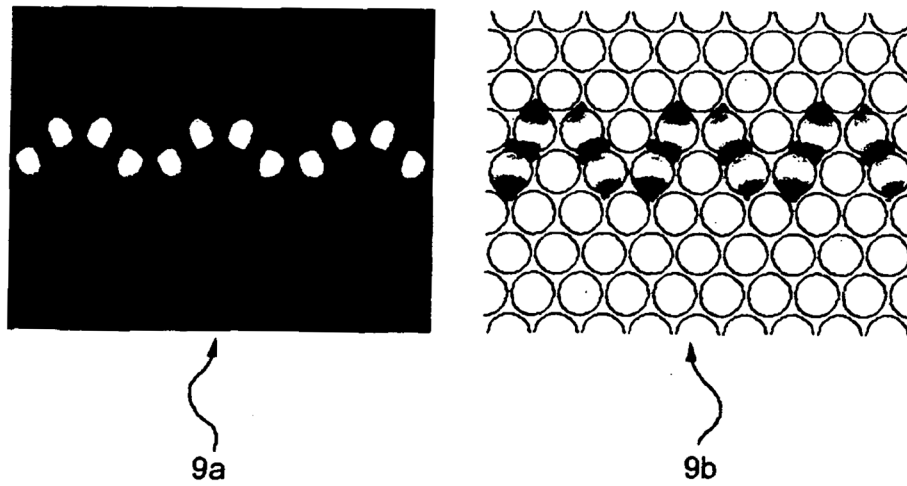


FIG.7

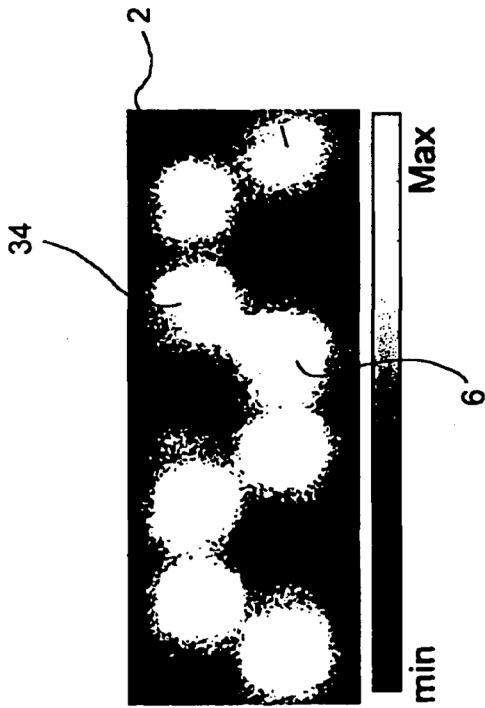


FIG.8

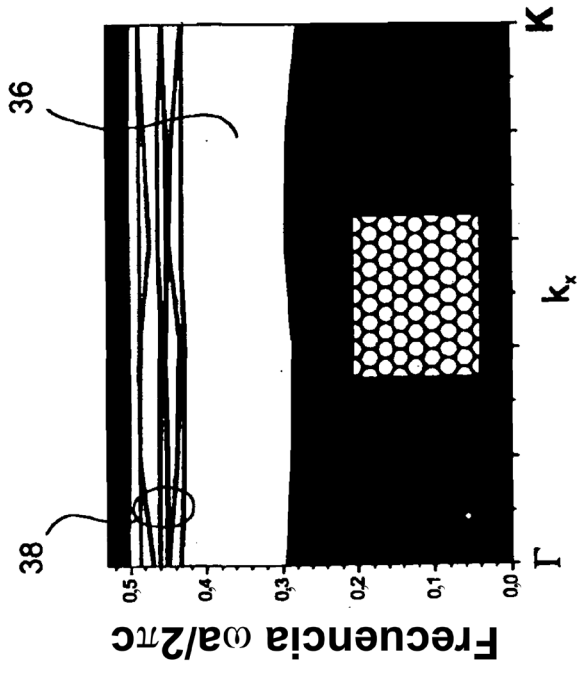


FIG.10

