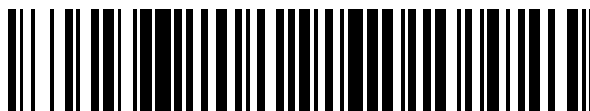


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 832 249**

51 Int. Cl.:

**G02F 1/01** (2006.01)

**G02F 1/19** (2009.01)

12

## TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **14.10.2016** **PCT/GB2016/053196**

87 Fecha y número de publicación internacional: **20.04.2017** **WO17064509**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.10.2016** **E 16784264 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **07.10.2020** **EP 3362849**

54 Título: **Dispositivo óptico**

30 Prioridad:

**16.10.2015 GB 201518371**

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

**09.06.2021**

73 Titular/es:

**OXFORD UNIVERSITY INNOVATION LIMITED  
(100.0%)  
Buxton Court, 3 West Way  
Oxford, Oxfordshire OX2 0JB, GB**

72 Inventor/es:

**HOSSEINI, PEIMAN;  
BHASKARAN, HARISH y  
BROUGHTON, BEN**

74 Agente/Representante:

**PONS ARIÑO, Ángel**

ES 2 832 249 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

Dispositivo óptico

5 La presente invención se refiere a un dispositivo óptico.

Existe el deseo de dispositivos ópticos mejorados cuyas características espectrales se puedan personalizar, por ejemplo, para filtros de color de espectrometría, o para visualizaciones en color si el dispositivo es conmutable.

10 Una propuesta anterior para un dispositivo funciona sobre el principio de interferencia utilizando la reflexión en superficies opuestas de una capa ópticamente transmisora (es decir, como un etalón); esto proporciona una respuesta espectral (es decir, color) en reflexión o transmisión. El espectro (color) se puede establecer incorporando una capa de material de absorción de luz. Si el material de absorción de luz es un material de cambio de fase (PCM), entonces las propiedades ópticas del dispositivo se pueden variar cambiando la fase del PCM.

15 Sin embargo, solo se puede crear un contraste de color observable si se usan capas de PCM ultrafinas, tal como de 7 nm. Esto es problemático si los dispositivos están fabricados sobre sustratos rugosos, como polímeros flexibles.

20 En el artículo "An optoelectronic framework enabled by low-dimensional phase-change films", NATURE, vol. 511, n.º 7508, del 9 de julio de 2014 (2014-07-09), páginas 206-211, Peiman Hosseini, C. David Wright y Harish Bhaskaran describen una pila de capas que comprende una capa de material de cambio de fase (PCM) que tiene como objetivo proporcionar efectos visuales conmutables.

25 Otra idea es usar un material de cristal líquido como elemento conmutable de una visualización. Sin embargo, los dispositivos convencionales necesitan un grosor mínimo de 1-2 micrones de cristal líquido (dependiendo de la birrefringencia del cristal líquido utilizado). Este grosor limita la velocidad máxima de conmutación, además de usar más material y hacer que el dispositivo sea más grueso. Otros conceptos emplean materiales electro-ópticamente activos, pero estos generalmente requieren tensiones muy altas, tal como de 10 kV, que son problemáticas de generar.

30 La presente invención se ha concebido en vista de los problemas anteriores. Por consiguiente, la presente invención proporciona un dispositivo óptico como el que se define en la reivindicación independiente 1.

Otros aspectos opcionales se definen en las reivindicaciones dependientes.

35 A lo largo de esta memoria descriptiva, se usan los términos "óptico" y "luz" porque son los términos habituales en la técnica relacionada con la radiación electromagnética, pero se debe entender que en el contexto de la presente memoria descriptiva no se limitan a la luz visible. Se prevé que la invención también se pueda usar con longitudes de onda fuera del espectro visible, tales como la luz infrarroja y ultravioleta.

40 A continuación, se describen realizaciones de la invención, únicamente a modo de ejemplo y con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

la figura 1 es una sección transversal esquemática de una parte de un dispositivo óptico según un ejemplo útil para entender la invención;

45 la figura 2 muestra unos gráficos de reflectividad con respecto a la longitud de onda para dispositivos según unos ejemplos útiles para entender la invención;

las figuras 3(a) y 3(b) son diagramas de cromaticidad que muestran la gama de colores que se puede obtener con (a) dispositivos convencionales, y (b) dispositivos según unos ejemplos útiles para entender la invención;

50 la figura 4 es una ilustración esquemática en sección transversal de otro ejemplo útil para entender la invención que comprende una capa de cristal líquido;

la figura 5 es una ilustración esquemática en sección transversal de otra realización de la invención que comprende una capa de cristal líquido;

la figura 6 muestra unos gráficos de reflectividad con respecto a la longitud de onda para dispositivos según un ejemplo útil para entender la invención que se basa en la estructura de la figura 4;

55 la figura 7 es una ilustración esquemática en sección transversal de un ejemplo útil para entender la invención que comprende una capa de material electro-ópticamente activo;

la figura 8 es una ilustración esquemática en sección transversal de otro ejemplo útil para entender la invención que comprende una capa de material electro-ópticamente activo;

la figura 9 muestra unos gráficos de reflectividad con respecto a la longitud de onda para un dispositivo con diferentes tensiones aplicadas según la estructura de la figura 7;

60 la figura 10 muestra unos gráficos de reflectividad con respecto a la longitud de onda para dispositivos según la estructura de la figura 7, con diferentes tensiones aplicadas y diferentes grosores de una capa de material electro-ópticamente activo; y

65 la figura 11 muestra un ejemplo de pila que comprende una capa de cobertura formada a partir de una pluralidad de subcapas de capa de cobertura y una capa espaciadora formada a partir de una pluralidad de subcapas de capa espaciadora incluidas en un dispositivo según una realización de la presente invención;

la figura 12 muestra un ejemplo de pila que comprende una capa de material de absorción de luz pasiva que se proporciona dentro de una capa de cobertura incluida en un dispositivo según una realización de la presente invención;

la figura 13 muestra un ejemplo de pila que comprende una capa de material de absorción de luz pasiva que se proporciona dentro de una capa espaciadora incluida en un dispositivo según una realización de la presente invención;

la figura 14 muestra un ejemplo de pila que comprende una capa de material de absorción de luz pasiva que se proporciona dentro de una capa de cobertura y una capa de material de absorción de luz pasiva que se proporciona dentro de una capa espaciadora incluida en un dispositivo según una realización de la presente invención;

la figura 15 muestra un ejemplo de pila formada sobre una hoja de cobertura ópticamente gruesa; y la figura 16 muestra un dispositivo que tiene una pluralidad de regiones que proporcionan diferentes respuestas espectrales.

A continuación, se describe un primer ejemplo de un dispositivo óptico útil para entender la presente invención con referencia a la figura 1, que muestra esquemáticamente en sección transversal una estructura en capas. Se proporciona una capa sólida de material de absorción de luz 10. Esta capa también se conoce como absorbente de película fina y el material normalmente tiene un componente imaginario de índice de refracción ( $k$ ) que es distinto de cero en una amplia gama de longitudes de onda. Se pueden usar muchos materiales adecuados y más adelante se aportan algunos ejemplos específicos. La capa 10 tiene generalmente más de 10 nanómetros de grosor. En este ejemplo específico, el material absorbente es  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (GST). La capa de material absorbente 10 se proporciona sobre una capa reflectante 12 (parcial o totalmente reflectante, dependiendo de si el dispositivo se está utilizando en un modo transmisivo o no).

En una propuesta anterior, se intercalaría una capa espaciadora entre la capa absorbente 10 y la capa reflectante 12, y se proporcionaría una capa de cobertura de silíce o ITO (óxido de indio y estaño) en el lado frontal (superior) del dispositivo. Convencionalmente, la capa de cobertura no contribuía al rendimiento del color y la capa absorbente tenía que ser ultrafina.

Por el contrario, en este ejemplo específico, un material con un alto índice de refracción (en este caso, el componente real del índice de refracción; el componente imaginario del índice de refracción debe ser lo más pequeño posible para que el material sea tan transparente como sea posible) se usa como capa de cobertura 16. El índice de refracción es mayor que 1,6, tal como 1,8 o más, y puede ser mayor que 2,0 o incluso 2,2. Entre los ejemplos de materiales para la capa de cobertura 16 se incluyen  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{AgO}$ , diamante,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiN}$  y  $\text{TaO}$ . La luz que entra en la capa de cobertura 16 de alto índice de refracción tiende a permanecer en la capa más que en un dispositivo convencional (de la misma manera que la luz puede confinarse en una guía de ondas, tal como una fibra óptica). El color se genera a través de la interferencia con la capa absorbente "con fugas" y la interfaz inferior. Se elimina el requisito de una capa absorbente ultrafina. En el caso de un PCM de GST que comprende la capa absorbente 10, cuando el GST está en la fase amorfa es menos absorbente y la luz en la capa de cobertura 16 se ve menos afectada; cuando el GST está en fase cristalina es más absorbente (más metálico), por lo que la luz se filtra en longitudes de onda específicas generando color y modulación del color por interferencia.

Opcionalmente, todavía se puede proporcionar una capa espaciadora (no mostrada) entre las capas 10 y 12. Si la capa absorbente 10 es un PCM, entonces se pueden proporcionar electrodos, si fuera necesario, para cambiar la fase de la capa (eléctrica o térmicamente), es decir, aplicando un pulso de tensión adecuada desde una fuente de tensión, el PCM puede experimentar un cambio de fase reversible inducido. La capa reflectante 12 puede actuar como un electrodo inferior (o también podría hacerlo una capa espaciadora opcional, si es conductora, como el ITO); y se puede proporcionar un segundo electrodo (no mostrado) en contacto con el PCM en un lado o en la parte superior (entre las capas 10 y 16). Como alternativa, tal y como se describe en los documentos WO 2015/097468 A1 o EP16000280.4, por ejemplo, la capa de PCM puede activarse mediante pulsos de calor suministrados por un elemento de calentamiento adyacente al PCM o en un lado opuesto de la capa especular al PCM. En este caso, la capa espaciadora puede ser no conductora y seleccionarse únicamente por sus propiedades ópticas y térmicas.

La figura 2 muestra ejemplos de respuestas espectrales para dispositivos en los que la capa de cobertura 16 de  $\text{TiO}_2$  tiene un grosor de 10, 50 y 100 nanómetros; siendo las líneas discontinuas cuando el GST está en fase amorfa y siendo las líneas continuas cuando el GST está en fase cristalina. Como se puede ver en estos ejemplos, el color puede cambiar de pálido a brillante durante la conmutación. Usando esta estructura se pueden crear píxeles de tipo RVA (rojo-verde-azul) en los que un estado es pálido (casi blanco) y el otro estado es un color primario brillante (tal como azul, rojo o verde brillante). Usando una capa de cobertura 16 más fina, el dispositivo puede tener un espectro bastante plano o simplemente ser utilizado para conmutar entre estados de píxeles brillantes y oscuros. En todos los ejemplos de la figura 2, la capa reflectante 12 es una capa de Ag de 100 nm de grosor.

El grosor de la capa absorbente 10 puede generar por sí mismo color de manera independiente.

La estructura de la figura 1 puede integrarse fácilmente con arquitecturas conocidas a partir de dispositivos de memoria PCM en la parte superior de los circuitos CMOS cambiando el electrodo superior a la capa de alto índice de refracción 16 en la parte superior de una capa fina de electrodo transparente (tal como ITO de 10 nm).

Usando dispositivos de acuerdo con las realizaciones del presente aspecto de la invención, la gama (intervalo de colores accesibles en el espacio de color) se puede mejorar dramáticamente. Los puntos trazados en el diagrama de cromaticidad de la figura 3(a) muestran la gama que era posible previamente usando una capa de cobertura ITO, mientras que la figura 3(b) muestra la gama mucho más grande que es posible con una capa de cobertura de alto índice de refracción 16, en este ejemplo, las capas de cobertura son de diamante (por ejemplo, diamante sintético cultivado por CVD).

En unas realizaciones de la invención, al menos la capa espaciadora comprende capas "compuestas", que comprenden múltiples capas de material que tienen diferentes índices de refracción. La capa de cobertura también puede tener tales capas "compuestas" de índices de refracción mutuamente diferentes. De esta manera, se generan más reflexiones internas parciales en las interfaces de estas capas múltiples, proporcionando la posibilidad de modos de interferencia más complejos que pueden permitir un mayor control de los espectros de reflexión de los estados disponibles. Esto puede incluir tanto la capacidad para generar espectros de reflexión con una alta reflectividad en un estrecho intervalo de longitudes de onda, produciendo colores más vívidos y, de ese modo, una gama de colores más grande, y la capacidad para sintonizar de manera más independiente los espectros de reflexión deseados en los múltiples estados del dispositivo. Los materiales que se pueden usar como subcapas dentro del espaciador compuesto o la capa de cobertura pueden incluir (pero sin limitarse a ello) ZnO, TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, TaO e ITO. En las figuras 11-15 se ilustran ejemplos de dispositivos con tal capa espaciadora o capa de cobertura compuesta.

La figura 11 muestra un ejemplo de pila en la que la capa de cobertura 16 comprende una pluralidad de subcapas de capa de cobertura 161-162. Al menos dos de las subcapas de capa de cobertura 161-162 tienen un índice de refracción diferente entre sí. Normalmente, al menos aquellas subcapas de capa de cobertura que son directamente adyacentes entre sí tendrán índices de refracción diferentes entre sí. En el ejemplo particular mostrado, la capa de cobertura 16 comprende dos subcapas de capa de cobertura 161 con un primer índice de refracción que intercalan una única subcapa de capa de cobertura 162 con un segundo índice de refracción, diferente del primer índice de refracción, pero otras configuraciones son posibles. En el ejemplo mostrado, se proporciona adicionalmente una capa espaciadora 40 entre la capa reflectante 12 y la capa de material de absorción de luz 10. En este ejemplo particular, la capa espaciadora 40 comprende una pluralidad de subcapas de capa espaciadora 401-402. Al menos dos de las subcapas de capa espaciadora 401-402 tienen un índice de refracción diferente entre sí. Normalmente, al menos aquellas subcapas de capa espaciadora que son directamente adyacentes entre sí tendrán índices de refracción diferentes entre sí. En el ejemplo particular de la figura 11, sólo se proporcionan dos subcapas de capa espaciadora, pero otras realizaciones pueden comprender más de dos subcapas de capa espaciadora. En esta realización, la pila se forma partiendo de un sustrato 50 debajo de la capa reflectante 12. Como se expone a continuación con referencia a la Figura 15, esto no es esencial. La pila también podría formarse en orden inverso partiendo de una capa de recubrimiento 70 ópticamente gruesa por encima de la capa de cobertura 16 (en cuyo caso un sustrato 50 debajo de la capa reflectante es opcional).

En otras realizaciones adicionales, de las cuales se muestran unos ejemplos en las figuras 12-14, el dispositivo además comprende una capa de material de absorción de luz pasiva 60. La capa de material de absorción de luz pasiva 60 puede comprender una capa fina, o película fina, de material de absorción de luz. La capa de material de absorción de luz pasiva 60 se puede proporcionar como parte de la capa de cobertura 16 (por ejemplo, intercalada entre dos subcapas de capa de cobertura), directamente adyacente a la capa de cobertura 16 (independientemente de que la capa de cobertura comprenda o no una pluralidad de subcapas de capa de cobertura), como parte de la capa espaciadora 40 (por ejemplo, intercalada entre dos subcapas de capa espaciadora), y/o directamente adyacente a la capa espaciadora 40 (independientemente de que la capa espaciadora comprenda o no una pluralidad de subcapas de capa espaciadora).

Sin desear quedar vinculados a teoría alguna, los inventores creen actualmente que la adición de tal capa de material de absorción de luz pasiva contribuye tanto a aumentar los reflejos internos en las interfaces de esta capa como a absorber preferentemente la luz de longitudes de onda que tienen antinodos de onda estacionaria en la cavidad o en múltiples cavidades proporcionadas por las otras capas en el dispositivo en la ubicación de la capa de material de absorción de luz pasiva. Esto puede aumentar nuevamente la selectividad de color de los espectros de reflexión de los múltiples estados del dispositivo, expandiendo el intervalo de colores reflejados obtenibles y/o la independencia de los colores reflejados en cada uno de los estados. En una realización, la capa de material de absorción de luz pasiva 60 es pasiva en el sentido de que no puede conmutar entre diferentes estados, por ejemplo, de la misma manera que una capa de PCM. La capa de material de absorción de luz pasiva 60 no contiene ningún material de cambio de fase. En una realización, la capa de material de absorción de luz pasiva 60 es metálica, por ejemplo, formada a partir de un material metálico como Ag, Au, Al o Pt. La capa de material absorbente pasiva 60 habitualmente está diseñada para que sea lo suficientemente gruesa como para provocar el efecto óptico deseado sin ser tan gruesa como para absorber o reflejar grandes proporciones de la luz incidente. Se ha identificado un intervalo de 3 nm-30 nm como uno óptimo. Para evitar la oxidación de la capa de material de absorción de luz pasiva 60 (por ejemplo, en caso de que la capa se forme a partir de un material metálico propenso a la oxidación), se puede depositar una capa de un material estable en uno o a ambos lados de la capa metálica. Esta capa puede ser lo suficientemente gruesa (habitualmente menos de 10 nm) como para no afectar a los espectros de reflexión producidos por el dispositivo o puede ser una capa más gruesa que contribuya por sí misma a los espectros de reflexión previstos. Como alternativa, la capa de material absorbente pasiva 60 comprende un absorbente no metálico.

La figura 12 muestra un ejemplo de pila que tiene una capa de material absorbente de luz pasiva 60. En esta realización particular, la pila comprende una pluralidad de subcapas de capa de cobertura 161-162. La capa de material de absorción de luz pasiva 60 se proporciona dentro de la capa de cobertura, intercalada entre dos de las subcapas de

La figura 13 muestra un ejemplo adicional de una pila que tiene una capa de material absorbente de luz pasiva 60. En esta realización particular, la pila comprende una pluralidad de subcapas de capa espaciadora 401-402. La capa de material de absorción de luz pasiva 60 se proporciona dentro de la capa espaciadora, intercalada entre dos de las subcapas de capa espaciadora 401-402.

La figura 14 muestra un ejemplo de una pila que tiene dos capas de material absorbente de luz pasiva 60. Una primera de las capas de material de absorción de luz pasiva 60 se proporciona dentro de la capa de cobertura, intercalada entre dos subcapas de capa de cobertura 161-162. Una segunda de las capas de material de absorción de luz pasiva 60 se proporciona dentro de una capa espaciadora, intercalada entre dos subcapas de capa espaciadora 401-402.

En la figura 4 se ilustra otro ejemplo útil para entender la invención. En este ejemplo, se proporciona una capa de material de cristal líquido entre la capa absorbente de luz 10 y la capa reflectante 12. Se proporciona un electrodo transparente 21, 22 (hecho, por ejemplo, de ITO, de 10 nm de grosor) a cada lado de la cavidad de cristal líquido, como se conoce en la técnica de las pantallas LCD (pantallas de cristal líquido). El dispositivo tiene una capa superior transparente 24, por ejemplo, hecha de ITO, sílice, alúmina, sulfuro de zinc o material polimérico y un polarizador 26. La aplicación de una tensión apropiada en los electrodos 21, 22 cambiará la orientación de las moléculas de cristal líquido para variar el índice de refracción de la cavidad y, por lo tanto, modulará el color del dispositivo (que puede tener forma de una película fina y puede pixelarse).

Los dispositivos de cristal líquido convencionales requieren un cierto grosor mínimo de 1 a 2 micrones para funcionar. Este grosor está dictado por la ecuación:

$$d = \lambda / (4\Delta n)$$

dónde  $d$  es el grosor mínimo,  $\lambda$  la longitud de onda y  $\Delta n$  la birrefringencia del cristal líquido específico utilizado en el dispositivo.

Sin embargo, para el presente ejemplo útil para entender la invención, esta ecuación no es aplicable porque la luz se modula variando el índice de refracción de la nanocavidad (capa 20), y no trabajando en la fase de la luz como en los dispositivos LCD tradicionales. El resultado es que la capa de cristal líquido 20 puede ser aproximadamente unas diez veces más fina de lo convencional, tal como del orden de 200 nm. Esto significa que el dispositivo se puede hacer ultrafino y puede conmutar a velocidades mucho más altas que los dispositivos convencionales. En consecuencia, el dispositivo es ventajoso para aplicaciones de telecomunicaciones. Sin embargo, también se puede usar para aplicaciones decorativas que emplean modulación de color con un bajo consumo energético o para pantallas pasivas de tipo reflectante. La reducción del grosor de la capa reflectante 12 permitirá una modulación del color en modo transmisivo y podría usarse como filtro de color o absorbedor de banda ancha sintonizable para un espectrómetro.

La figura 5 ilustra una variante de este ejemplo útil para entender la invención en la que la capa absorbente 10 es adyacente a la capa reflectante 12 para proporcionar un dispositivo de "tipo fuga" similar al de la figura 1. La capa superior 24 no es necesaria.

En los dispositivos según las realizaciones de las figuras 4 y 5, no se requiere que la capa absorbente 10, tal como una de GST, sea conmutable ni que muestre un cambio de fase, por lo que no es necesario que esté provista de sus propios electrodos. Sin embargo, se puede preestablecer en una fase deseada.

La figura 6 muestra la respuesta espectral (en reflexión) para una gama de dispositivos según la figura 4 que comprenden, en orden, una capa superior 24 de ITO, una capa absorbente 10 de GST, un electrodo 21 de ITO, una capa de cristal líquido 20 de TL216, un electrodo 22 de ITO y una capa reflectante 12 de Ag. Los grosores del GST y el TL216 se indican en la leyenda de la figura 6. Para cada par de grosores, se muestran gráficos para el cristal líquido TL216 bien con el índice de refracción ordinario ( $n_o$ ) o extraordinario ( $n_e$ ), obtenible conmutando el cristal líquido en un campo eléctrico aplicado por los electrodos 21, 22. Como se puede ver, resultan evidentes unos cambios espectrales significativos y, por tanto, cambios de color.

En las figuras 7 y 8 se ilustran ejemplos adicionales útiles para entender la invención. Estas estructuras son análogas a los dispositivos de las figuras 4 y 5 salvo que la capa de cristal líquido se sustituye por una capa de material electro-ópticamente activo 30, denominada capa EO 30. Se proporciona un electrodo transparente 31, 32 (hecho, por ejemplo, de ITO, de 10 nm de grosor) a cada lado de la capa EO. El dispositivo de la figura 7 tiene una capa superior 34 transparente, por ejemplo, hecha de ITO, sílice, alúmina, sulfuro de zinc o material polimérico.

Los materiales electro-ópticamente activos cambian su índice de refracción en función de la fuerza de un campo eléctrico aplicado. Entre los ejemplos de materiales EO se incluyen: dihidrogenofosfato de amonio (ADP), dihidrogenofosfato de potasio (KDP), niobato de litio, tantalita de litio, telururo de cadmio y varios cromóforos poliméricos tales como DANS, DR, FTC, CLD1, AJL8. La aplicación de una tensión apropiada a los electrodos 31, 32 conmutará el índice de refracción de la capa EO 30 y, por lo tanto, modulará el color del dispositivo (que puede tener la forma de una película fina y puede pixelarse).

Los dispositivos pueden emplear capas EO muy finas, tal como en un intervalo de 10 a 200 nm. Esto significa que se puede generar un campo eléctrico alto que provoque una conmutación visible incluso con una tensión relativamente baja, tal como de 100 V o menos. Los dispositivos convertidores CC-CC de montaje en superficie que operan hasta 100 V son fáciles de obtener. Los materiales EO son todos altamente aislantes, por lo que prácticamente no circula ninguna corriente, incluso cuando hay una alta tensión. Por lo tanto, el consumo de energía es muy bajo, incluso funcionando a alta tensión, por lo que es posible el funcionamiento con batería.

Las velocidades de conmutación también pueden ser increíblemente altas, tal como de 120 GHz y se pueden lograr tiempos de vida de un gran número de ciclos de conmutación. En consecuencia, el dispositivo es ventajoso para aplicaciones de telecomunicaciones. Sin embargo, también se puede usar para aplicaciones decorativas que emplean una modulación de color con un bajo consumo energético o para pantallas. La reducción del grosor de la capa reflectante 12 permitirá una modulación del color en modo transmisivo y podría usarse como filtro de color o absorbedor de banda ancha sintonizable para un espectrómetro.

En los dispositivos de las figuras 7 y 8, no se requiere que la capa absorbente 10, tal como de GST, sea conmutable ni que muestre un cambio de fase, por lo que no es necesario que esté provista de sus propios electrodos.

La figura 9 muestra la respuesta espectral (en reflexión) para un dispositivo según la figura 7 que comprende, en orden, una capa superior 34 de SiO<sub>2</sub> de 40 nm de grosor, una capa absorbente 10 de GST (amorfo) de 5 nm de grosor, un electrodo 31 de ITO de 10 nm de grosor, una capa EO 30 de LiNbO<sub>3</sub> de 20 nm, un electrodo 32 de ITO de 10 nm y una capa reflectante 12 de Ag de 100 nm de grosor. Los espectros relativamente planos muestran una transición de negro a brillante a medida que la tensión disminuye de +100 V a -100 V. La figura 10 muestra la respuesta espectral para un ejemplo con la misma estructura que la de la figura 9, salvo que la GST tiene un grosor de 6 nm y la capa EO 30 es un polímero CLD1 en dos ejemplos con grosores unos respectivos de 20 nm y 120 nm. Como se puede ver, los cambios espectrales significativos y, por lo tanto, los cambios de color son evidentes con la conmutación de +100 V a -100 V.

En la descripción anterior, el material de cristal líquido y el material EO están ambos incluidos en el término genérico de "material ópticamente activo".

## MATERIALES

En muchas aplicaciones, la capa de material de absorción de luz 10 no tiene que ser específicamente un material de cambio de fase, aunque de acuerdo con la presente invención lo es. Entre los ejemplos de materiales adecuados para la capa absorbente 10 se incluyen: cualquiera de los materiales de cambio de fase mencionados más adelante; más silicio amorfo, carbono amorfo, Ge, GaAs, InAs, InP, CdTe, Ag<sub>2</sub>S, semiconductores orgánicos; cualquier material adecuado que absorba la luz y pueda depositarse en películas con un grosor de unos pocos nm (los materiales semiconductores suelen ser ideales para esto). La estequiometría puede variarse y el dopaje se puede usar para crear las propiedades absorbentes deseadas. De hecho, no es necesario usar materiales que absorban la luz en un estado a granel; tales materiales pueden diseñarse por ingeniería para crear metamateriales que tengan las propiedades deseadas en términos de absorción.

Hay disponibles muchos materiales de cambio de fase adecuados, ya sea por separado o en combinación, incluyendo los compuestos o aleaciones de las combinaciones de elementos seleccionados de la siguiente lista: GeSbTe, GeTe, GeSb, GaSb, AgInSbTe, InSb, InSbTe, InSe, SbTe, TeGeSbS, AgSbSe, SbSe, GeSbMnSn, AgSbTe, AuSbTe y AlSb. También se entiende que son posibles diversas formas estequiométricas de estos materiales; por ejemplo, Ge<sub>x</sub>Sb<sub>y</sub>Te<sub>z</sub>; y otro material adecuado es la aleación Ag<sub>3</sub>In<sub>4</sub>Sb<sub>76</sub>Te<sub>17</sub> (también conocida como AlST). Otros materiales adecuados incluyen cualquiera de los denominados "memristores Mott" (materiales que experimentan una transición de metal a aislante, MIT, a una temperatura específica), por ejemplo, VO<sub>x</sub> o NbO<sub>x</sub>. Además, el material puede comprender uno o más dopantes, como C o N.

El llamado material de cambio de fase (PCM) sufre un cambio drástico del índice de refracción tanto real como imaginario cuando conmuta entre las fases amorfa y cristalina. La conmutación se puede obtener, por ejemplo, mediante un calentamiento inducido por pulsos eléctricos adecuados o mediante un pulso de luz de una fuente de luz láser, o puede ser un calentamiento térmico, por ejemplo, usando un calentamiento resistivo eléctrico de una capa adyacente que está en contacto térmico con el material de cambio de fase. Hay un cambio sustancial en el índice de refracción cuando el material conmuta entre las fases amorfa y cristalina. El material es estable en cualquier estado. La conmutación se puede realizar un número ilimitado de veces de manera efectiva. Sin embargo, no es esencial que

la conmutación sea reversible.

Una mejora adicional aplicable a todas las realizaciones es que el material de la capa 10 no tiene que conmutar simplemente entre un estado completamente cristalino y uno completamente amorfo. Se puede lograr una mezcla de fases, tal como un 20 % cristalino, un 40 % cristalino, etc. El índice de refracción efectivo resultante del material está en algún punto entre los dos extremos de entre completamente cristalino y completamente amorfo dependiendo del grado de cristalización parcial. Se pueden lograr fácilmente entre 4 y 8 fases mixtas distintas, que tengan el número correspondiente de diferentes reflectividades detectables, pero con el control apropiado, el número puede ser mucho mayor, como 128.

Aunque algunas realizaciones descritas en el presente documento mencionan que la capa de material es conmutable entre dos estados, tal como las fases cristalina y amorfa, la transformación podría ser entre dos fases sólidas cualesquiera, incluyendo, pero sin limitación: de una fase cristalina a otra fase cristalina o cuasicristalina o viceversa; de amorfa a cristalina o cuasicristalina/semiordenada o viceversa, y todas las formas intermedias. Las realizaciones tampoco están limitadas a solo dos estados.

En la realización preferida, la capa de material absorbente 10 está compuesta de  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (GST) de menos de 200 nm de grosor.

La capa reflectante 12 es típicamente una fina película metálica, compuesta, por ejemplo, de Au, Ag, Al o Pt. Si esta capa va a ser parcialmente reflectante, entonces podría seleccionarse un grosor en el intervalo de 5 a 15 nm, de lo contrario, la capa se hace más gruesa, tal como de 100 nm, para que sea sustancialmente totalmente reflectante.

Toda la estructura mostrada en las figuras 1, 4, 5, 7, 8, 11, 12, 13, 14 se puede proporcionar sobre un sustrato 50 (mostrado, por ejemplo, en las figuras 11-14) tal como vidrio, cuarzo o material plástico, policarbonato, PET, etc., para facilitar la fabricación o robustez estructural. El sustrato 50 puede o bien ser ópticamente grueso, para no afectar a los espectros de reflexión o bien estar dispuesto detrás de una capa 12 de reflexión totalmente opaca. Las capas se depositan por pulverización catódica en el caso de las capas de material inorgánico, tal como el material absorbente 10, de ITO,  $\text{SiO}_2$ , y así sucesivamente, que se puede realizar a una temperatura relativamente baja de 100 °C o incluso 70 °C o menos. Las capas poliméricas se pueden formar mediante un recubrimiento por rotación y curado. También se pueden proporcionar capas adicionales según sea necesario. El proceso de baja temperatura significa que el dispositivo óptico no tiene que fabricarse al mismo tiempo que el artículo que comprende el sustrato (el artículo podría ser, por ejemplo, un acristalamiento de ventanas); el dispositivo óptico puede instalarse posteriormente en forma de revestimiento superficial aplicado posteriormente, por ejemplo, en ventanas o paneles existentes. Como alternativa, las capas ópticamente importantes pueden depositarse en orden inverso sobre un sustrato transparente, ópticamente grueso (también denominado capa de cobertura ópticamente gruesa 70), luego, opcionalmente puede laminarse o unirse de otro modo a un sustrato opcional 50 para una mayor robustez o encapsulación. En la figura 15 se muestra un ejemplo de dicha configuración. En este ejemplo particular, la pila comprende una capa de cobertura 16, una capa de material de absorción de luz 10, una capa espaciadora 40 y una capa reflectante 12, pero se entenderá que se puede formar cualquiera de las configuraciones de la pila divulgadas en este documento (incluidas las pilas que tienen múltiples subcapas de capa de cobertura y/o múltiples subcapas de capa espaciadora y/o una o más capas de material de absorción de luz pasiva) sobre una capa de cobertura 70 ópticamente gruesa (con o sin el sustrato adicional 50) de una manera correspondiente. El sustrato 50 y/o el sustrato 70 pueden ser rígidos, como el vidrio o silicio, o pueden ser flexibles, como una hoja de polímero o un vidrio flexible y grueso. Opcionalmente, el sustrato se puede recubrir con una película antirreflejos en la superficie superior (del lado del espectador) para mejorar la visibilidad del reflejo coloreado generado por el dispositivo.

## APLICACIONES

Los dispositivos ópticos de acuerdo con cualquiera de las realizaciones del presente documento se pueden usar como filtros de color transmisivos (espectrales) (ya sea conmutables o fijos), tales como unos filtros de color ultrafinos para proyectores y pantallas LCD/OLED. También se pueden usar en pantallas transparentes, como las pantallas de visualización frontal (HUD).

Los dispositivos ópticos de acuerdo con cualquiera de las realizaciones del presente documento podrían usarse como marcas de seguridad transmisivas, aplicadas en artículos, embalajes, credenciales/pases de identificación, billetes de banco y así sucesivamente. Se puede almacenar un patrón en la capa de material de cambio de fase estableciendo el estado cristalográfico de diferentes regiones. El patrón podría ser simplemente una imagen reconocible o podría codificar información específica, tal como en forma de código de barras, código QR u otro código adecuado. Una de las ventajas del modulador óptico basado en PCM es la posibilidad de que se escriban patrones de muy alta resolución en el dispositivo (véase Nature 511, 206-211 (10 de julio de 2014)). Esto permite la posibilidad de usar patrones holográficos. Los patrones holográficos se pueden usar para difractar la luz incidente para formar, con o sin la ayuda de lentes adicionales u otros elementos ópticos, una imagen real, múltiples imágenes reales o una imagen volumétrica tridimensional, a cierta distancia o a una serie de distancias desde el dispositivo. También se pueden usar patrones holográficos con el dispositivo para impartir una orientación del haz, un enfoque, un multiplexado u otros efectos ópticos en el haz de entrada.

En realizaciones adicionales de la invención, como se ilustra esquemáticamente en la figura 16, la pila está configurada para proporcionar una pluralidad de respuestas espectrales diferentes a la luz incidente en una pluralidad correspondiente de regiones diferentes 80. En una realización, las diferentes respuestas espectrales se proporcionan al menos en parte configurando al menos un subconjunto de las regiones 80 para que tengan diferentes secuencias de capas (más o menos capas y/o una secuencia diferente de composiciones de capas y/o grosores) y/o diferentes grosores de una o más capas correspondientes (por ejemplo, la misma secuencia de composición de capas, pero una o más de las capas de la secuencia tienen diferentes grosores en diferentes regiones). Como alternativa o adicionalmente, las diferentes respuestas espectrales se proporcionan al menos en parte configurando al menos un subconjunto de las regiones 80 de manera que la capa de material de absorción de luz conmute a diferentes estados, por ejemplo, diferentes fases. Cada región puede comprender individualmente cualquiera de las pilas divulgadas en el presente documento. La pluralidad de regiones 80 puede formar un subconjunto de una pluralidad mayor de regiones (que también pueden denominarse píxeles). En una realización, el dispositivo está configurado para proporcionar un efecto holográfico, por ejemplo, un patrón holográfico como se describió anteriormente, usando la pluralidad de diferentes respuestas espectrales proporcionadas en las diferentes regiones.

Con el fin de optimizar el rendimiento del dispositivo para aplicaciones holográficas, la configuración del espaciador, el absorbente de película fina activa y pasiva y las capas de cobertura se pueden ajustar para proporcionar una modulación de alto contraste en las longitudes de onda de banda estrecha específicas destinadas a la iluminación del dispositivo para reproducir el efecto holográfico. Esta modulación de alto contraste puede basarse en la amplitud (es decir, un fuerte cambio en la reflectividad en las bandas de longitud de onda específicas) o puede ser un gran cambio (idealmente  $\pi$  o  $2\pi$  radianes) en la fase de luz en reflexión en los múltiples estados. Como alternativa, la configuración de las capas ópticas puede especificarse para dar suficiente modulación en un intervalo de longitudes de onda suficientemente amplio como para permitir efectos holográficos en un intervalo de longitudes de onda.

Un patrón no es esencial porque se podría simplemente confiar en el cambio de color predeterminado o la respuesta espectral intrínseca del dispositivo óptico que es difícil de replicar.

En una realización, la marca de seguridad está sobre un sustrato flexible, como una etiqueta inteligente o una película de identificación, que se puede doblar para revelar un cambio de color conocido o para revelar un patrón al personal de seguridad. El cambio de color y/o la revelación de un patrón se produce porque al doblar el dispositivo se modifica el grosor de las capas, en particular la capa espaciadora y así cambia la respuesta de transmisión espectral del dispositivo.

Una variante adicional es cuando la marca se define usando un patrón de memristor Mott, tal como de  $\text{VO}_x$  o  $\text{NbO}_x$ , como material de cambio de fase. Se produce un cambio en el contraste de color cuando la marca se calienta por encima de la temperatura de transición, por lo que la marca de seguridad se puede revelar calentando el dispositivo, y la marca desaparece cuando se enfría de nuevo.

Un lector de dispositivo que incorpora un espectrómetro simple podría evaluar la variación de color de la marca en diferentes ángulos (con o sin curvatura) y compararla con una respuesta previamente almacenada para validar la autenticidad de la marca con una confianza extremadamente alta.

Otro lector de dispositivos usa uno o más diodos láser de baja potencia para medir la transmisividad a una longitud de onda fija en función del ángulo y la compara con una respuesta conocida.

En el caso de un patrón escrito en la marca, un lector de dispositivos podría incluir una cámara para capturar una o más imágenes de la marca en longitudes de onda o ángulos de iluminación particulares, y podría emplear una comparación de contraste y/o reconocimiento de imágenes para verificar la marca.

Con cualquiera de las marcas de seguridad descritas anteriormente, la marca puede, por supuesto, borrarse y/o reescribirse usando unos medios de conmutación apropiados, como se describió anteriormente (tal como un láser, eléctrico o térmico). Esto permite jerarquías de seguridad versátiles, por ejemplo, cuando se verifica la tarjeta del usuario en un primer punto de control en el que el dispositivo de lectura también escribe una segunda información en la marca. Un segundo punto de control verifica luego que la segunda información esté presente y luego borra y/o escribe información adicional. De esta manera, los puntos de control solo se pueden pasar en secuencia; y eludir un punto de control hará que se deniegue el acceso a puntos de control posteriores. La capacidad de escribir y reescribir el patrón impuesto en el dispositivo también permite el uso del dispositivo como pantalla o modulador espacial de luz, ya sea para verse directamente o para formar una imagen a cierta distancia del propio dispositivo como parte de una proyección o sistema de proyección holográfica. Cuando se usa como elemento modulador de luz en un sistema de visualización, el dispositivo puede configurarse para modular un conjunto de diferentes bandas de longitud de onda con el fin de proporcionar capacidad a todo color. Esto se puede lograr ya sea proporcionando múltiples regiones en la pantalla con una configuración diferente del espaciador, absorbente de película fina activa y pasiva y capas de cobertura para la modulación de las diferentes bandas de longitud de onda (es decir, subpíxeles dentro de la pantalla de diferentes tipos), o se puede usar la capacidad de conmutación rápida (típicamente inferior a microsegundos) de los dispositivos basados en un material de cambio de fase para proporcionar la modulación de una secuencia de



colores de entrada en el tiempo secuencialmente.

Aunque los espectros de las figuras 2, 6, 9, 10 se refieren principalmente a la parte visible del espectro electromagnético, las películas de tipo transmisivo también se pueden usar para modular otras partes del espectro, como la luz infrarroja (IR). Por tanto, se pueden fabricar filtros de IR para la transmisión o reducción de bandas particulares. Si se usa una capa de material absorbente conmutable 10, entonces el dispositivo se puede aplicar como revestimiento superficial de acristalamientos de gestión térmica, por ejemplo, para edificios. Se puede lograr un gran cambio en la transmitancia en la parte infrarroja del espectro entre los estados amorfo y cristalino de la capa absorbente, de manera que el cambio en la energía infrarroja total transmitida a través del dispositivo se pueda variar en más del 25 %. Por lo tanto, la energía de la luz infrarroja solar se puede transmitir a través del acristalamiento para proporcionar un calentamiento al interior del edificio, o el dispositivo puede conmutar para reflejar más infrarrojos para reducir el calentamiento no deseado del interior del edificio.

Mediante la elección adecuada de los materiales y grosores de la capa, el dispositivo puede proporcionar un gran cambio en la parte infrarroja del espectro, mientras que solo afecta a la luz visible en un grado mucho menor. Por ejemplo, la energía total transmitida en las longitudes de onda visibles puede verse afectada en menos de un 20 %. De esta manera, se puede mantener el brillo de la luz visible que entra al edificio a través del acristalamiento, mientras se regula discretamente la energía térmica (infrarroja) transmitida. En otras palabras, la apariencia visible no cambia necesariamente ni aparece teñida incluso cuando se cambia la transmisión de infrarrojos.

#### Espectrómetro

Hay un tipo de espectrómetro conocido como espectrómetro de filtro de banda ancha. Se hace pasar la luz que representa el espectro a analizar a través de un filtro de banda ancha con características de transmisión conocida en función de la longitud de onda. Las diferentes bandas se atenúan en diferentes cantidades y la luz resultante llega a un único detector que proporciona un único valor de intensidad total resultante. Este proceso se repite con múltiples filtros de banda ancha, de los cuales, cada uno modifica el espectro de una forma diferente. A partir de los espectros de transmisión conocidos de todos los filtros de banda ancha y de las mediciones de intensidad, el espectro original se puede reconstruir computacionalmente.

El espectrómetro se puede hacer más eficiente midiendo el conjunto de intensidades simultáneamente. Una realización para hacer esto emplea un sustrato provisto de una matriz bidimensional de detectores, tales como dispositivos de carga acoplada (CCD). Enfrente de la matriz de detectores hay un conjunto de filtros espectrales, de los cuales, cada uno comprende un filtro transmisivo, como el descrito anteriormente, con una capa parcialmente reflectante. Ajustando la composición y/o los grosores de las capas, la transmisión espectral de cada filtro puede ser diferente.

No es necesario que haya un filtro por detector, sino que un filtro podría servir para múltiples elementos detectores. Además, los filtros no tienen que fabricarse independientemente.

Esta estructura y técnica hacen que el dispositivo sea fácil de fabricar de manera económica y rápida en una matriz CCD para proporcionar un espectrómetro en un chip. El dispositivo se puede usar como espectrómetro de infrarrojos y ultravioleta, así como de luz visible, y es estable a la exposición a una radiación electromagnética en todo el espectro. El número de filtros 34 y detectores 32 diferentes en la matriz puede ser del orden de unos pocos cientos o incluso muchos más y este número determinará la resolución espectral. Se puede obtener una resolución espectral de +/- 1 nm.

Una aplicación adicional de cualquiera de los dispositivos descritos anteriormente es como capa decorativa. Por ejemplo, se pueden proporcionar lentes de gafas de sol recubiertas con el dispositivo óptico. El color y el patrón pueden predeterminarse y/o pueden cambiarse posteriormente.

## REIVINDICACIONES

1. Un dispositivo óptico que comprende una pila de las siguientes capas:

- 5 una capa de cobertura (16);  
una capa de material de absorción de luz (10);  
una capa reflectante (12); y  
una capa espaciadora (40) entre la capa reflectante (12) y la capa de material de absorción de luz (10), en donde:

10 el índice de refracción de la capa de cobertura (16) es al menos 1,6;  
el material de absorción de luz (10) es un material de cambio de fase que tiene un índice de refracción complejo que se puede ajustar a al menos dos valores que confieren diferentes propiedades ópticas al dispositivo; y  
**caracterizado por que:**

15 la capa espaciadora (40) comprende una pluralidad de subcapas de capa espaciadora (401, 402), teniendo al menos dos de las subcapas de capa espaciadora (401, 402) unos índices de refracción diferentes entre sí.

2. Dispositivo según la reivindicación 1, en donde la capa de cobertura (16) comprende al menos uno de  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ , diamante,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  y  $\text{TaO}$ .

20 3. Dispositivo según la reivindicación 1 o 2, que además comprende una capa de material ópticamente activo (20, 30).

4. Dispositivo según la reivindicación 3, en donde se proporcionan unos electrodos (21, 22) para permitir que el índice de refracción del material ópticamente activo (20, 30) se altere aplicando una tensión.

25 5. Dispositivo según la reivindicación 3 o 4, en donde el material ópticamente activo (20) es un material de cristal líquido y la pila además comprende una capa de polarización (26), opcionalmente, en donde la capa de material de cristal líquido (20) tiene menos de 300 nm de grosor.

30 6. Dispositivo según la reivindicación 3 o 4, en donde el material ópticamente activo (30) es un material electro-ópticamente activo (30), en donde, opcionalmente, la capa de material electro-ópticamente activo (30) tiene menos de 100 nm de grosor.

35 7. Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la capa de cobertura comprende una pluralidad de subcapas de capa de cobertura, teniendo al menos dos de las subcapas de capa de cobertura índices de refracción diferentes entre sí.

8. Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que además comprende una capa de material de absorción de luz pasiva (60), en donde, opcionalmente, la capa de material de absorción de luz pasiva (60) es metálica.

40 9. Dispositivo según la reivindicación 8, en donde la capa de material de absorción de luz pasiva (60) no comprende ningún material de cambio de fase.

10. Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones 8-9, en donde:  
45 la capa de cobertura comprende una pluralidad de subcapas de capa de cobertura, teniendo al menos dos de las subcapas de capa de cobertura índices de refracción diferentes entre sí, y la capa de material de absorción de luz pasiva (60) se proporciona dentro de la capa de cobertura (16), intercalada entre dos de las subcapas de capa de cobertura (161, 162), o la capa de material de absorción de luz pasiva (60) está provista directamente adyacente a la capa de cobertura (16).

50 11. Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones 8-9, en donde:  
la capa de material de absorción de luz pasiva (60) se proporciona dentro de la capa espaciadora (40), intercalada entre dos de las subcapas de capa espaciadora (401, 402), o la capa de material de absorción de luz pasiva (60) está provista directamente adyacente a la capa espaciadora (40).

55 12. Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la capa reflectante es parcialmente reflectante y el dispositivo es transmisivo, o en donde la capa reflectante es totalmente reflectante.

60 13. Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde una o más de las capas comprende una cavidad óptica que determina la respuesta espectral del dispositivo a la luz incidente.

14. Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la pila está configurada para proporcionar una pluralidad de respuestas espectrales diferentes a la luz incidente en una pluralidad correspondiente de regiones diferentes, en donde, opcionalmente:

65 las diferentes respuestas espectrales se proporcionan al menos en parte configurando al menos un subconjunto

de las regiones para que tengan diferentes secuencias de capas y/o diferentes grosores de una o más capas correspondientes; o

5 las diferentes respuestas espectrales se proporcionan al menos en parte configurando al menos un subconjunto de las regiones de manera que la capa de material de absorción de luz (10) se conmute en diferentes fases, en donde el dispositivo está configurado para proporcionar la conmutación en diferentes fases aplicando impulsos eléctricos o térmicos independientemente en diferentes regiones para inducir un cambio de fase reversible del material de absorción de luz (10) en las regiones.

10 15. Una pantalla, una pantalla a color, una marca de seguridad, un filtro de color, una capa decorativa, un espectrómetro o una ventana que comprende un dispositivo óptico según cualquiera de las reivindicaciones anteriores.

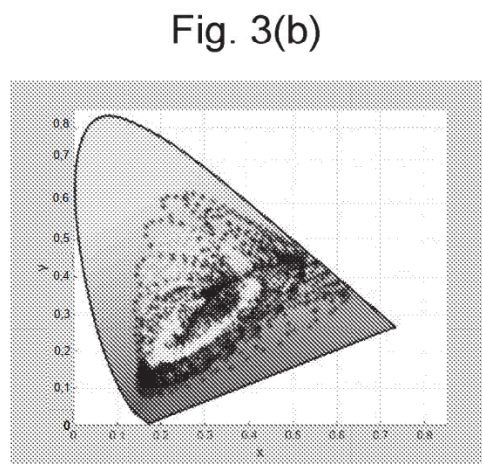
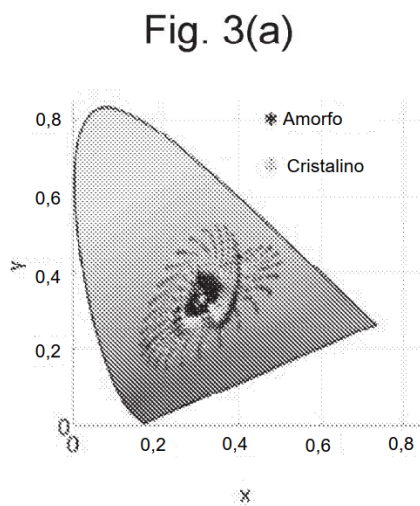
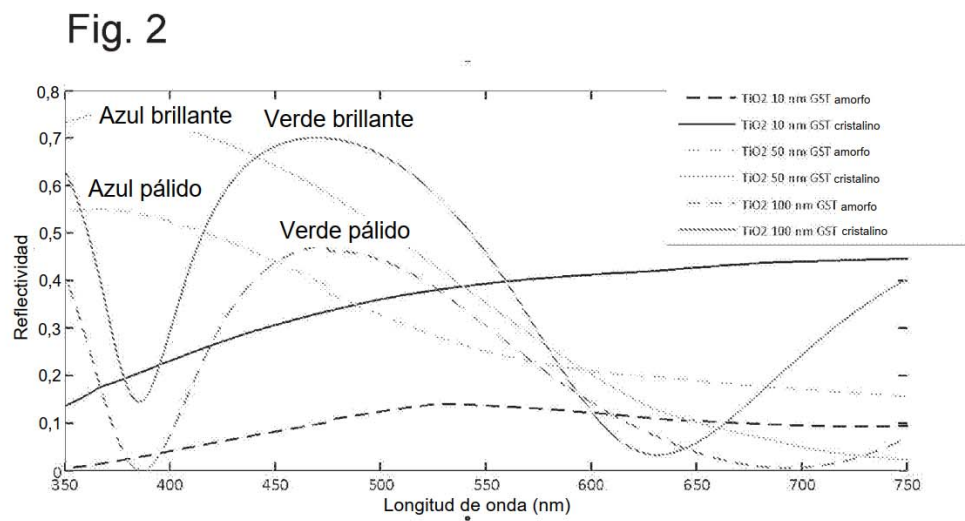
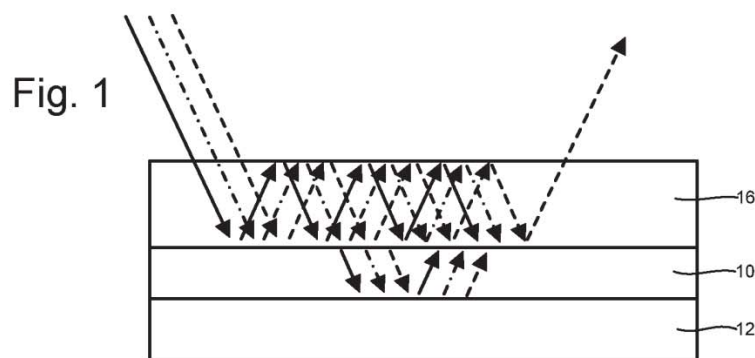


Fig. 4

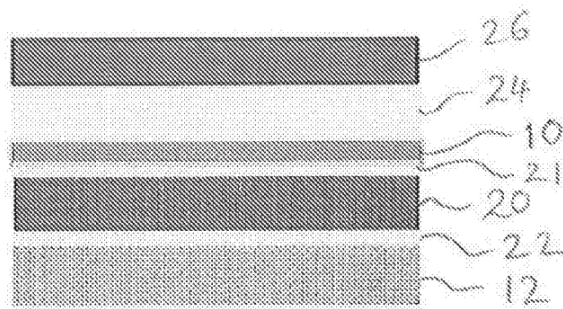


Fig. 5

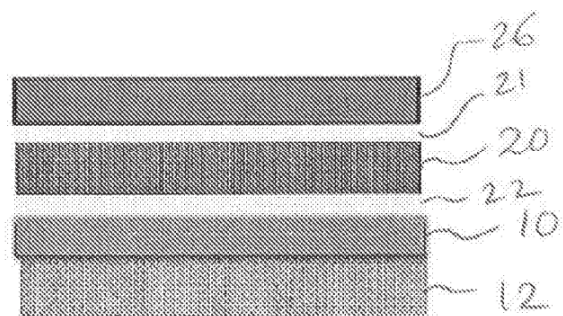


Fig. 6

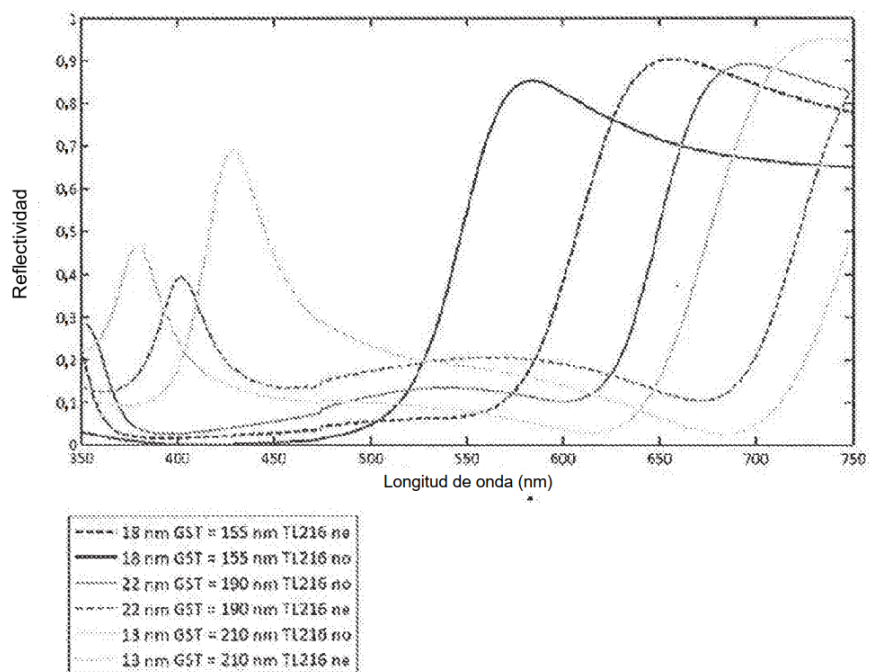


Fig. 7

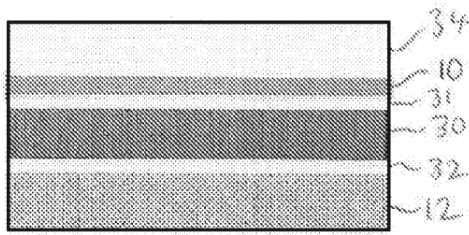


Fig. 8

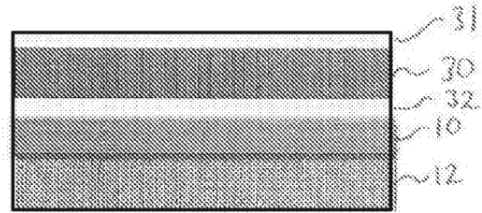


Fig. 9

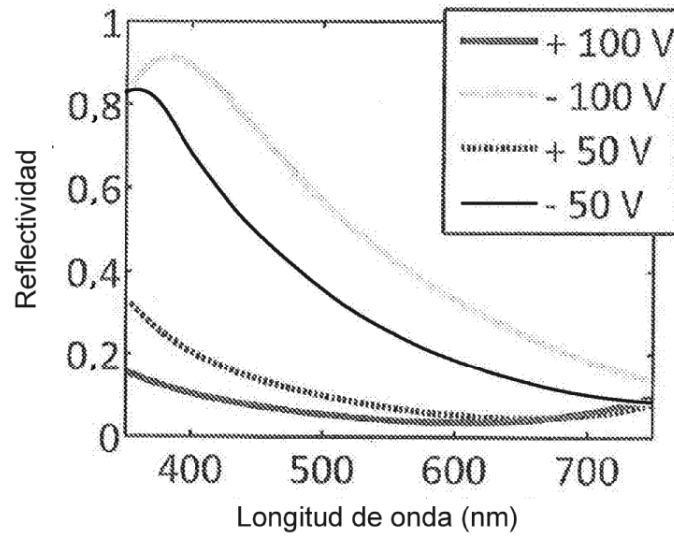


Fig. 10

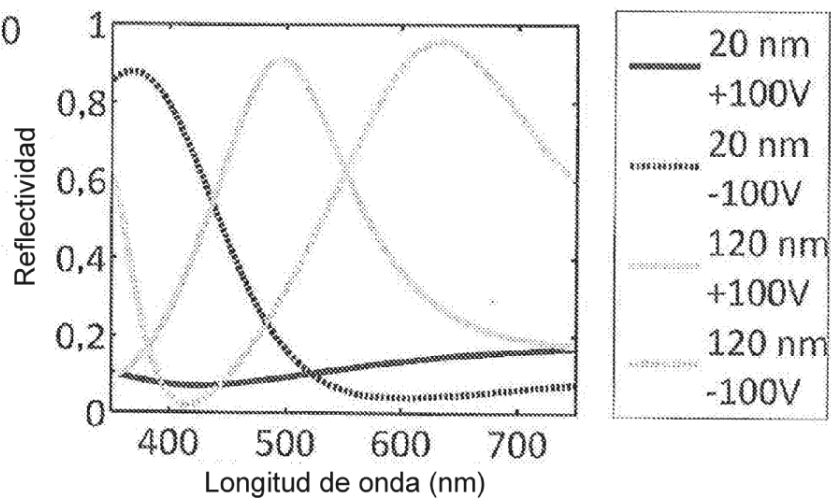


Fig. 11

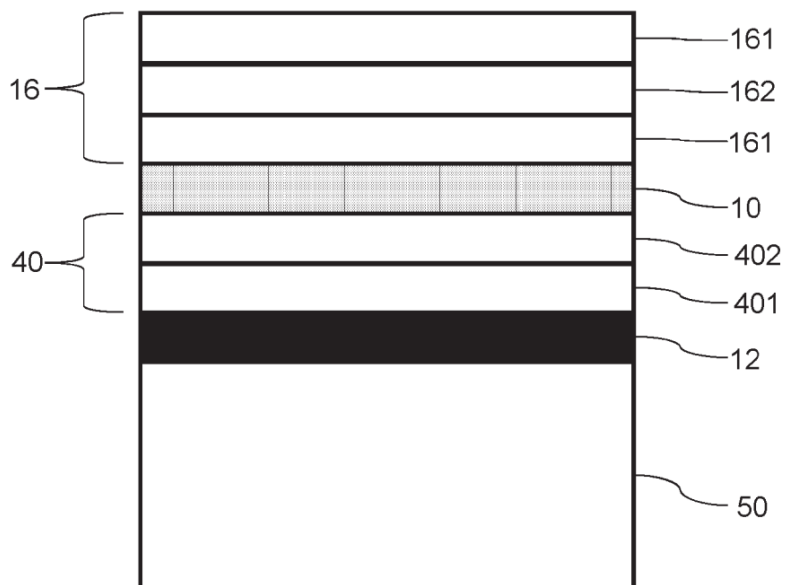


Fig. 12

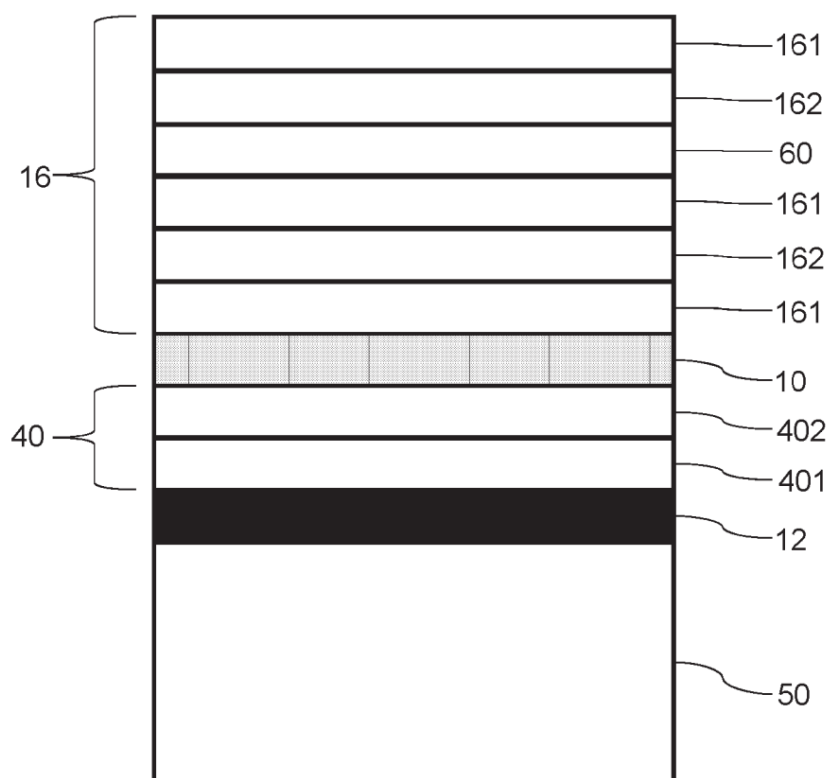




Fig. 13

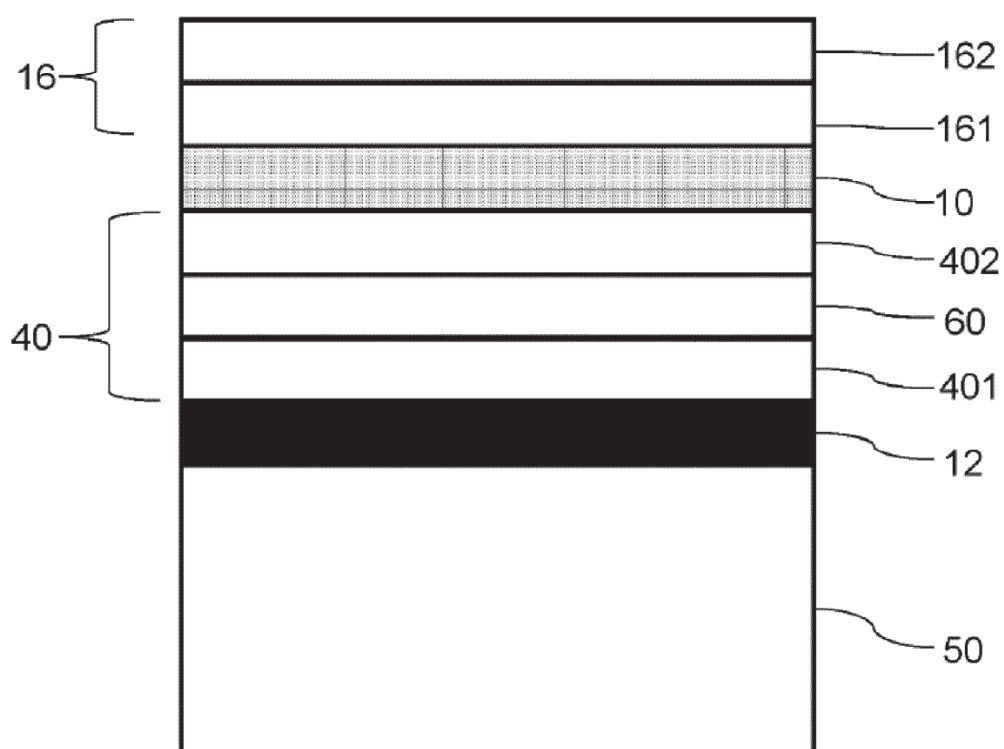


Fig. 14

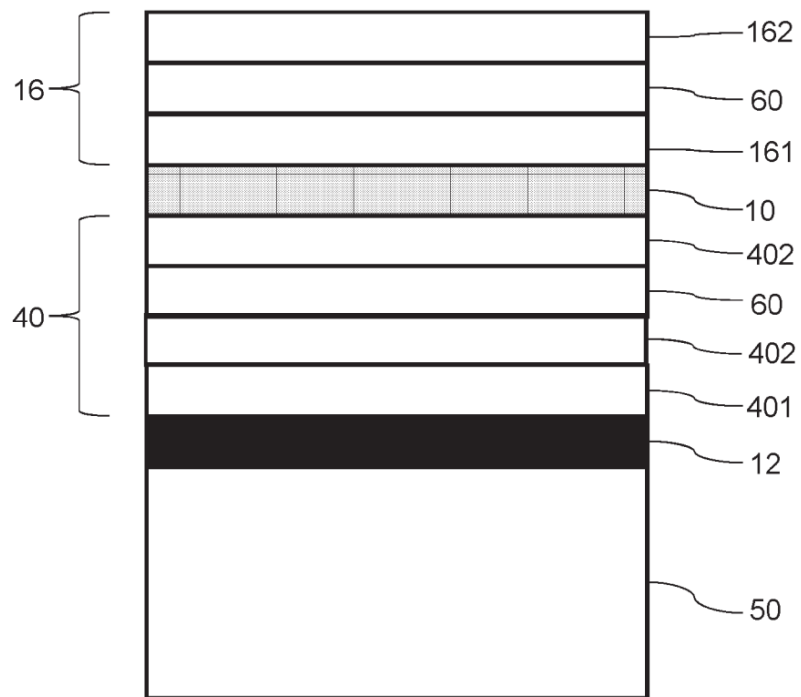


Fig. 15

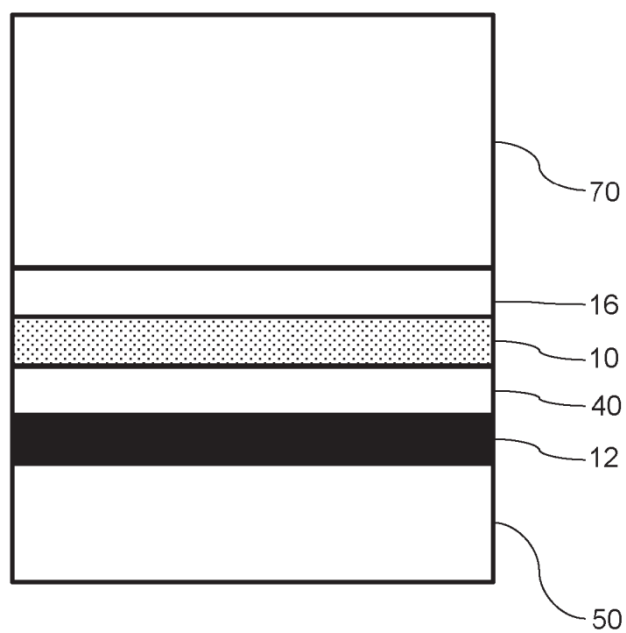


Fig. 16

