

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 701 708**

51 Int. Cl.:

H01J 40/00 (2006.01)

H01J 40/06 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **13.05.2007 PCT/IL2007/000582**

87 Fecha y número de publicación internacional: **22.11.2007 WO07132459**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **13.05.2007 E 07736322 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **12.09.2018 EP 2022246**

54 Título: **Dispositivo de emisión de electrones de alta densidad de corriente y alta frecuencia de funcionamiento**

30 Prioridad:

11.05.2006 US 799353 P

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

25.02.2019

73 Titular/es:

**NOVATRANS GROUP SA (100.0%)
Chateau de Vaumarcus NE
2028 Vaumarcus NE, CH**

72 Inventor/es:

LEVY, JEFFREY

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 701 708 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 de emisión de electrones de alta densidad de corriente y alta frecuencia de funcionamiento

Campo de la invención

5 La presente invención se refiere a un dispositivo de fotoemisión eléctrico capaz de funcionar a altas frecuencias (por ejemplo, Terahercios) y con alta densidad de fotocorriente.

Antecedentes de la invención

10 Las aplicaciones que requieren dispositivos eléctricos que puedan funcionar a frecuencias de Terahercios (THz) resultan deseables en muchas áreas, tales como el diagnóstico por imágenes, la detección de seguridad de objetos hostiles y sustancias químicas nocivas, entre otros. El régimen de THz, comúnmente definido como el intervalo de 300 GHz a 10 THz, corresponde a longitudes de onda de entre 1 mm y 30 μm . La radiación de THz es capaz de penetrar una diversidad de materiales que son opacos a la luz visible, tales como la ropa o el papel. Por otro lado, la radiación de THz es absorbida por el agua y las sustancias orgánicas, materiales comúnmente percibidos como transparentes. Estas propiedades de absorción únicas se prestan en sí para diversas técnicas de detección y formación de imágenes.

15 Un enfoque actual para el funcionamiento a frecuencias de THz se basa en el uso de la tecnología CMOS, más específicamente el uso de la antena semiconductor de GaAs. Sin embargo, para lograr una generación de THz eficaz en tal antena, mediante el empleo de un fotomezclador de GaAs, la longitud de onda del láser ha de ser más pequeña que el intervalo de banda del semiconductor y las fuentes de láser deben ser potentes y, ya que muchas líneas de absorción de THz tienen una amplitud de decenas o cientos de GHz, deben tener un gran intervalo de sintonización libre de salto de modo. El uso de la antena semiconductor de GaAs es problemático debido al límite en la velocidad de electrones en un semiconductor. Por lo tanto, el intervalo de THz es un intervalo espectral, en el que el funcionamiento eficaz de los sistemas complejos basados en electrónica es difícil de implementar.

25 El documento EP 0828143 describe una arquitectura de sistema óptico para la electroscopía de THz y otros procedimientos de investigación. En tal sistema, la radiación se puede acoplar direccionalmente, de manera altamente eficaz, dentro y fuera de estructuras fotoconductoras, tales como, por ejemplo, las antenas dipolo. En algunas realizaciones, un sistema óptico comprende una fuente para la emisión de radiación en un intervalo de frecuencias que va de 100 GHz a 20 THz, una estructura de lente de acoplamiento para el acoplamiento de la radiación emitida por dicha fuente en el espacio libre, al menos un elemento óptico de colimación para la colimación de la radiación acoplada recibida en un haz que tiene un diámetro sustancialmente independiente de la frecuencia y sustancialmente sin curvatura del frente de onda y un detector para la detección del haz colimado mediante el al menos un elemento óptico de colimación. En otra realización, el sistema óptico comprende una estructura de lente de sustrato modificada y el elemento óptico de colimación se reemplaza por al menos un elemento óptico que enfoca la radiación acoplada recibida en un punto focal limitado por la difracción sobre o dentro del medio sometido a investigación.

35 El documento US 5.894.125 describe un sistema de formación de imágenes de THz, en el que la región de emisor del generador de THz está diseñada de tal manera que la muestra que se va a analizar se coloca en el campo cercano del generador. Esto permite que la radiación influya en la muestra sin que intervenga la óptica.

40 McIntosh y col., Terahertz photomixing with diode lasers in low-temperature-grown GaAs, Appl. Phys. Letter 67, 3844 (1995) describe que las mediciones ópticas heterodinas con bombas de láser de diodos con reflector distribuido de Bragg demuestran que los fotomezcladores de GaAs de crecimiento a baja temperatura (LTG) se pueden usar en una fuente de terahercios compacta de estado sólido.

45 Brown y col., Photomixing up to 3.8 THz in low-temperature-grown GaAs, Appl. Phys. Letter 66, 285 (1995) describe que se usa el GaAs de crecimiento a baja temperatura (LTG) como convertidor o fotomezclador óptico-heterodino, a fin de generar una radiación de salida de onda continua coherente desde frecuencias de microondas hasta 3,8 THz. El fotomezclador consiste en una capa epitaxial de GaAs de LTG con electrodos interdigitados fabricados sobre la superficie superior.

Descripción general de la invención

En la técnica existe la necesidad de un dispositivo eléctrico capaz de funcionar tanto con alta densidad de fotocorriente como con altas frecuencias.

50 Los inventores han hallado que la disposición adecuada de un dispositivo eléctrico basado en fotoemisión, en el que los electrones se desplazan en un espacio libre (vacío), permite que se obtengan, de manera deseable, mayores frecuencias de funcionamiento y densidades de corriente de emisión. La invención es tal como se define en las reivindicaciones adjuntas.

La limitación en la densidad de corriente parece ser el resultado principalmente de la degradación de los fotocátodos y de la carga de espacio. Las causas de la fatiga y la inestabilidad de los fotocátodos se dividen normalmente en dos categorías: aquellas que son relevantes o dominantes en ausencia del flujo de corriente y aquellas que son relevantes o dominantes en presencia del flujo de corriente.

- 5 En la primera categoría se encuentran tres factores principales: la oxidación de los fotocátodos mediante gases residuales, el exceso o la escasez de revestimiento de Cs y el sobrecalentamiento. Estos efectos son esencialmente consecuencias de diversos fallos durante el procedimiento de producción y/o almacenamiento de los fotocátodos. La oxidación, por ejemplo, depende de la presencia de gases residuales, que es el resultado de un bombeo/una
 10 desgasificación insuficiente del sustrato y otras partes de envoltura o se debe a la formación de fugas a lo largo del sello de vacío. El exceso o la escasez de Cs es típicamente el resultado de una baja temperatura de activación o un tiempo de activación insuficiente, respectivamente. El sobrecalentamiento de los fotocátodos (la temperatura máxima se encuentra típicamente en el intervalo 100 °C-200 °C) se puede producir durante el almacenamiento o mediante la luz absorbida fuerte. Se pueden evitar tales efectos tomando las precauciones necesarias y usando procedimientos de producción y almacenamiento óptimos.
- 15 Las principales causas del deterioro de los fotocátodos en presencia del flujo de corriente son de una naturaleza más fundamental.

Una de tales causas se conoce como bombardeo de iones. La presión del gas dentro de los fototubos convencionales se encuentra normalmente en el intervalo de aproximadamente $133,32 \times 10^{-6}$ Pa a $133,32 \times 10^{-8}$ Pa. Esta presión es lo suficientemente alta como para permitir colisiones ocasionales entre los fotoelectrones acelerados
 20 emitidos y las moléculas de gas, lo que da como resultado la producción de iones positivos. Estos iones se aceleran mediante el campo eléctrico en el fototubo y provocan daños a los fotocátodos cuando golpean su superficie. El bombardeo de iones es el mecanismo de fatiga más significativo en los fototubos convencionales, los fotomultiplicadores, etc.

La alta resistencia de los fotocátodos semitransparentes también contribuye a su deterioro. La resistencia de lámina de los fotocátodos semitransparentes es muy alta, que alcanza 10^6 - 10^7 ω /cuadrado, dependiendo del tipo de fotocátodo. Como resultado, cuando la corriente se emite desde un fotocátodo semitransparente, se produce una diferencia de potencial relativamente grande entre el área interior del fotocátodo y el anillo conductor que sirve como contacto eléctrico con el fotocátodo. Esta diferencia de potencial puede conducir, a su vez, a los siguientes
 25 mecanismos de deterioro de rendimiento. En primer lugar, las áreas interiores del fotocátodo se llegan a cargar positivamente. Como consecuencia, únicamente los electrones más energéticos (si los hay) son capaces de superar el potencial positivo resultante y de emitirse. Este efecto evita la alta corriente de emisión, pero no causa daños irreversibles a la estructura de los fotocátodos. En segundo lugar, una diferencia de potencial suficientemente grande entre las áreas de los fotocátodos interiores y el contacto eléctrico pueden provocar la descomposición electrolítica del compuesto de Cs-Sb (o K-Sb, etc.). Este efecto irreversible se puede reconocer fácilmente mediante el cambio
 30 del color del fotocátodo. En tercer lugar, el flujo de corriente suficientemente alta a través de un medio eléctricamente resistivo puede conducir a la disipación de grandes cantidades de calor y, como consecuencia, al sobrecalentamiento del material de fotocátodo.

Los valores más altos de la densidad de fotocorriente en la que los fotocátodos basados en álcali transparentes permanecen estables se citan normalmente en la literatura profesional como 1-10 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, aparte de los fotocátodos S-20, que se observó que permanecían estables a densidades de corriente de varios mA/cm^2 . Las corrientes obtenidas a partir de los fotocátodos en modo reflectante no están limitadas por la alta resistencia de los fotocátodos en el plano y deberían ser considerablemente más altas. Por ejemplo, un experimento llevado a cabo por los inventores demostró la estabilidad de los fotocátodos en modo reflectante de CsSb a aproximadamente 1 mA/cm^2 y 25 V durante al menos medio año.

45 En el caso de las corrientes de fotocátodos por pulsos, los valores de corriente de pico pueden ser mucho más altos que para el funcionamiento de onda continua. Las corrientes promedias (calculadas teniendo en cuenta el ciclo de trabajo de los pulsos) siguen estando limitadas por los problemas de resistencia de los fotocátodos. Por ejemplo, las corrientes de pulso (longitud de pulso de 1-10 μs) de más de 1 A (de un par de cm^2) se extrajeron a partir de los fototubos disponibles en el mercado Φ -13 y Φ -22 con fotocátodos en modo reflectante S-20 [A. G. Berkovsky, V. A. Gavanin y I. N. Zajdel, Vacuum Photoelectronic Devices, Moscú (1976)].

50 Una densidad de corriente de 1 A/cm^2 está cerca del límite de carga de espacio para los fototubos de dimensiones convencionales. De hecho, según la ley de Child

$$J = 2,33 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{V^{3/2}}{d^2},$$

la distancia de cátodo-ánodo limitante para la obtención de $J = 1 \text{ A}/\text{cm}^2$ en el régimen de carga de espacio se puede expresar como

$$d = 15 \cdot 10^{-6} \cdot V^{3/4}.$$

5 Para una tensión de ánodo de 100 V, esta tensión es de aproximadamente 0,5 mm. Si el cátodo y el ánodo están más separados, entonces la corriente del ánodo estaría limitada por los efectos de carga de espacio y no por el rendimiento de los fotocátodos. Por lo tanto, resulta prácticamente imposible alcanzar mayores densidades de corriente con los tubos convencionales.

La técnica desarrollada por los inventores proporciona una solución a los problemas mencionados anteriormente y permite un dispositivo de fotocorriente de alta frecuencia y alta densidad. Además, la técnica desvelada en la presente solicitud utiliza dimensiones de dispositivo pequeñas para superar la limitación de la velocidad del portador de carga y, por tanto, presenta un dispositivo que puede funcionar a altas frecuencias (por ejemplo, THz).

10 La técnica desvelada aprovecha las técnicas anteriores desarrolladas por el inventor de la presente solicitud y desveladas en los documentos WO05008711 y WO06077595, según los que un dispositivo de emisión de electrones incluye un fotocátodo y electrodos de ánodo y, posiblemente también, un electrodo de compuerta, en el que el cátodo se puede exponer a una iluminación adecuada para inducir la emisión de electrones a partir del mismo.

15 En un dispositivo según la presente divulgación, las áreas del electrodo de ánodo y/o cátodo, así como las distancias entre electrodos, son de dimensiones de micrómetros e inferiores al micrómetro, preferentemente del orden de decenas a cientos de nanómetros. Los electrones emitidos a traviesan las cavidades entre electrodos y sus trayectorias se determinan mediante los potenciales de electrodo.

20 Se pueden inducir los electrones libres para que se desplacen muy rápido, en comparación con los electrones (u orificios) en red, en un material semiconductor. Al hacer que las dimensiones del dispositivo sean pequeñas, el "tiempo de tránsito" promedio, que es el tiempo que tarda un electrón en completar su trayectoria dentro del dispositivo, se puede hacer muy corto y fundamentalmente mejor que en los dispositivos de CMOS. Asimismo, cuanto menores son las dimensiones del dispositivo, mayor será su frecuencia máxima de funcionamiento, tal como se determina mediante la relación de conductancia común respecto a la capacidad. El funcionamiento de tal dispositivo, sin embargo, depende fundamentalmente de la cantidad de densidad de fotocorriente emitida.

25 Tal como se ha mencionado anteriormente, una de las posibles limitaciones de la densidad de corriente es el límite de carga de espacio; el límite de la densidad de corriente de emisión como resultado de la fuerza de repulsión de los electrones previamente emitidos dentro de la cavidad. En un dispositivo según la presente divulgación, este límite es relativamente alto debido a las distancias entre electrodos muy pequeñas. Según la ley de Child, la corriente máxima (debido a la carga de espacio) es inversamente proporcional a la distancia cuadrada del cátodo-ánodo. Si esta distancia se hace muy pequeña, entonces la limitación de carga de espacio se reduce significativamente.

30 Otra ventaja de un dispositivo según la presente divulgación es que este funciona a tensiones relativamente bajas (es decir, diferencias de potencial entre los electrodos), por ejemplo, del orden de unos pocos voltios (a diferencia de incluso miles de voltios usados en algunas aplicaciones de corriente). Esto resulta importante también con respecto a la degradación del cátodo y, por tanto, con respecto a la densidad de corriente emitida y la frecuencia de funcionamiento.

35 El problema del bombardeo de iones se podría evitar en el dispositivo según la presente divulgación, no solo por las dimensiones de cavidad pequeñas, que, junto con el vacío adecuado, implican una probabilidad muy pequeña de colisión, sino también por la posibilidad de funcionar con pequeñas diferencias de potencial entre los electrodos y, por tanto, la baja energía de las partículas. La probabilidad de colisiones entre los electrones emitidos y las moléculas de gas se reduce significativamente debido a la corta distancia de cátodo-ánodo, que es más corta que la trayectoria libre media de los electrones (que es de aproximadamente 4 mm a una presión de aproximadamente 133,32 Pa), y al volumen muy pequeño de la envoltura del dispositivo, en el que el número de moléculas de gas residual es extremadamente pequeño. (En un volumen de $3 \mu \times 3 \mu \times 0,5 \mu$ a una presión de aproximadamente 133,32 x 10^{-5} Pa, el número de moléculas de gas es del orden de uno). Además, si la diferencia de potencial de cátodo-ánodo es menor que la energía de ionización de los gases residuales, entonces no se puede producir la ionización mediante electrones acelerados. El efecto de bombardeo de iones se puede eliminar mediante el mantenimiento de la tensión de ánodo-cátodo de un valor que no exceda la tensión de ionización (que es de aproximadamente unas pocas decenas de voltios), por ejemplo, usando la tensión de ánodo-cátodo de aproximadamente 15 voltios. Se debería entender que el presente dispositivo puede funcionar con tensiones superiores (por ejemplo, 100 V) con el fin de proporcionar mayor potencia de funcionamiento, pero en el caso de los fotocátodos, el tiempo de vida puede ser más corto.

40 Otro procedimiento que daña el electrodo es el calentamiento del material como resultado del flujo de corriente debido a una caída de tensión interna. Además, debido a que el área de electrodo es pequeña, se mejora la disipación de calor. Por ejemplo, en un dispositivo según la presente divulgación, el cátodo puede estar rodeado y cubierto sobre la superficie no emisora por una capa conductora para mejorar la disipación de calor.

55 Según la presente divulgación, con el fin de evitar los efectos de alta resistencia de los fotocátodos, los fotocátodos pueden crecer en una capa altamente conductora (pero ópticamente transparente), por ejemplo, una película fina de

Cr. La colocación de una rejilla conductora de calor sobre una parte grande (preferentemente toda) del área de los fotocátodos y a una distancia inferior al micrómetro de los fotocátodos sirve para evitar que los fotocátodos se sobrecalienten por medio de una mejor disipación del calor. Además, una rejilla conductora relativamente espesa se puede proporcionar alrededor del área activa de los fotocátodos ($\sim 3 \times 3 \mu^2$).

- 5 En este caso, no fluye ninguna corriente en el plano en los fotocátodos, por lo que la única diferencia de potencia significativa en el material de fotocátodo altamente resistivo se encuentra entre la capa subyacente conductora y la superficie emisora. La resistencia eléctrica entre estas capas se estima como

$$R = R_{cuadrada} \frac{l^2}{S},$$

10 en la que $R_{cuadrada}$ es la resistencia de lámina (en ohmios por cuadrado), l es el espesor de fotocátodo y S es el área de los fotocátodos. En cuanto a $R_{cuadrada} = 10^6 - 10^7 \Omega/\text{cuadrado}$, $l = 20 - 40 \text{ nm}$ y $S = 9 \mu^2$, la resistencia R se encuentra en el intervalo de 50-2000 Ω . En cuanto a una corriente de 1 mA, esto da como resultado una caída de tensión de 0,05 V a 2 V en los fotocátodos. Cuando las corrientes de 10 μA fluyen en fotocátodos semitransparentes de fototubos convencionales, las tensiones en el plano correspondientes son al menos del mismo orden de magnitud, puesto que la resistencia es del orden de $M\Omega$. (Tales corrientes se proporcionan según las especificaciones de los tubos y no destruyen los fotocátodos). Tales tensiones no conducen a la aparición de la descomposición electrolítica. En consecuencia, el efecto de descomposición electrolítica también se evitaría en un dispositivo inventado. El calor en Julios disipado en la capa de fotocátodo ascendería a aproximadamente 0,05 mW hasta 2 mW.

20 Los inventores han hallado que una densidad de corriente requerida de 10.000 A/cm^2 se puede obtener en un dispositivo con unas dimensiones de $3 \times 3 \mu\text{m}^2$, que significa una corriente de $\sim 1 \text{ mA}$. Se debería entender que el parámetro importante es una densidad de corriente y no la corriente total. Esto depende de la aplicación de una densidad de iluminación adecuada. Por ejemplo, los diodos láser azules se pueden usar para dar soporte a unidades de disco ópticas avanzadas. La longitud de onda reducida también proporciona más electrones energéticos que ayudan a algunos parámetros críticos de rendimiento del dispositivo. Se han identificado materiales de fotocátodo con un rendimiento de aproximadamente el 20 %, por lo que la generación del flujo de electrones resulta posible con un fotoflujo práctico. Los cálculos muestran que el nivel de vacío razonablemente alto necesario para conservar los fotocátodos, junto con el volumen de cavidad pequeño del dispositivo, significa que el bombardeo de iones positivos se puede descartar en nuestro caso. Se ha creado y analizado un modelo térmico que muestra que el uso de un funcionamiento por pulsos a una relación de trabajo de 0,01 a 0,1 es inmediatamente factible, pero, en general, también se puede usar el funcionamiento en onda continua (OC). Se ha considerado el problema de la homogeneidad que muestra que la construcción prevista crearía una estructura muy homogénea, por lo que resulta improbable que se presenten tensiones térmicas diferenciales. Por tanto, las causas de fallos en segundo plano de esta fuente son poco probables.

35 Los inventores han hallado que se prefiere el uso de una capa de fotocátodo sobre un sustrato de diamante o zafiro (un buen distribuidor de calor). Esto proporciona calentamiento a unos pocos grados Celsius para un área de fotocátodo de $30 \times 30 \mu^2$.

40 Por tanto, según un aspecto amplio de la invención, se proporciona un dispositivo eléctrico que puede funcionar con una frecuencia de intervalo de THz en la salida del dispositivo, comprendiendo el dispositivo una disposición de electrodos que comprende un electrodo de fotocátodo, un electrodo de ánodo y al menos una compuerta en la que el fotocátodo se expone a la iluminación de un intervalo de longitud de onda predeterminado, creando de este modo la emisión de los electrones desde el fotocátodo y una fotocorriente a través del dispositivo; una unidad de suministro de tensión para el suministro de una señal eléctrica de entrada sobre uno de los electrodos, causando de este modo una señal eléctrica de salida legible sobre al menos un electrodo diferente; y un circuito de transmisor/receptor de señal conectado eléctricamente a dicho al menos un electrodo diferente para que pueda funcionar, por lo tanto, mediante la señal eléctrica de salida; estando los electrodos separados entre sí a una distancia que no exceda unos pocos micrómetros, permitiendo de este modo el funcionamiento del dispositivo con un suministro de tensión de unas pocas decenas de voltios o menos a dicho al menos un electrodo y capaz de obtener la salida eléctrica en el intervalo de THz de frecuencias.

50 El dispositivo puede o no incluir una fuente de iluminación como su parte constructiva. La iluminación puede funcionar para iluminar los fotocátodos con un haz de luz de determinada intensidad fija y el intervalo de longitud de onda predeterminado se selecciona de acuerdo con el material de fotocátodo para la extracción de los electrones a partir del mismo.

55 La disposición de los electrodos se puede configurar como una estructura de triodo formada por el fotocátodo, el ánodo y el electrodo de compuerta ubicado entre el fotocátodo y el ánodo. El electrodo de compuerta se separa preferentemente de cada uno de los planos de fotocátodo y ánodo a una distancia de menos de 1 micrómetro, por

ejemplo, aproximadamente 0,1 micrómetros de espacio entre la compuerta y el fotocátodo y aproximadamente 0,3 micrómetros de espacio entre la puerta y el ánodo. La compuerta puede ser de un espesor de 0,1 micrómetros y una dimensión de 0,1 micrómetros en un espacio entre el fotocátodo y el ánodo.

5 En algunas realizaciones diferentes de la invención, la disposición de los electrodos se configura como unan estructura de tetrodo formada por el fotocátodo, el ánodo, la compuerta y los electrodos de rejilla de pantalla. Estos últimos se ubican entre los planos de compuerta y ánodo. Los electrodos están separados entre sí por un espacio de menos de 1 micrómetro. Por ejemplo, la compuerta se separa del fotocátodo a una distancia de 0,1 micrómetros y se separa de la rejilla de pantalla con un espacio de 0,3 micrómetros, mientras que la rejilla de pantalla se separa del ánodo a una distancia de 0,3 micrómetros. El espesor de la compuerta, así como el de la rejilla de pantalla, puede ser de 0,1 micrómetros.

La capa de fotocátodo se puede modelar para formar una matriz de regiones separadas del material de fotocátodo y el material eléctricamente conductor superior dentro de los espacios entre las regiones de material de fotocátodo.

15 Según otro aspecto amplio de la invención, se proporciona un dispositivo eléctrico que puede funcionar con una frecuencia de intervalo de THz en la salida del dispositivo, comprendiendo el dispositivo una estructura de diodo formada por un electrodo de fotocátodo y un electrodo de ánodo; y una fuente de iluminación configurada y que puede funcionar para generar un haz de luz en forma de una superposición de dos componentes de luz de frecuencias ligeramente diferentes para iluminar de este modo el fotocátodo mediante una onda modulada en amplitud y hacer que se reciba la correspondiente fotocorriente en el electrodo de ánodo para hacer funcionar el circuito de transmisor/receptor de señal mediante una señal eléctrica inducida por dicha fotocorriente en el ánodo.

20 La fuente de iluminación puede incluir dos emisores de luz (preferentemente, diodos láser) que generen los dos componentes de luz de frecuencias ligeramente diferentes, respectivamente. Las longitudes de onda pueden ser, por ejemplo, de 800 nm y 801 nm.

Preferentemente, los electrodos de fotocátodo y ánodo están separados entre sí por un espacio de unos pocos micrómetros o menos.

25 Un circuito de transmisor/receptor de señal se conecta eléctricamente al ánodo. El diodo funciona de este modo para convertir la entrada de luz en THz en una salida eléctrica en THz que, a su vez, hace funcionar el transmisor/receptor de señal.

30 Las capas de fotocátodo y ánodo se pueden ubicar sobre las superficies separadas entre sí opuestas del primer y segundo sustratos, respectivamente, y el fotocátodo se puede iluminar a través de un sustrato ópticamente transparente. El sustrato de soporte de ánodo se forma con un conector eléctrico desde la capa de ánodo hasta una superficie externa del sustrato para el acoplamiento a una unidad de transmisión/recepción. Esta última incluye un circuito de antena, que puede estar impreso sobre la superficie del sustrato.

35 Según otro aspecto más de la invención, se proporciona un dispositivo de transmisor de THz que comprende una estructura de diodo que comprende un electrodo de fotocátodo y un electrodo de ánodo; y una fuente de iluminación configurada y que puede funcionar para generar un haz de luz en forma de una superposición de dos componentes de luz de frecuencias ligeramente diferentes para iluminar de este modo el fotocátodo mediante una onda modulada en amplitud y hacer que se reciba la correspondiente fotocorriente en el electrodo de ánodo.

40 Según otro aspecto más de la invención, se proporciona un dispositivo de transmisor de THz que comprende una disposición de electrodos que comprende un electrodo de fotocátodo, un electrodo de ánodo y al menos una compuerta en la que el fotocátodo se expone a la iluminación de un intervalo de longitud de onda predeterminado, creando de este modo la emisión de los electrones desde el fotocátodo y una fotocorriente a través del dispositivo; una unidad de suministro de tensión para el suministro de una señal eléctrica de entrada sobre uno de los electrodos, causando de este modo una señal eléctrica de salida legible sobre al menos un electrodo diferente; y un circuito de transmisor/receptor de señal conectado eléctricamente a dicho al menos un electrodo diferente para que pueda funcionar, por lo tanto, mediante la señal eléctrica de salida; estando los electrodos separados entre sí a una distancia que no exceda unos pocos micrómetros, permitiendo de este modo el funcionamiento del dispositivo con un suministro de tensión de unas pocas decenas de voltios o menos a dicho al menos un electrodo y capaz de obtener la salida eléctrica en el intervalo de THz de frecuencias.

Breve descripción de los dibujos

50 Con el fin de entender la invención y de observar cómo se puede llevar a cabo esta en la práctica, a continuación, se describirán las realizaciones preferidas, únicamente a modo de ejemplo no limitante, con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

la **Fig. 1** ejemplifica un sistema electrónico según un ejemplo de la presente invención;

55 la **Fig. 2A** muestra una onda modulada en amplitud como resultado del fotomezclado de dos frecuencias cercanas que se producen en el sistema de la Fig. 1;

la **Fig. 2B** muestra el efecto de la incorporación de una rejilla de Bragg en un diodo láser;

la **Fig. 3** muestra un ejemplo específico de la configuración del sistema de la Fig. 1; y las **Fig. 4A** y **4B** ejemplifican la estructura de triodo y tetrodo configurada para los fines de la invención.

Descripción detallada de las realizaciones ejemplares

5 Con referencia a la **Fig. 1**, se ejemplifica un sistema electrónico, en general, en **10**, según la técnica de la invención. El sistema **10** incluye un dispositivo **12** eléctrico basado en la fotoemisión (diodo o triodo), una fuente **14** de iluminación y una unidad **16** de transmisor/receptor. El sistema se relaciona típicamente con una unidad **18** de control, que incluye, entre otros, un controlador **18A** de iluminación para el control de la invención e incluye una unidad **18B** de suministro de tensión para el control de las condiciones eléctricas del dispositivo **12** electrónico y también puede incluir un panel **18C** de control adecuado.

10 En el ejemplo presente, el dispositivo **12** eléctrico se configura como un diodo que incluye un fotocátodo **12A** expuesto a la iluminación a partir de dicha fuente **14** de iluminación y un ánodo **12B** separado del fotocátodo a una distancia predeterminada. El fotocátodo puede fabricarse a partir de cualquier material adecuado, seleccionado de acuerdo con la longitud de onda de luz usada, por ejemplo, Bi-álcali, multi-álcali S₁₁, S₂₀, S₂₅, etc.

15 En el ejemplo presente, la fuente **14** de iluminación se configura y se puede hacer funcionar para la producción de un haz de luz de entrada **B_{in}** que presenta una superposición de dos componentes de luz λ_1 y λ_2 de una diferencia de frecuencia pequeña, por ejemplo, siendo uno de 800 nm y siendo el otro de 801 nm. Debería entenderse, aunque no se muestre de manera específica, que esto se puede implementar usando dos emisores de luz (por ejemplo, diodos láser) que generen dichos dos componentes de luz, respectivamente, y una disposición adecuada de los dispositivos ópticos adecuados (tales como espejos, lentes, fibras ópticas, etc.) para dirigir los dos haces hacia las trayectorias de propagación que se intersecan en el fotocátodo, obteniendo de este modo un haz de luz combinado en forma de una superposición de estos dos componentes de luz.

25 Teniendo en cuenta la radiación de la fuente de luz (por ejemplo, el láser) como una sinusoide coherente, si se superponen dos ondas de amplitud nominalmente iguales con una diferencia de frecuencia pequeña, la amplitud de la onda resultante, cuya frecuencia es igual a la suma de las frecuencias de fuente, se modula a una frecuencia de "pulsos" igual a la diferencia entre las frecuencias de fuente. Esta es la denominada técnica de "fotomezclado". De manera más específica, el primer y segundo componentes de luz tienen frecuencias ω_1 y ω_2 respectivamente, estando ambos en la región óptica del espectro electromagnético, pero ligeramente diferentes entre sí, estando la diferencia de frecuencia en el intervalo de THz. Los dos componentes de luz funcionan sobre el fotocátodo de manera heterodina de tal manera que el haz de electrones se module a la frecuencia de pulsos. Por consiguiente, el campo eléctrico que incide en el fotocátodo viene dado por la suma de los campos eléctricos de los componentes de luz respectivos y la potencia de radiación en el fotocátodo es proporcional al cuadrado del campo eléctrico total. El fotocátodo, aunque es incapaz de responder a la emisión de los electrones a frecuencias ω_2 , o su suma, puede responder a la frecuencia de pulsos. Disponiendo de $(\omega_1 - \omega_2) \ll \omega_1$, $\omega_1 \approx \omega_2$, el fotocátodo actúa como filtro de frecuencia baja y promedia la potencia incidente con el paso del tiempo. Si las densidades de potencia incidente de los dos láseres son iguales, la potencia incidente se modula al 100 % a la frecuencia de pulsos y la fotoemisión también se modulará a esta frecuencia.

35 La **Fig. 2A** muestra un ejemplo de la dependencia de la frecuencia de pulsos en el intervalo de THz de la diferencia entre las longitudes de onda de los componentes de luz, para el caso en el que una de las longitudes de onda es de 800 nm. Por ejemplo, las dos longitudes de onda pueden ser de $\lambda_1=800$ nm, $\lambda_2=801$ nm, y la diferencia (frecuencia de pulsos) es de ~0,5 THz.

La **Fig. 2B** muestra la onda modulada en amplitud como resultado del fotomezclado de dos frecuencias cercanas.

45 Los emisores de luz en la fuente de iluminación son preferentemente diodos láser, debido a que estos pueden funcionar con longitudes de onda relativamente cortas (por ejemplo, de aproximadamente 800 nm), según se requiera para un fotocátodo eficaz, y tener un ancho de línea reducido. Tal láser de diodos puede incorporar una rejilla de Bragg para el fin de estrechar y estabilizar la longitud de onda de emisión. Hoy en día existen modelos de láseres comerciales, con un ancho de línea espectral de hasta 10^{-5} nm. Esto es equivalente a un ancho de banda de unos pocos MHz.

50 Tal como se ha indicado anteriormente, en algunas realizaciones de la invención, el diodo se relaciona con una unidad de suministro de tensión que mantiene una determinada diferencia de potencial entre el fotocátodo y el ánodo. Debería entenderse que, como alternativa, no se necesita ninguna diferencia de potencial predefinida entre los mismos: por ejemplo, el fotocátodo y el ánodo se pueden conectar entre sí a través de un conector eléctrico (cable), mientras que el flujo de electrones emitidos al ánodo se inicia debido a la fotoemisión de electrones de alta energía cinética. En otras palabras, una respuesta de alta frecuencia se puede lograr o soportar mediante el uso de fotones de alta energía en el procedimiento de fotoemisión.

55 Debido al efecto de carga de espacio, existe un cambio en el potencial entre electrodos que da como resultado el denominado "cátodo virtual", es decir, una región de bajo potencial cercana al cátodo desde el que se produce una emisión eficaz. El efecto de los fotones de mayor energía se puede usar para alejar este fotocátodo virtual más del fotocátodo real.

Se hace referencia a la **Fig. 3** que muestra un ejemplo específico, pero no limitante, de un sistema electrónico, en general, en **20**, según algunas realizaciones de la invención. Se usan los mismos números de referencia para la identificación de los componentes en las ilustraciones de las Fig. 1 y 3. El sistema **20** incluye una estructura **12** de diodos formada por el fotocátodo **12A** y el ánodo **12B** separados, una fuente de iluminación (no mostrada en el presente documento), que produce una modulación de la luz de entrada de THz que después se convierte mediante el dispositivo de diodo en una radiación eléctrica de THz, y una unidad **16** de transmisor que transmite esta radiación. El fotocátodo **12A** y el ánodo **12B** se soportan mediante las superficies opuestas entre sí de los sustratos **13A** y **13B** transparentes, respectivamente, y están separados entre sí con un espacio **15** de unos pocos micrómetros. Los sustratos se mantienen con un espacio entre los mismos por medio de un separador **17** de soporte. Tal como se muestra en la figura, la unidad **16** de transmisor incluye un conector **19** eléctrico (vía conductora) que se extiende a través del sustrato **13B** relacionado con el ánodo en su interior y que forma el electrodo **12B** de ánodo y un circuito **22** de antena (antena de tipo pajarita) ubicado (por ejemplo, impreso) sobre una superficie externa del sustrato **13B** de ánodo, que se acopla eléctricamente a la vía **19** conductora. El fotocátodo y el ánodo se pueden mantener, respectivamente a tensiones de cero y 20 V. El sistema **20** presenta de este modo una disposición de antena de THz que se puede hacer funcionar a bajas tensiones.

En los ejemplos descritos anteriormente, un sistema de transmisión de THz se logra usando una estructura de diodo formada por el fotocátodo y el ánodo separados entre sí a una distancia pequeña y la iluminación de manera heterodina del fotocátodo. Tal como se describirá a continuación, tal transmisor de THz se puede obtener usando una estructura de triodo o tetrodo.

En los dispositivos de la invención, el fotocátodo se ajusta a una corriente de alta densidad (10^3 A/cm²), que se puede lograr debido a la óptima distribución de calor, tal como se ha descrito anteriormente, es decir, usando un sustrato de distribución altamente térmico (diamante o zafiro) y usando el material conductor altamente eléctrico sobre el que se evapora el fotocátodo, tal como metal transparente fino (por ejemplo, ~30 Å de cromo). A fin de lograr una conductividad eléctrica incluso mayor de la capa de fotocátodo, se puede colocar una rejilla no transparente conductora más espesa debajo de la capa de fotocátodo, dividiendo su área en áreas subyacentes y reduciendo de este modo su resistividad eléctrica global.

Preferentemente, la separación de cátodo-ánodo (espacio) es muy baja, por ejemplo, de unos pocos micrómetros. Esto permite que se alcancen altas densidades de corriente a bajas tensiones, sin que la carga de espacio limite la corriente. La fuente de luz también se selecciona de manera adecuada para proporcionar la densidad requerida de flujo de fotones. Por ejemplo, para la densidad de corriente de 10^4 A/cm² de una fotocorriente de aproximadamente 0,1 A, se necesita la densidad de luz de 10^5 W/cm².

La respuesta temporal de un fotocátodo, aunque, en general, está limitada por la difusión de electrones, puede ser prácticamente de 50-200 femtosegundos, que soporta la fotocorriente a frecuencias de hasta al menos 3 THz. La frecuencia más baja que se puede obtener está limitada por el ancho de línea del diodo de láser o, más precisamente, por la convolución de los anchos de línea de los dos diodos láser. En cuanto a los diodos láser sustancialmente idénticos cuyas líneas espectrales se modelan mediante gaussianos, se puede obtener un ancho espectral en THz proporcional al ancho de línea del único diodo láser.

La eficacia de la producción en OC de THz es mucho mayor cuando se usa un fotocátodo, que cuando se usa un fotodiodo de GaAs de crecimiento a baja temperatura. En la última técnica, solo se transmite unos pocos de microvatios, mientras que, en el diodo basado en fotocátodos expuesto a fuentes de luz similares (láseres de diodos), se puede transmitir aproximadamente 1 mW de la radiación de THz.

Se hace referencia a las **Fig. 4A** y **4B** que ilustran ejemplos de estructuras **40A** y **40B** de triodo y tetrodo adecuadas para usarse como dispositivo eléctrico basado en la fotoemisión en un sistema de transmisor/receptor de THz de la presente invención. Debería entenderse, aunque no se muestre de manera específica en el presente documento, que tal sistema incluye una fuente de iluminación para la generación de un haz de luz de una intervalo de longitud de onda y un perfil de potencia adecuados para la emisión de electrones a partir del fotocátodo dispuesto que se va a exponer a esta iluminación y una unidad de control que incluye una utilidad de control de iluminación y una utilidad de control de suministro de tensión. El fotocátodo se expone a una determinada iluminación fija, una señal eléctrica de entrada en la región de THz se suministra a uno de los electrodos (por ejemplo, la compuerta) y el funcionamiento del dispositivo (fotocorriente) amplifica la señal de entrada y la salida amplificada se lee en otro electrodo (por ejemplo, el ánodo). Los ejemplos descritos más adelante muestran cómo la disposición de los electrodos (dimensiones y distancias entre los electrodos) del dispositivo eléctrico de triodo/tetrodo permite que se alcancen frecuencias del intervalo de THz. Estos dispositivos están configurados con una construcción especial del fotocátodo y dimensiones muy pequeñas de electrodos y espacios entre los mismos y se pueden hacer funcionar con tensiones adecuadamente pequeñas para permitir una alta densidad de corriente y una salida eléctrica de alta frecuencia (hasta un intervalo de THz).

Tal como se muestra, en el triodo **40A**, el fotocátodo se separa de la compuerta de 0,1 μm de espesor a una distancia de 0,1 μm y la compuerta se separa adicionalmente del ánodo a una distancia de 0,3 μm. En el tetrodo **40B**, se coloca una rejilla de pantalla entre los planos de compuerta y ánodo, que se separan entre sí a una distancia de 0,3 μm. La dimensión de los elementos de compuerta y rejilla de pantalla en el espacio entre los electrodos es de

0,1 μm , dejando un espacio lateral de 0,3 μm para la propagación de los electrones.

5 Los inventores han demostrado que la construcción de un sistema de transmisor/receptor de THz que utilice un fotocátodo es factible y puede proporcionar la densidad de corriente requerida. El uso de un espacio pequeño entre los electrodos del dispositivo eléctrico usado en este sistema implica un límite de carga de espacio deseable a $\sim 10.000 \text{ A/cm}^2$. El dispositivo entero puede ser de dimensiones inferiores al micrómetro, de tal manera que el tiempo de tránsito de los electrones a través del dispositivo es mucho más corto que la frecuencia más alta de la señal procesada.

REIVINDICACIONES

1. Un dispositivo eléctrico que puede funcionar con una frecuencia del intervalo de THz, comprendiendo el dispositivo una disposición de electrodos que comprende al menos un electrodo de fotocátodo (12a) y un electrodo de ánodo (12b) relacionado que tiene una separación entre los mismos y en el que el fotocátodo se configura para exponerse mediante una fuente (14) de iluminación que tiene una onda de salida modulada en amplitud de THz, creando de este modo la emisión de electrones desde el fotocátodo y una fotocorriente a través del dispositivo; una unidad de suministro de tensión para el suministro de una señal eléctrica de entrada sobre uno de los electrodos de dicha disposición de electrodos; y una unidad de transmisor/receptor de señal que comprende un circuito de antena conectado eléctricamente a uno o más de los electrodos, pudiendo dicho circuito de antena, por lo tanto, hacerse funcionar mediante una señal eléctrica de salida en dicho uno o más de los electrodos.
2. El dispositivo de la reivindicación 1, en el que dicha disposición de electrodos comprende al menos un electrodo de compuerta ubicado en un plano entre los planos de fotocátodo y ánodo.
3. El dispositivo de la reivindicación 1 o 2, en el que los electrodos están separados entre sí a una distancia que no excede unos pocos micrómetros, permitiendo de este modo el funcionamiento del dispositivo con un suministro de tensión de unas pocas decenas de voltios o menos a dicho al menos un electrodo.
4. El dispositivo de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende una fuente de iluminación que puede funcionar para iluminar el fotocátodo con un haz de luz de determinada intensidad fija y dicho intervalo de longitud de onda predeterminado se selecciona de acuerdo con el material de fotocátodo para la extracción de los electrones a partir del mismo.
5. El dispositivo de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la disposición de electrodos está configurada como una estructura de triodo que comprende el fotocátodo, el ánodo y los electrodos de compuerta, estando la compuerta ubicada en un plano entre los planos de fotocátodo y ánodo.
6. El dispositivo de la reivindicación 5, en el que el electrodo de compuerta se ubica en un plano separado de cada uno de los planos de fotocátodo y ánodo por un espacio menor de 1 micrómetro.
7. El dispositivo de la reivindicación 6, en el que el espacio entre el fotocátodo y el ánodo es de aproximadamente 0,1 micrómetros y 0,3 micrómetros, respectivamente.
8. El dispositivo de la reivindicación 7, en el que dicha compuerta tiene un espesor de 0,1 micrómetros y una dimensión en un espacio entre el fotocátodo y el ánodo de aproximadamente 0,1 micrómetros.
9. El dispositivo de la reivindicación 5, en el que la disposición de electrodos está configurada como una estructura de tetrodo que comprende el fotocátodo, el ánodo, la compuerta y los electrodos de rejilla de pantalla, estando la rejilla de pantalla ubicada entre los plano de compuerta y ánodo.
10. El dispositivo de la reivindicación 9, en el que los electrodos están separados entre sí por un espacio menor de 1 micrómetro.
11. El dispositivo de la reivindicación 10, en el que el espacio entre el electrodo de compuerta y el fotocátodo es de 0,1 micrómetro, el espacio entre la compuerta y la rejilla de pantalla es de 0,3 micrómetros y el espacio entre la rejilla de pantalla y el ánodo es de 0,3 micrómetros.
12. El dispositivo de la reivindicación 11, en el que el espesor de la compuerta y la rejilla de pantalla es de 0,1 micrómetros.
13. El dispositivo de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la capa de fotocátodo se modela para formar una matriz de regiones separadas del material de fotocátodo y el material eléctricamente conductor superior dentro de los espacios entre las regiones de material de fotocátodo.
14. El dispositivo de la reivindicación 1 que puede funcionar con una frecuencia de intervalo de THz en la salida del dispositivo, en el que dicha disposición de electrodos está configurada como una estructura de diodo que comprende el electrodo de fotocátodo y el electrodo de ánodo; y una fuente de iluminación configurada y que puede funcionar para generar un haz de luz en forma de una superposición de dos componentes de luz de frecuencias ligeramente diferentes para iluminar de este modo el fotocátodo mediante una onda modulada en amplitud de THz y hacer que se reciba la correspondiente fotocorriente en el electrodo de ánodo para hacer funcionar la unidad de transmisor/receptor de señal mediante la señal eléctrica inducida por dicha fotocorriente en el ánodo.
15. El dispositivo de la reivindicación 14, en el que la fuente de iluminación comprende dos emisores de luz que generan dichos dos componentes de luz de frecuencias ligeramente diferentes, respectivamente.
16. El dispositivo de la reivindicación 14 o 15, en el que los electrodos de fotocátodo y ánodo se separan entre sí mediante un espacio de hasta unos pocos micrómetros.

17. El dispositivo de una cualquiera de las reivindicaciones 14 a 16, en el que la unidad de transmisor/receptor de señal está conectada eléctricamente al electrodo de ánodo.
18. El dispositivo de una cualquiera de las reivindicaciones 14 a 17, en el que las capas de fotocátodo y ánodo se ubican sobre las superficies separadas entre sí opuestas del primer y segundo sustratos, respectivamente.
- 5 19. El dispositivo de la reivindicación 18, **caracterizado por** al menos uno de los siguientes: (i) el primer sustrato es sustancialmente transparente para dicho haz de luz; (ii) el segundo sustrato se forma con un conector eléctrico desde la capa de ánodo hasta una superficie externa de dicho segundo sustrato para el acoplamiento a la unidad de transmisión/recepción; (iii) la unidad de transmisor/receptor comprende un circuito de antena impreso sobre la superficie externa de dicho segundo sustrato.
- 10 20. El dispositivo de una cualquiera de las reivindicaciones 14 a 19, configurado como un dispositivo de transmisor de THz.
21. El dispositivo de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 13, configurado como un dispositivo de transmisor de THz.

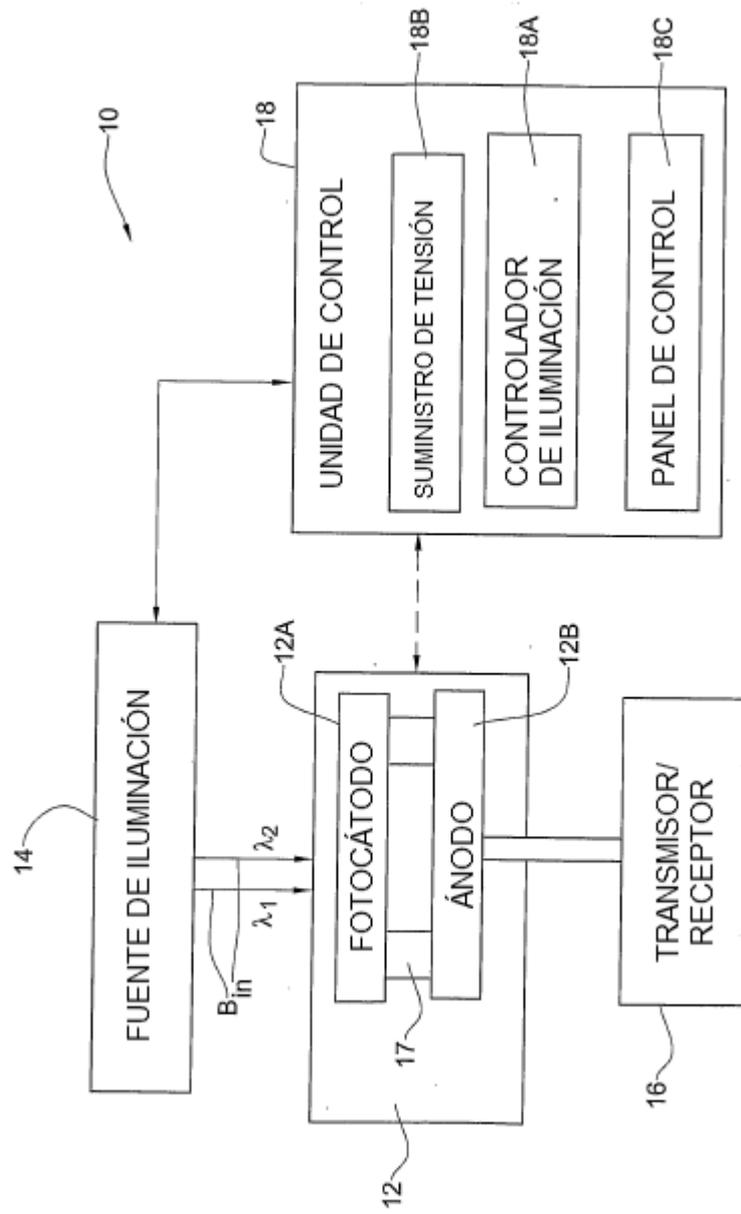


FIG. 1

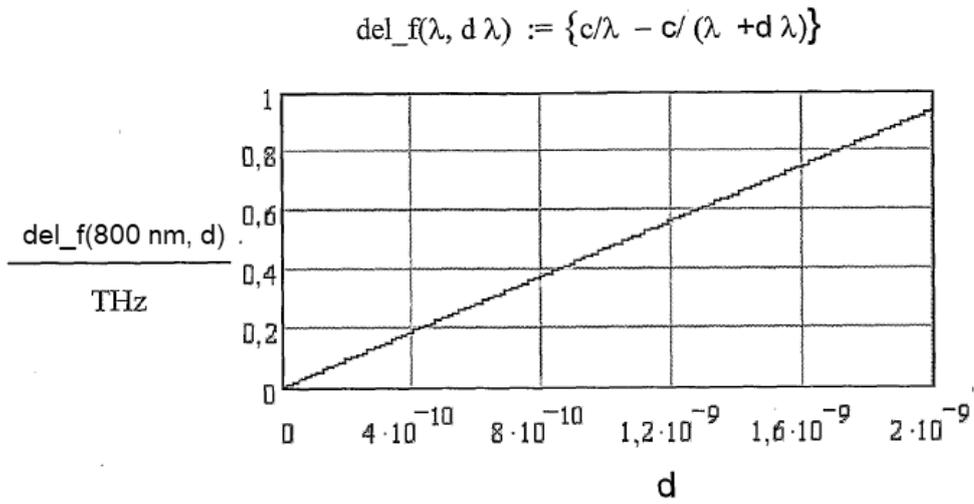


FIG.2A

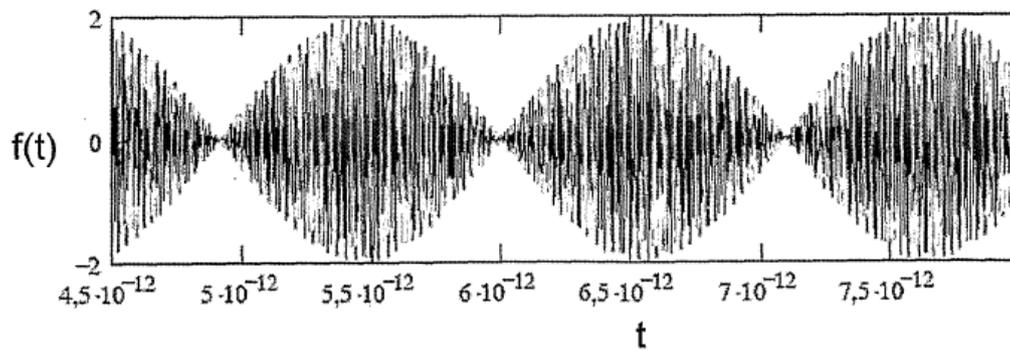


FIG.2B

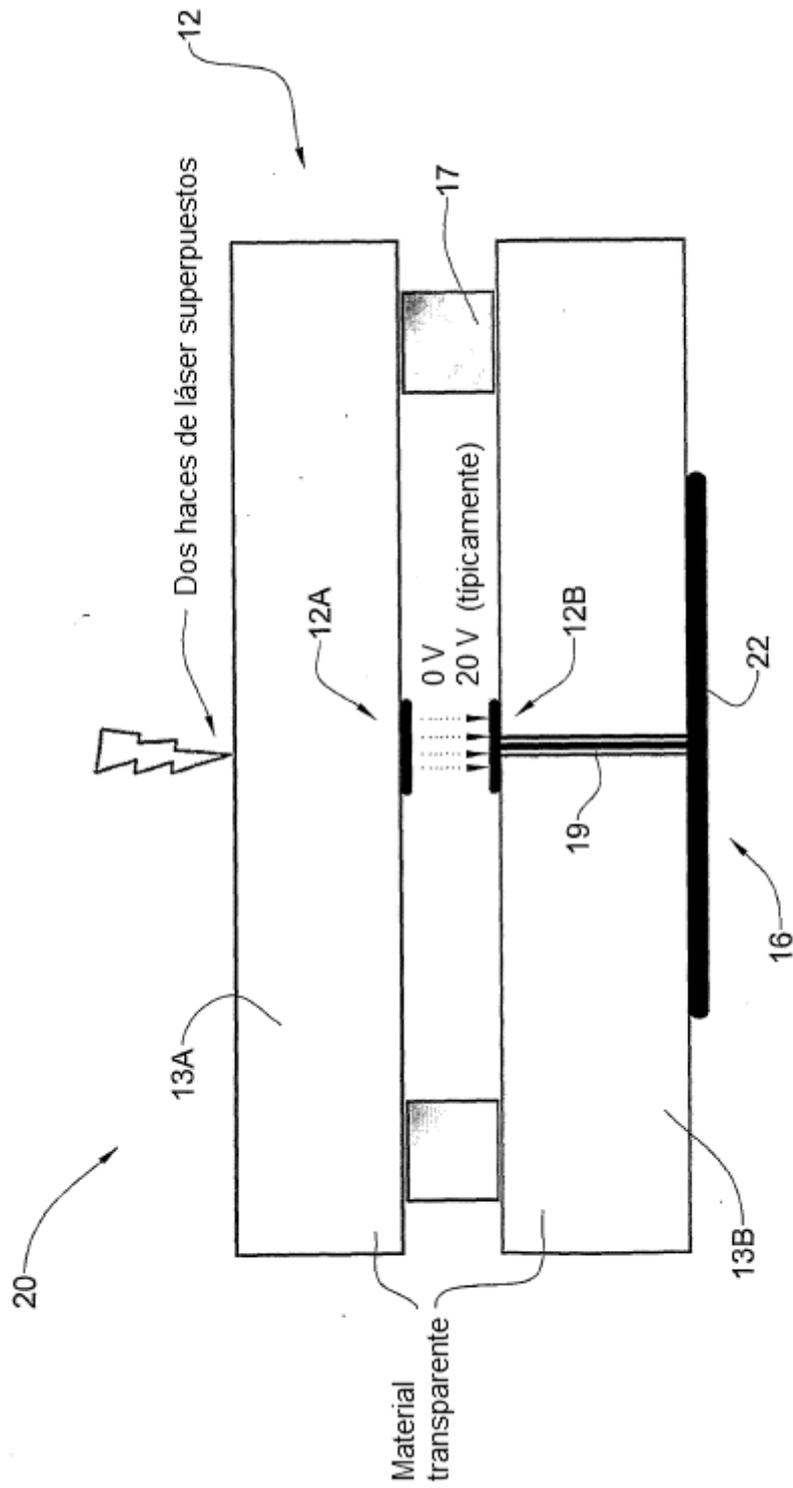


FIG. 3

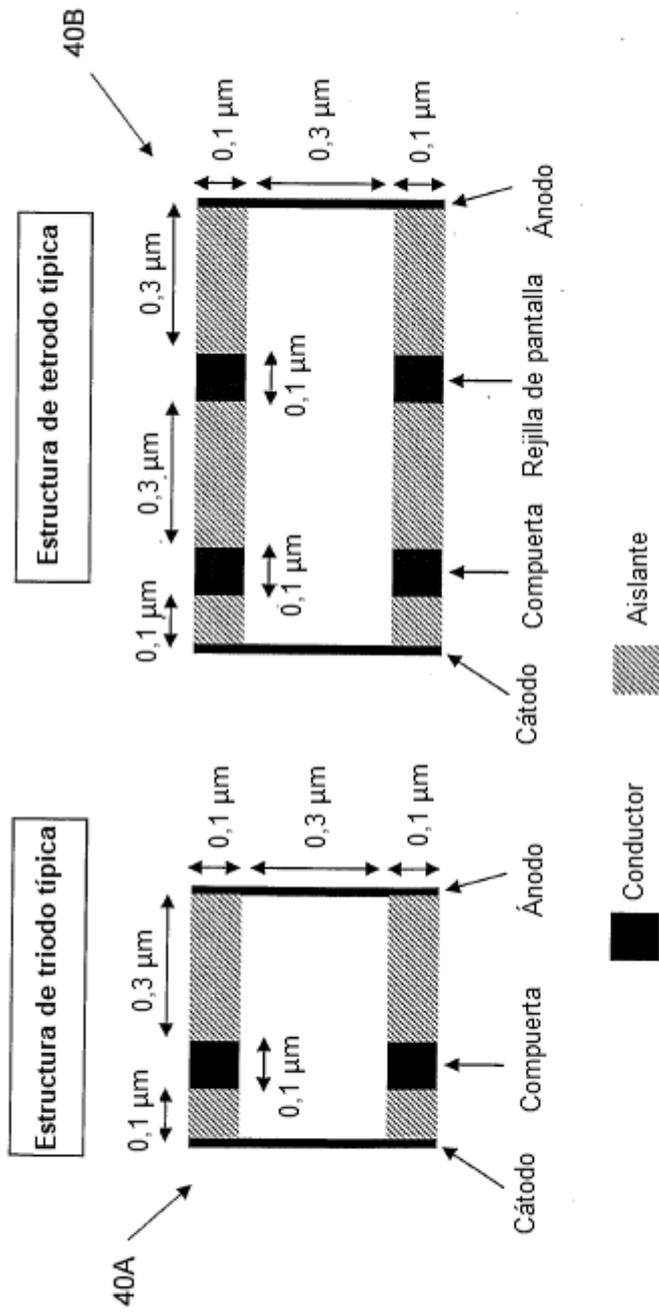


FIG.4A

FIG.4B