

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 949 619**

51 Int. Cl.:

H01L 29/778 (2006.01)

H01L 27/144 (2006.01)

H01L 29/06 (2006.01)

H01L 29/267 (2006.01)

H01L 29/786 (2006.01)

H01L 31/112 (2006.01)

H01L 33/00 (2010.01)

H01L 51/42 (2006.01)

C01B 32/182 (2007.01)

H01L 31/18 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **05.11.2018 PCT/FI2018/050804**

87 Fecha y número de publicación internacional: **16.05.2019 WO19092313**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **05.11.2018 E 18876975 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **03.05.2023 EP 3707754**

54 Título: **Transistor de efecto de campo fotosensible que incluye un material bidimensional**

30 Prioridad:

07.11.2017 GB 201718408

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

02.10.2023

73 Titular/es:

**EMBERION OY (100.0%)
Metsänneidonkuja 8
02130 Espoo, FI**

72 Inventor/es:

**BESSONOV, ALEXANDER y
ALLEN, MARK**

74 Agente/Representante:

CURELL SUÑOL, S.L.P.

ES 2 949 619 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

Transistor de efecto de campo fotosensible que incluye un material bidimensional

5 Campo de la divulgación

La presente divulgación se refiere a transistores de efecto de campo preparados sobre un sustrato, y, más particularmente, a transistores de efecto de campo fotosensibles que se pueden usar para detectar la intensidad de la radiación electromagnética.

10

Antecedentes de la divulgación

Los transistores de efecto de campo que utilizan materiales bidimensionales en el canal del transistor se pueden usar como detectores versátiles de radiación electromagnética en longitudes de onda que van del infrarrojo al ultravioleta. Un transistor de efecto de campo de grafeno (GFET), por ejemplo, comprende un canal de grafeno semiconductor cuya conductividad aumenta cuando es iluminado por radiación electromagnética. Esta mayor conductividad se puede medir, y amplificar fuertemente, en una geometría de transistor de efecto de campo en la que la corriente que pasa a través del canal se controla mediante un voltaje de puerta aplicado a un electrodo adyacente al canal.

15

20

A lo largo de esta divulgación, el grafeno será el ejemplo principal de material bidimensional, y los transistores de efecto de campo de grafeno serán los dispositivos principales. No obstante, también se ofrecerán ejemplos de otros materiales bidimensionales semiconductores, que presentan un comportamiento similar cuando se iluminan con radiación electromagnética.

25

Se sabe que el grafeno absorbe radiación electromagnética de manera uniforme en un intervalo amplio de longitudes de onda, pero la absorción en una capa de grafeno se limita a unos pocos puntos porcentuales de la intensidad de la radiación total en la mayoría de las longitudes de onda. La absorción óptica y la sensibilidad espectral de un transistor de efecto de campo de grafeno se pueden incrementar preparando una capa fotoactiva adicional adyacente al canal de grafeno. Estas capas fotoactivas pueden ser semiconductoras.

30

Entre la capa fotoactiva y la capa de grafeno se puede formar un campo eléctrico incorporado (potencial electrostático) en equilibrio termodinámico. El mismo puede facilitar el atrapamiento de portadores minoritarios cuando la radiación electromagnética ilumina el material fotoactivo. En el canal del transistor pueden recircular muchas veces portadores mayoritarios correspondientes antes de la recombinación. Por lo tanto, la capa fotoactiva puede donar portadores de carga al canal de grafeno cuando los mismos son liberados en la capa fotoactiva por la radiación electromagnética, y puede cambiar la conductividad del canal de grafeno. Este proceso de multiplicación de portadores puede hacer que mejore notablemente la sensibilidad de un transistor de efecto de campo fotosensible.

35

Las capas fotoactivas también pueden expandir a un intervalo de longitudes de onda más amplio la respuesta espectral de los GFET. Seleccionando un semiconductor con una banda prohibida óptica dada con respecto a la capa fotoactiva, el transistor de efecto de campo fotosensible se puede sensibilizar para responder de forma particularmente intensa a longitudes de onda de radiación que superan esta banda prohibida.

45

El documento US20150364545 divulga un transistor de efecto de campo con capas semiconductoras adyacentes a una capa de grafeno. Tanto el documento US2014299741 A1 como la publicación "Charge transfer effects in graphene-CdSe/ZnS quantum dots composites" ["Efectos de transferencia de carga en compuestos de puntos cuánticos de CdSe/ZnS-grafeno"], de Alexander Klekachev et al., Actas del SPIE, 27.09.2012, VOL 8462, PG 84620L – 84620L -11, dan a conocer un FET con fuente y drenador en contacto con una capa de canal de grafeno y puntos cuánticos en el canal.

50

Uno de los problemas generales en la fotodetección con GFET asistida por materiales fotoactivos semiconductores es que la magnitud del efecto multiplicativo depende de la energética de la interfase entre el grafeno y la capa fotoactiva. La energética puede ser desfavorable si la intensidad del campo eléctrico incorporado es baja. Esto puede ser así, por ejemplo, cuando la banda prohibida del material fotoactivo semiconductor se corresponde con longitudes de onda largas del infrarrojo.

55

Breve descripción de la divulgación

60

Un objetivo de la presente divulgación es proporcionar un dispositivo para aliviar la desventaja anterior. Los objetivos de la divulgación se alcanzan mediante una disposición que se caracteriza por lo establecido en las reivindicaciones independientes. En las reivindicaciones dependientes, se divulgan las formas de realización preferidas de la divulgación.

65

La divulgación se basa en la idea de formar una capa semiconductor que comprende conjuntos ordenados de material semiconductor junto al canal del transistor fotosensible. Los materiales semiconductores de estos conjuntos pueden diferir entre sí en términos de sus propiedades eléctricas. En particular, la función de trabajo de cada material semiconductor puede ser diferente. Cuando los conjuntos están dispuestos en un orden vertical adecuado, a través de la capa semiconductor se forma un campo eléctrico incorporado. El campo eléctrico encauza portadores de carga de un tipo de manera eficiente hacia el canal del transistor cuando la capa semiconductor se ilumina con radiación electromagnética.

Una de las ventajas de la disposición presentada en esta divulgación es que las propiedades eléctricas de una capa fotoactiva se pueden mejorar al tiempo que cumpliendo, también, los requisitos ópticos deseados en la misma capa fotoactiva.

Breve descripción de los dibujos

A continuación, se describirá más detalladamente la divulgación por medio de formas de realización preferidas en referencia a los dibujos adjuntos, en los que

las figuras 1a y 1b ilustran el posicionamiento relativo de la capa semiconductor y la capa del canal bidimensional en un transistor de efecto de campo fotosensible.

La figura 1c ilustra un diagrama de bandas de energía en la interfase entre una capa de canal y una capa semiconductor que comprende solamente un material semiconductor.

Las figuras 1d a 1f ilustran unos diagramas de bandas de energía en la interfase entre una capa de canal y una capa semiconductor que comprende un apilamiento en tándem de materiales semiconductores.

Las figuras 2 a 3 ilustran la interfase entre una capa de canal y una capa semiconductor según una primera forma de realización de la capa semiconductor.

La figura 4 ilustra la interfase entre una capa de canal y una capa semiconductor de acuerdo con una segunda forma de realización de la capa semiconductor.

La figura 5 ilustra la interfase entre una capa de canal y una capa semiconductor según una tercera forma de realización de la capa semiconductor.

Las figuras 6a a 6c ilustran dispositivos de transistor según una primera forma de realización del dispositivo.

Las figuras 7a a 7c ilustran dispositivos de transistor de acuerdo con una segunda forma de realización del dispositivo.

La figura 8a muestra una fotorrespuesta medida a partir de un transistor de efecto de campo fotosensible en el que la capa semiconductor comprende solamente un material semiconductor.

La figura 8b muestra una fotorrespuesta medida a partir de un transistor de efecto de campo fotosensible en el que la capa semiconductor comprende un apilamiento en tándem de materiales semiconductores.

Descripción detallada de la divulgación

Esta divulgación describe un transistor de efecto de campo fotosensible configurado para proporcionar una respuesta eléctrica cuando es iluminado por radiación electromagnética que incide en el transistor. El transistor de efecto de campo fotosensible comprende por lo menos un electrodo de fuente eléctricamente conductor y por lo menos un electrodo de drenador eléctricamente conductor, y una capa de material bidimensional que forma un canal de transistor horizontal configurado para transportar corriente entre el por lo menos un electrodo de fuente y el por lo menos un electrodo de drenador. El transistor de efecto de campo fotosensible comprende, también, por lo menos un electrodo de puerta eléctricamente conductor que se superpone o subyace con respecto a la capa de material bidimensional.

El transistor de efecto de campo fotosensible comprende, también, una capa semiconductor horizontal en contacto con el canal del transistor, que se puede configurar para donar portadores de carga al canal del transistor cuando se absorbe radiación electromagnética en la capa semiconductor, en donde la capa semiconductor comprende dos o más conjuntos de materiales semiconductores.

El material bidimensional en el canal del transistor puede tener una función de trabajo elevada, y, en este caso, los conjuntos de material semiconductor se apilan verticalmente en el canal del transistor en orden de función de trabajo decreciente. Alternativamente, el material bidimensional en el canal del transistor puede tener una función de trabajo baja, y, en este caso, los conjuntos de material semiconductor se apilan verticalmente en el canal del

transistor en orden de función de trabajo creciente.

En esta divulgación, la función de trabajo (de un electrón) de un material semiconductor significa la diferencia de energía entre el nivel de Fermi del semiconductor y el nivel de energía de vacío inmediatamente fuera de la superficie del material semiconductor. En otras palabras, la función de trabajo es una propiedad superficial que se determina antes de que el material semiconductor se haga entrar en contacto con otros materiales. Después de que un conjunto de material semiconductor se haya incorporado en un apilamiento que incluye varios conjuntos adyacentes, la diferencia entre la energía del nivel de Fermi en el material semiconductor y el nivel de energía de vacío fuera de la superficie del apilamiento puede diferir con respecto a la función de trabajo.

En esta divulgación, se entiende que los conjuntos de material semiconductor están apilados verticalmente en el canal del transistor en orden de función de trabajo decreciente si la función de trabajo del material semiconductor que está en contacto con el canal del transistor es la mayor, y la función de trabajo del material semiconductor en cada conjunto adicional del apilamiento es menor que la función de trabajo del material semiconductor de cada conjunto que está más cerca del canal que dicho conjunto adicional.

A la inversa, se entiende que los conjuntos de material semiconductor están apilados verticalmente en el canal transistor en orden de función de trabajo creciente si el conjunto en el que la función de trabajo del material semiconductor es la menor está en contacto con el canal de transistor, y la función de trabajo del material semiconductor en cada conjunto adicional del apilamiento es mayor que la función de trabajo de material semiconductor de cada conjunto que está más cerca del canal que dicho conjunto adicional.

La dirección del gradiente deseado de la función de trabajo en la capa semiconductor depende de la función de trabajo del material bidimensional en el canal del transistor. Si el material bidimensional es un material con una función de trabajo elevada, entonces, típicamente, resulta más sencillo configurar la capa semiconductor para donar huecos al canal del transistor cuando la misma se ilumina, en comparación con su configuración para donar electrones bajo iluminación. Por lo tanto, el campo eléctrico incorporado debe apuntar hacia el canal. Un campo eléctrico incorporado en esta dirección se puede generar apilando los conjuntos de material semiconductor en orden de función de trabajo decreciente. Una función de trabajo "elevada" en el material bidimensional se corresponde con una función de trabajo mayor de 4 eV. El grafeno puede considerarse un material con función de trabajo elevada.

Si el material bidimensional es un material con función de trabajo baja, tal como el diteluro de tungsteno, por ejemplo, entonces resulta más sencillo, típicamente, configurar la capa semiconductor para donar electrones al canal del transistor en comparación con su configuración para donar huecos. Por lo tanto, el campo eléctrico incorporado debe apuntar en alejamiento con respecto al canal. Un campo eléctrico incorporado en esta dirección se puede generar apilando los conjuntos de material semiconductor en orden de función de trabajo creciente. Una función de trabajo "baja" en el material bidimensional se corresponde con una función de trabajo menor de 5 eV.

Los materiales bidimensionales del canal con funciones de trabajo en el intervalo 4-5 eV se pueden utilizar o bien como materiales con función de trabajo baja o bien como materiales con función de trabajo elevada según la manera que se describe en esta divulgación. La función de trabajo del material bidimensional del canal depende también, en cierta medida, de la magnitud del dopaje, de la estructura del control de puerta del transistor de efecto de campo y del voltaje de puerta aplicado, por lo que es posible ajustar la función de trabajo del material del canal hasta cierto punto. En otras palabras, la elección de un material bidimensional no es la única variable que determina si el material en cuestión debe considerarse un material del canal con "función de trabajo baja" o "función de trabajo elevada".

En esta divulgación, los verbos "superponerse" y "subyacer" se refieren a un alineamiento vertical sin contacto directo. Cuando una primera capa "se superpone" o "subyace" con respecto a una segunda capa, la primera capa y la segunda capa están alineadas verticalmente, pero no están en contacto directo mutuo. En otras palabras, las dos capas se han depositado, ambas, en un área dada del sustrato, pero, entre ellas, se ha depositado una tercera capa interpuesta. Estas tres capas están, todas ellas, alineadas verticalmente. Como se describe más adelante, el transistor de efecto de campo fotosensible o bien puede comprender una puerta superior que se superpone con respecto al canal del transistor y está separada del canal del transistor por una capa aislante de puerta, o bien puede comprender una puerta inferior que subyace con respecto al canal del transistor y está separada con respecto al canal del transistor por la capa aislante de puerta.

Además de contacto físico directo, la expresión "en contacto con" también puede significar, en esta divulgación, contacto eléctrico sin contacto físico directo. En otras palabras, cuando la capa semiconductor, o una parte de la capa semiconductor, está en contacto con el canal del transistor, la capa semiconductor puede estar separada físicamente del canal del transistor por una capa intermedia, pero todavía en contacto con el canal del transistor ya que la capa intermedia es suficientemente delgada para permitir que pasen, a través de ella, portadores de carga. Por ejemplo, la capa intermedia puede ser un material hospedante en el que están incrustados los nanocristales semiconductores, o puede ser una capa semiconductor o aislante delgada en la superficie del canal del transistor. Si pueden pasar portadores de carga a través de la capa intermedia, por ejemplo por tunelización,

entonces el material semiconductor puede seguir considerándose “en contacto con” el canal del transistor.

El canal del transistor discurre entre el electrodo de fuente y el electrodo de drenador, y el por lo menos un electrodo de puerta es adyacente a una región del canal del transistor que se sitúa entre el electrodo de fuente y el electrodo de drenador.

En esta divulgación, la expresión “capa semiconductor” tiene el mismo significado que la expresión “capa fotoactiva”. La siguiente explicación dará prioridad a la expresión “capa semiconductor” para poner énfasis en que todos los elementos de esta capa son semiconductores.

Las figuras 1a y 1b ilustran esquemáticamente el posicionamiento relativo de la capa semiconductor 11 y la capa de canal bidimensional 12 en un transistor de efecto de campo fotosensible. En esta divulgación, el término “horizontal” se refiere a la dirección x de las figuras 1a y 1b, mientras que el término “vertical” se refiere a la dirección y. El canal de transistor 12 es horizontal en las figuras 1a y 1b ya que las capas se sitúan en una superficie de un sustrato horizontal. En esta divulgación, expresiones tales como “canal de transistor horizontal” o “capa semiconductor horizontal” no significan que todo el canal/capa esté situado de forma precisa en el mismo plano horizontal. El canal/capa se puede depositar sobre otras capas que comprenden pequeños escalones verticales. El término “horizontal” indica meramente que la orientación principal del canal/capa delgado queda determinada por el plano del sustrato. Además, términos tales como “vertical” y “horizontal” no implican nada sobre la orientación del sustrato cuando se fabrica el dispositivo, o cuando el mismo se está usando. El dispositivo y el sustrato pueden estar orientado en cualquier dirección adecuada durante su uso y fabricación, por ejemplo, lateralmente de tal manera que una capa a la que, en esta divulgación, se hace referencia como “horizontal”, se abre vertical. En otras palabras, los términos “horizontal” y “vertical” definen meramente dos direcciones ortogonales, una de las cuales es paralela a la superficie del sustrato, siendo la otra normal a esta superficie.

En la figura 1a, tomando el grafeno como ejemplo de material bidimensional, la capa de grafeno 12 se ha depositado en el sustrato 13, y, a continuación, la capa semiconductor 11 se ha depositado en la capa de grafeno 12. En la figura 1b, el orden de deposición es inverso, de manera que la capa semiconductor 11 se ha depositado en el sustrato 13 y la capa de grafeno 12 se ha depositado en la capa semiconductor 11. En un transistor de efecto de campo de grafeno puede utilizarse cualquiera de los dos órdenes.

Ambas capas 11 y 12 mencionadas se ilustran situadas directamente sobre un sustrato 13. No obstante, entre la capa de grafeno 12 y el sustrato 13 de la figura 1a, o entre la capa semiconductor 11 y el sustrato 13 de la figura 1b, también pueden interponerse otras capas, tales como un electrodo de puerta y/o una capa aislante. En las figuras 1a y 1b no se ilustran los otros componentes del transistor de efecto de campo fotosensible. En esta divulgación, las figuras no se han dibujado a escala.

En las figuras tanto 1a como 1b, la capa de grafeno 12 puede constituir un canal de transistor que discurre entre un electrodo de fuente y un electrodo de drenador, aun cuando no se ilustra un transistor completo. Cuando, sobre el transistor de efecto de campo fotosensible, incide la radiación electromagnética 14, se absorben fotones tanto en la capa de grafeno 12 como en la capa semiconductor 11. La capa semiconductor 11 puede absorber más radiación que la capa de grafeno 12, y los portadores de carga mayoritarios liberados en la capa semiconductor 11 en este evento de absorción pueden cambiar la conductividad de la capa de grafeno 12, tal como se ha explicado anteriormente.

La mera proximidad de la capa semiconductor 11 con respecto a la capa de grafeno 12 es suficiente para permitir que algunos portadores de carga mayoritarios de la capa semiconductor 11 entren en la capa de grafeno 12 y cambien su conductividad antes de que se recombinen con portadores minoritarios correspondientes. No obstante, este efecto será mucho más pronunciado en presencia de un campo eléctrico interno que impulsa continuamente portadores mayoritarios y minoritarios en direcciones opuestas. La recombinación se hace mucho menos probable cuando el campo eléctrico atrapa portadores minoritarios en la capa semiconductor y encauza portadores mayoritarios hacia la capa de grafeno. Los portadores minoritarios se pueden atrapar o bien en la banda de conducción/valencia, o bien en los estados de energía subbanda prohibida.

En la interfase entre la capa semiconductor 11 y la capa de grafeno 12, se forma un campo eléctrico incorporado cuando hay asimetría eléctrica en la capa semiconductor 11. Una capa individual de grafeno es un semiconductor de banda prohibida cero, al que también se puede hacer referencia como semimetal con superposición cero. La figura 1c ilustra un diagrama de bandas de energía en la interfase entre una capa de grafeno 12 y una capa semiconductor 11 que comprende nanocristales semiconductores. El eje horizontal de la figura 1c muestra una coordenada espacial y. Este eje es paralelo a la dirección vertical de las figuras 1a y 1b. En otras palabras, el eje y es perpendicular a la interfase horizontal entre la capa semiconductor 11 y la capa de grafeno 12. Esta interfase se sitúa en la coordenada y_1 y el material semiconductor 11 se corresponde con valores positivos de y en la figura 1c. En otras palabras, puesto que las figuras 1a ilustran capas apiladas en un orden diferente a la figura 1b, en la figura 1a la dirección de la y positiva está hacia arriba, y en la figura 1b la dirección de la y positiva es descendente. El eje vertical de la figura 1c muestra la energía de los electrones.

Pueden obtenerse diagramas de bandas de energía parecidos al representado en la figura 1c, por ejemplo, cuando la capa semiconductor 11 comprende nanocristales de PbS con una función de trabajo de 4.7 eV y una banda prohibida (del inglés, *bandgap*) de 0.7 eV. La función de trabajo de los nanocristales semiconductores se puede modificar hasta cierto punto cambiando el estado de dopaje de los nanocristales, aunque este efecto técnico normalmente resulta difícil de obtener en nanocristales de banda prohibida estrecha sin que, al mismo tiempo, o bien se comprometa su estabilidad o bien se desplacen accidentalmente las bandas de valencia y conducción. Los ligandos superficiales también pueden desplazar el nivel de Fermi y las energías del borde de las bandas de los nanocristales. No obstante, este efecto se reduce progresivamente con la disminución de la banda prohibida, debido a la reducción de la relación superficie/volumen.

Por lo tanto, cuando el nivel de Fermi E_F se ha igualado termodinámicamente en los dos lados de una interfase entre el grafeno y el nanocrystal semiconductor de banda prohibida estrecha de la figura 1c, la banda de conducción E_C y la banda de valencia E_V pueden permanecer en el mismo nivel de energía en todo el material semiconductor 11. En otras palabras, los niveles de energía de las bandas de conducción y valencia no varían en función de y , por lo que no se produce ningún doblamiento de la banda en el material semiconductor 11. Consecuentemente, no hay ningún campo eléctrico incorporado que colabore con el transporte de portadores de carga hacia la capa de grafeno 12 antes de que los mismos se recombinen.

En otras palabras, algunos materiales que absorben radiación en longitudes de onda del infrarrojo largas (por ejemplo, nanocristales semiconductores con bandas prohibidas por debajo de 0.8 eV) pueden ser relativamente pasivos desde un punto de vista eléctrico cuando se interconectan solos con una capa de grafeno. Dichos materiales absorben fotones entrantes del infrarrojo, pero la disociación de excitones y la separación de cargas no serán muy efectivas. Puede producirse un nivel significativo de recombinación, y la multiplicación de cargas que se produce en el canal no será óptima.

En otras palabras, si una capa semiconductor fotoactiva comprende solamente un material, el proceso de multiplicación de portadores inducido por un material de banda prohibida baja, que puede absorber longitudes de onda del infrarrojo largas, no es, típicamente, tan efectivo como el proceso de multiplicación inducido por un material con banda prohibida grande, que absorbe solamente longitudes de onda más cortas. Resulta más difícil incrementar la eficiencia de la medición en longitudes de onda del infrarrojo que en longitudes de onda más cortas.

La banda prohibida de un nanocrystal semiconductor depende del tamaño físico de los nanocristales (del diámetro en el caso de las partículas esféricas). La disminución del tamaño de las partículas a un valor inferior a su radio de Bohr da como resultado un confinamiento de funciones de onda de electrones y huecos y un aumento significativo de la banda prohibida. A escala nanométrica (2 a 20 nm), los nanocristales semiconductores más grandes tienen típicamente una banda prohibida menor que los nanocristales semiconductores más pequeños. Asimismo, los nanocristales semiconductores de gran tamaño tienden a tener niveles de energía del borde de la banda de conducción relativamente más profundos y funciones de trabajo más grandes. El tamaño físico y la forma de las partículas de los nanocristales semiconductores se puede ajustar a través de condiciones de la síntesis coloidal, tales como el tiempo de reacción, la temperatura, la concentración y otros parámetros de la síntesis. No obstante, la función de trabajo de los nanocristales semiconductores normalmente se puede cambiar sin alterar el tamaño de los nanocristales. La función de trabajo de un nanocrystal semiconductor se puede ajustar a través o bien de un autodopaje estequiométrico o bien de un dopaje extrínseco por medio de elementos foráneos. Durante la síntesis de los nanocristales puede aparecer involuntariamente un desequilibrio estequiométrico, o el mismo se puede introducir de manera intencionada durante o después de la síntesis. El nivel de dopaje de los nanocristales semiconductores también se puede precisar mediante intercambio aniónico o catiónico u otras reacciones redox. Por ejemplo, un intercambio aniónico en nanocristales de PbS a través de reacciones redox con halógenos conduce a un mayor dopaje de tipo n.

Las propiedades eléctricas de los nanocristales semiconductores coloidales también dependen, en gran medida, de sus ligandos estabilizadores (del inglés, *capping*), que proporcionan un acoplamiento eléctrico de nanopartículas adyacentes y pueden presentar un momento dipolar superficial en el nanocrystal. Los ligandos pueden influir en la energética de los nanocristales semiconductores, incluidos sus niveles de la banda de valencia y de conducción y el nivel de Fermi, de manera que difieren significativamente con respecto a las propiedades del material semiconductor en volumen, correspondiente. En otras palabras, cuando un conjunto de material semiconductor comprende nanocristales, las propiedades eléctricas de este conjunto vienen determinadas tanto por el material de los propios nanocristales como por los ligandos estabilizadores en la superficie de los nanocristales. Para ajustar la función de trabajo de un conjunto de nanocristales semiconductores se puede usar la química de los ligandos.

La figura 1d ilustra el diagrama de bandas de energía en la interfase de grafeno/semiconductor en un transistor de efecto de campo sensible ejemplificativo que comprende un apilamiento en tándem en la capa semiconductor. Entre una capa de grafeno 12 con una función de trabajo elevada y un segundo conjunto de material semiconductor 112 se interpone un primer conjunto de material semiconductor 111. El conjunto 111 y el conjunto 112 están unidos por la interfase en la coordenada y_2 . Si la función de trabajo del segundo material semiconductor del segundo

conjunto 112 es menor que la función de trabajo del material semiconductor del primer conjunto del material semiconductor 111, los niveles de energía de la banda de valencia y de conducción se desplazarán hacia abajo en ambos conjuntos 111 y 112, como se ilustra en la figura 1d. La conductividad de la capa de grafeno 12 es modulada por huecos 16 donados desde la capa semiconductor 11.

El número de conjuntos en la capa semiconductor puede ser superior a dos. El primer conjunto 111 está en contacto con el canal del transistor, y el material semiconductor del primer conjunto tiene una función de trabajo más elevada que los materiales semiconductores de los conjuntos adicionales (112 y otros conjuntos posibles). A continuación, los conjuntos adicionales de materiales semiconductores se colocan en el apilamiento en orden de función de trabajo decreciente, de manera que la función de trabajo de un conjunto que está más alejado de la interfase 11/12 es menor que la función de trabajo de un conjunto que está más cerca de la interfase 11/12.

Cuando los conjuntos se apilan verticalmente en el canal de transistor 12 en orden de función de trabajo decreciente, el doblamiento de la banda en la capa semiconductor crea un campo eléctrico incorporado que transporta huecos hacia el canal de grafeno. Incluso una pequeña diferencia en la función de trabajo, por ejemplo 0.1 eV, entre materiales semiconductores en cualesquiera conjuntos adyacentes es suficiente para generar un campo eléctrico incorporado. No obstante, pueden resultar preferibles diferencias mayores si el número de conjuntos es dos o tres.

Como se ilustra en la figura 1d, la banda prohibida del material semiconductor del primer conjunto 111 puede ser menor que la banda prohibida de los materiales semiconductores del segundo conjunto 112. En algunos casos, además de apilarse en un orden vertical en orden de función de trabajo decreciente o creciente, los conjuntos de material semiconductor se pueden apilar simultáneamente en orden de banda prohibida creciente. En otras palabras, el conjunto en el que el material semiconductor tiene la función de trabajo mayor también puede ser el conjunto en el que el material semiconductor tiene la banda prohibida más pequeña, y viceversa.

No obstante, una ordenación simultánea acorde a la banda prohibida no siempre es necesaria y puede no ser siempre posible. Sin embargo, puede generarse un campo eléctrico incorporado en la capa semiconductor incluso si las bandas prohibidas están en orden inverso, decreciente con la distancia en relación con la interfase 11/12, o en cualquier orden aleatorio. La figura 1e ilustra esquemáticamente una situación en la que la banda prohibida del material semiconductor en el primer conjunto 111 es mayor que la banda prohibida del material semiconductor del segundo conjunto 112. Puede observarse que la diferencia requerida de la función de trabajo (para generar el campo eléctrico incorporado) es mayor cuando las bandas prohibidas están ordenadas de esta manera, aunque puede obtenerse, sin embargo, el mismo efecto.

La figura 1f ilustra, esquemáticamente, una configuración alternativa en la que la función de trabajo del material 12 del canal es relativamente baja, y la función de trabajo del segundo material semiconductor del segundo conjunto 112 es mayor que la función de trabajo del material semiconductor del primer conjunto de material semiconductor 111. A continuación, los niveles de energía de la banda de valencia y de conducción se desplazan hacia arriba en ambos conjuntos 111 y 112, tal como se ilustra en la figura 1f. La conductividad de la capa de canal bidimensional 12 se modula mediante unos electrones 15 donados desde la capa semiconductor 11.

Como se ha mencionado anteriormente, el número de capas se puede incrementar, opcionalmente, de manera que, dentro de la capa semiconductor 11, se preparen uno o más conjuntos adicionales (no ilustrados) que comprenden un tercer material semiconductor, por ejemplo a la derecha del segundo conjunto 112 de las figuras 1d-1f. Si, a las estructuras de las figuras 1d y 1e, se les añade un conjunto adicional de material semiconductor, el material semiconductor de este conjunto adicional debe tener una función de trabajo menor que el material semiconductor del segundo conjunto 112. Si, a la estructura de la figura 1f, se le añade un conjunto adicional de material semiconductor, el material semiconductor de este conjunto adicional debe tener una función de trabajo mayor que el material semiconductor del segundo conjunto 112.

Al apilamiento de la capa semiconductor 11, se le pueden añadir otros conjuntos de material semiconductor, según se requiera. Siempre que los conjuntos de material semiconductor se apilen verticalmente en el canal del transistor ya sea en un orden de función de trabajo decreciente (figura 1d) o en un orden de función de trabajo creciente (figura 1f), el campo eléctrico se extenderá a través del primer conjunto 111, del conjunto adicional 112 y de todos los conjuntos adicionales preparados a la derecha de 112, sin barreras para el transporte de huecos en la banda de valencia o para el transporte de electrones en la banda de conducción, respectivamente.

La dirección de doblamiento de las bandas (hacia arriba o hacia abajo en función de y en el diagrama de bandas de energía) depende de las funciones de trabajo de los materiales semiconductores de los conjuntos apilados, aunque también de las propiedades del material bidimensional que forma el canal del transistor. Además, la dirección y el grado de doblamiento de la banda también se puede precisar modulando el nivel de Fermi en la capa de canal del transistor con un control de puerta de efecto de campo a través de uno o más electrodos de puerta. Ciertos materiales bidimensionales, tales como el grafeno, se pueden emparejar o bien con una capa semiconductor en la que los conjuntos se apilan en un orden de función de trabajo decreciente, o bien con una capa semiconductor en la que los conjuntos se apilan en un orden de función de trabajo creciente. La

compatibilidad de grafeno con cada opción depende del control de puerta utilizado en el transistor de efecto de campo, y/o de la magnitud y la polaridad del dopaje eléctrico de la capa de grafeno.

5 La capa semiconductor se puede depositar y se puede aplantillar mediante métodos estándar. Los métodos estándares incluyen, aunque sin carácter limitativo, depósito en fase de vapor, depósito basado en soluciones y métodos fotolitográficos estándares.

Primera forma de realización de la capa semiconductor

10 La figura 2 ilustra la interfase entre la capa de canal y la capa semiconductor en una primera forma de realización. Los números de referencia 21 y 22 se corresponden con el 11 y el 12, respectivamente, de las figuras 1a-1f. En la figura 2, la capa semiconductor 21 comprende un primer conjunto 211 de un primer material semiconductor y dos conjuntos adicionales 212 y 213 de materiales semiconductores adicionales. A estos conjuntos adicionales se les puede denominar, respectivamente, segundo y tercer conjuntos.

15 El primer conjunto completo se interpone entre la capa de grafeno 22 y el conjunto adicional 212.

20 Cada uno de los conjuntos de material semiconductor puede comprender puntos cuánticos coloidales o nanocristales semiconductores. La función de trabajo de los nanocristales semiconductores en el segundo conjunto 212 puede ser menor que la función de trabajo de los nanocristales semiconductores del primer conjunto 211, y mayor que la función de trabajo de los nanocristales semiconductores del tercer conjunto 213. En otras palabras, los conjuntos de materiales semiconductores se pueden apilar en un orden de función de trabajo decreciente. Alternativamente, los conjuntos de materiales semiconductores se pueden apilar en el orden inverso, en un orden de función de trabajo creciente.

25 Opcionalmente, ya sea el orden de apilamiento por función de trabajo decreciente o creciente, la banda prohibida de los nanocristales semiconductores del segundo conjunto 212 puede ser mayor que la banda prohibida de los nanocristales semiconductores del primer conjunto 211, y menor que la banda prohibida de los nanocristales semiconductores del tercer conjunto 213.

30 La capa semiconductor 21 puede comprender una primera subcapa 211 que comprende un primer material semiconductor. La primera subcapa se puede depositar en la superficie de una capa de grafeno 22. La capa semiconductor 21 puede comprender, además, una segunda subcapa 212 que comprende un segundo material semiconductor. Esta segunda subcapa 212 se puede depositar en la primera subcapa 211. La capa semiconductor 35 21 puede comprender, además, una tercera subcapa 213 que comprende un tercer material semiconductor. Esta tercera subcapa 213 se puede depositar en la segunda subcapa 212. La capa semiconductor 21 puede comprender otras subcapas con otros materiales semiconductores. Las subcapas se pueden depositar en un orden en el que la función de trabajo del material semiconductor en la primera subcapa 211 sea la mayor, y la función de trabajo de cada subcapa depositada adicional sea menor que la función de trabajo de la subcapa que esté debajo de ella.

40 En otras palabras, cada uno de los dos o más conjuntos de material semiconductor es, en este caso, una capa unitaria. El apilamiento ilustrado de subcapas unitarias 211, 212 y 213 se puede extender sobre el área horizontal completa de la interfase entre la capa semiconductor 21 y el canal de transistor 22. Alternativamente, el apilamiento de subcapas unitarias puede cubrir solamente una primera parte del área horizontal de la interfase entre la capa semiconductor 21 y el canal de transistor 22, y la capa semiconductor puede comprender conjuntos de materiales semiconductores que se apilan en otro orden, o que estén desordenados, en una segunda parte del área horizontal de la interfase entre la capa semiconductor 21 y el canal de transistor 22.

45 La figura 3 ilustra una configuración en la que la capa semiconductor 31 comprende una combinación entremezclada de nanocristales semiconductores con diferentes propiedades ópticas y eléctricas, junto al canal de transistor 32. Los números de referencia 31 y 32 se corresponden con el 11 y el 12, respectivamente, de las figuras 1a-1d. En este caso, el primer conjunto 311a es una subcapa unitaria que cubre solamente una parte de la interfase 50 31/32, y el segundo conjunto 312a y el tercer conjunto 313a pueden ser subcapas unitarias adyacentes al primer conjunto. Otras partes de la capa semiconductor tienen un desorden mayor o menor. No obstante, el campo eléctrico incorporado se generará, en este caso, únicamente en el área en el que está presente el primer conjunto 311a, y la magnitud del efecto multiplicativo de la carga será proporcional solamente a esta área.

55 En cualquiera de entre la primera, la segunda y la tercera formas de realización de la capa semiconductor, se puede usar el mismo material para fabricar partículas de nanocristales semiconductores de tamaño diferente. Por lo tanto, aun cuando las propiedades eléctricas de los diferentes conjuntos de material semiconductor pueden diferir entre sí, el material semiconductor de las partículas de nanocristales semiconductores puede seguir siendo el mismo en cada conjunto. El material también puede ser diferente en cada conjunto.

60 Cualquiera de los conjuntos de material semiconductor puede comprender puntos cuánticos coloidales o nanocristales semiconductores seleccionados del grupo: PbS, PbSe, PbTe, CdS, CdSe, CdTe, ZnS, ZnO, CuS,

Cu₂S, Cu₂Se, CZTS, MnS, Bi₂S₃, Ag₂S, Ag₂Se, HgTe, HgCdTe, GaSe, MoS₂, CIS, InAs, InSb, Ge, Si, grafeno, o nanocristales de tipo núcleo/envoltura con cualquiera de los constituyentes de núcleo/envoltura anteriores.

5 Alternativamente, cualquiera de los conjuntos de material semiconductor puede comprender cualquiera de los anteriores puntos cuánticos coloidales o nanocristales semiconductores incrustados en un material hospedante que comprende calcogenuro metálico, haluro metálico o perovskita híbrida de haluro. El calcogenuro metálico puede tener la fórmula general ME_n, donde E es S, Se o Te, y puede ser, por ejemplo, AsS_x, CdS, CdSe, CdTe, CuInS₂, SnS_x, In₂Se o Bi₂Te₃. El haluro metálico puede tener la fórmula general MX_n, donde M es Pb, Bi, Cd, In, Zn, Sn, Cu, Fe, Ga, Li o Sb y X es I, Br o Cl, y puede ser, por ejemplo, PbI₂ o BiI₃. La perovskita híbrida de haluro puede tener la fórmula general ABX₃, donde A es Cs, CH₃NH₃ o NH₂CH=NH₂, B es Pb o Sn, y X es Cl, Br o I.

10 La carga de puntos cuánticos en el material hospedante puede variar entre el 1% y el 90%. El diámetro de los puntos cuánticos o nanocristales semiconductores puede estar en el intervalo 2 – 20 nm.

15 Los ligandos estabilizadores de los materiales semiconductores anteriores pueden comprender moléculas orgánicas o moléculas inorgánicas, o una combinación de ambas. Los ligandos orgánicos pueden incluir, aunque sin carácter limitativo, tioles alquílicos o arílicos, tales como 1,2-etanoditiol, ácido 3-mercaptopropiónico, bencenotiol, etcétera. Los ligandos orgánicos también pueden incluir alquilaminas o arilaminas, N-heterociclos, tales como 1,2-etilendiamina, piridina, etcétera. Los ligandos inorgánicos pueden incluir halógenos atómicos (I, Br, Cl), pseudohalógenos (SCN) o calcógenos (S, Se). Los ligandos inorgánicos también pueden incluir haluros metálicos o calcogenuros metálicos.

25 El canal de transistor 22 puede comprender una capa de grafeno, según se ha descrito anteriormente. El canal de transistor 22 también puede comprender uno o más de un material de tipo grafeno, un dicalcogenuro de metal de transición u otro material bidimensional. El material de tipo grafeno puede incluir fosforeno, siliceno, germaneno, estano, GaN, InN, InP, InAs, BAs, BP o GaP. El dicalcogenuro de metal de transición puede incluir WE₂, MoE₂, ScE₂, TiE₂, HfE₂, ZrE₂, VE₂, CrE₂, MnE₂, FeE₂, CoE₂, NiE₂, NbE₂, TcE₂, ReE₂, PdE₂ o PtE₂, donde E es O, S, Se o Te.

30 En la tercera forma de realización de la capa semiconductor que se describe a continuación, también se pueden usar los mismos materiales para los puntos cuánticos coloidales o nanocristales semiconductores, los mismos materiales hospedantes y los mismos materiales de los ligandos.

35 En cualquiera de entre la primera, la segunda y la tercera formas de realización de la capa semiconductor, el orden de apilamiento ilustrado en la figura 2 se puede implementar en la configuración ilustrada en la figura 1a y en la configuración ilustrada en la figura 1b. En otras palabras, el eje e indicado en la figura 2 puede apuntar hacia arriba en la figura 1a o hacia abajo en la figura 1b.

40 En cualquiera de entre la primera, la segunda y la tercera formas de realización de la capa semiconductor, el número de conjuntos estratificados 211, 212, 213 ... de material semiconductor puede ser superior a tres. Por ejemplo, si la capa semiconductor 21 se prepara en un método en el que, durante el proceso de depósito, se centrifuga una mezcla de nanocristales semiconductores de tamaños diferentes, los mismos se pueden depositar sobre el canal de transistor 12 en un orden controlado. Los nanocristales semiconductores más grandes y más pesados se pueden pegar al canal de transistor en primer lugar, y en último lugar los más ligeros y más pequeños. Si la mezcla inicial contiene nanocristales semiconductores de muchos tamaños diferentes, y la función de trabajo se ha diseñado de manera que varíe en función del tamaño, este método puede producir una capa semiconductor 21 en la que la función de trabajo (y, posiblemente, también la banda prohibida) presente un gradiente casi continuo en la dirección y. Cada conjunto de material semiconductor puede formar una monocapa, y la capa semiconductor 21 puede comprender un apilamiento ordenado de monocapas, con propiedades eléctricas (y, posiblemente, ópticas) diferentes en cada monocapa.

50 Por motivos de claridad, la capa de grafeno 22, el primer conjunto de material semiconductor 211 y los conjuntos adicionales 212 y 213 de material semiconductor se han dibujado, todos ellos, aproximadamente con el mismo grosor en la dirección y en la figura 2. No obstante, en la práctica, la capa de grafeno 22 será mucho más delgada que la capa semiconductor 21, y, posiblemente, también más delgada que cualquier subcapa 211, 212 o 213. Además, el grosor de los diferentes conjuntos 211, 212 y 213 se puede optimizar en función de las bandas prohibidas de los materiales semiconductores y del intervalo de longitudes de onda que se va a detectar. Si las longitudes de onda largas del infrarrojo son el intervalo principal de interés, y si el conjunto 211 comprende el material semiconductor con la banda prohibida más pequeña, entonces este conjunto puede constituir el 50%-90% del grosor de la capa semiconductor 21. Las mismas consideraciones referentes a los grosores de capa se aplican también a la segunda y la tercera formas de realización de la capa semiconductor.

65 La función de trabajo de material semiconductor en el primer conjunto puede ser, por ejemplo, 4-6 eV. Su banda prohibida puede ser de 0.1 - 1.0 eV. Las funciones de trabajo de los materiales semiconductores en el segundo, el tercero o cualquier conjunto sucesivo pueden ser, por ejemplo, 3 - 5 eV. Sus bandas prohibidas pueden ser de 0.8 - 3.0 eV. Estas mismas consideraciones referentes a los intervalos de la función de trabajo y a los intervalos de la banda prohibida se aplican también a la segunda y la tercera formas de realización de la capa semiconductor.

Segunda forma de realización de la capa semiconductor

La figura 4 ilustra la interfase entre la capa de grafeno y la capa semiconductor en una segunda forma de realización. Los números de referencia 41 y 42 se corresponden con el 11 y el 12, respectivamente, de las figuras 1a a 1e. En la figura 4, la capa semiconductor 41 comprende un primer conjunto 411 de un primer material semiconductor y dos conjuntos adicionales 412 y 413 de materiales semiconductores adicionales. A estos conjuntos adicionales se les puede denominar, respectivamente, segundo y tercer conjuntos. El número de conjuntos adicionales también puede ser superior a dos.

En esta forma de realización, los conjuntos de material semiconductor 411, 412, 413, ... se pueden preparar en el canal de transistor 42 en forma de capas semiconductoras de película delgada. En otras palabras, cada uno de los conjuntos de material semiconductor puede comprender una capa semiconductor de película delgada. Este material de película delgada no está compuesto por nanopartículas, sino que puede tener una estructura o bien cristalina o bien amorfa. Dichas películas delgadas se pueden depositar secuencialmente, por ejemplo, en el canal de transistor 42 en un proceso de deposición química en fase de vapor (CVD) o de deposición de capa atómica (ALD) y se pueden dopar con procesos estándares. Las capas semiconductoras de película delgada pueden comprender un material seleccionado del grupo: PbS, PbSe, PbTe, CdS, CdSe, CdTe, ZnS, ZnO, CuS, Cu₂S, Cu₂Se, CZTS, MnS, Bi₂S₃, Ag₂S, Ag₂Se, HgTe, HgCdTe, GaSe, MoS₂, CIS, InAs, InSb, Ge, o Si.

Cualquiera de estos materiales semiconductores de película delgada se puede usar también en la tercera forma de realización de la capa semiconductor que se presenta a continuación.

Tercera forma de realización de la capa semiconductor

La figura 5 ilustra la interfase entre la capa de grafeno y la capa semiconductor en una tercera forma de realización. Los números de referencia 51 y 52 se corresponden con el 11 y el 12, respectivamente, de las figuras 1a - 1e. En la figura 5, la capa semiconductor 51 comprende un primer conjunto 511 de un primer material semiconductor y dos conjuntos adicionales 512 y 513 de materiales semiconductores adicionales. A estos conjuntos adicionales se les puede denominar, respectivamente, segundo y tercer conjuntos. Igual que antes, el número de conjuntos adicionales también puede ser superior a dos.

El conjunto de material semiconductor que está en contacto con el canal del transistor comprende una capa semiconductor de película delgada, y los conjuntos adicionales de material semiconductor comprenden puntos cuánticos coloidales o nanocristales semiconductores.

En esta forma de realización, el primer conjunto de material semiconductor 511 se puede preparar en el canal de transistor 52 en forma de una capa semiconductor de película delgada. Los materiales usados para preparar el primer conjunto 511 pueden comprender cualquiera de los materiales de capa semiconductor de película delgada especificados en la segunda forma de realización de la capa semiconductor anterior. La capa de película delgada semiconductor se puede depositar, por ejemplo, en el canal de transistor 52 en un proceso de CVD o ALD y se puede dopar con procesos estándares.

Los conjuntos adicionales de materiales semiconductores 512 y 513 pueden comprender nanocristales semiconductores formados con cualquiera de los materiales para nanocristales semiconductores especificados en la primera forma de realización de la capa semiconductor anterior.

Primera forma de realización del dispositivo transistor

Las figuras 6a - 6c ilustran transistores de efecto de campo fotosensibles según una primera forma de realización del dispositivo. Las capas del dispositivo no se han dibujado a escala. En los dispositivos ilustrados en las figuras 6a - 6c, la capa de grafeno 62 y la capa semiconductor 61 se han depositado en el orden ilustrado en la figura 1a, con la capa semiconductor 61 encima de la capa de grafeno 62.

La figura 6a ilustra un transistor en el que la capa semiconductor 61 cubre por lo menos parcialmente la capa de material bidimensional 62, la capa de material bidimensional 62 cubre una primera capa aislante 65 y la primera capa aislante 65 cubre un primer electrodo de puerta 643.

En esta divulgación, el verbo "cubrir" se refiere a un alineamiento vertical con contacto directo. Cuando una primera capa "cubre" una segunda capa, la primera capa y la segunda capa están alineadas verticalmente y están en contacto directo mutuo. En otras palabras, las dos capas se han depositado secuencialmente en un área dada del sustrato. Están alineadas verticalmente ya que la segunda capa se ha depositado en esta área en primer lugar, y, a continuación, la primera capa se ha depositado en la misma área. Dentro de esta área, la segunda capa está situada, por lo tanto, por debajo de la primera capa en la dirección vertical. La primera capa "cubre" la segunda capa en esta área ya que no hay situada ninguna otra capa entre la primera y la segunda capas.

El verbo “cubrir”, cuando se usa sin ningún otro calificativo, se refiere a una alineación vertical completa en la que no hay ninguna área de la segunda capa que no esté cubierta por la primera capa. Expresiones con una calificación cerrada, tales como “cubrir parcialmente”, se usan para referirse a un alineamiento vertical parcial, en el que hay un área de la segunda capa que no está cubierta por la primera capa. Expresiones con calificación abierta, tales como “cubrir al menos parcialmente”, se usan para referirse a un alineamiento vertical que puede ser o bien completo o bien parcial.

El transistor de efecto de campo fotosensible comprende, en la superficie del sustrato 63, un primer electrodo de fuente 6411, que está cubierto al menos parcialmente por la capa de grafeno 62, y un primer electrodo de drenador 6421 que también está cubierto al menos parcialmente por la capa de grafeno 62. El transistor comprende, también, un segundo electrodo de fuente 6412, que cubre parcialmente la capa de grafeno y se superpone al menos parcialmente con respecto al primer electrodo de fuente 6411, y un segundo electrodo de drenador 6422, que cubre parcialmente la capa de grafeno y se superpone al menos parcialmente con respecto al primer electrodo de drenador 6421. En todos los dispositivos de transistor presentados en esta divulgación, el contacto eléctrico con la capa de grafeno se puede realizar o bien con un electrodo inferior, tal como el 6411 y el 6421 o bien con un electrodo superior, tal como el 6412 y el 6422, o tanto con un electrodo inferior como con un electrodo superior.

El electrodo de puerta del transistor de efecto de campo puede comprender el primer electrodo 643 en la superficie del sustrato, y, en ese caso, se puede depositar una capa aislante 65 en el electrodo de puerta para separarlo con respecto a la capa de grafeno 62 que forma el canal del transistor. La misma capa aislante 65 puede aislar entre sí los electrodos en la superficie del sustrato, como se ilustra en la figura 6a.

La capa de grafeno 62 forma el canal del transistor que está en contacto con el(los) electrodo(s) de fuente 6411/6412 y con el(los) electrodo(s) de drenador 6421/6422. La capa de grafeno se puede depositar en la capa aislante 65, como se ilustra en la figura 6a. A continuación, la capa semiconductor 61 (que incluye todos los conjuntos y subcapas que se pueden incluir en la capa semiconductor) se puede depositar sobre la capa de grafeno 62.

En la figura 6b, se ilustra una configuración alternativa. En esta configuración, un segundo electrodo de puerta 644 cubre al menos parcialmente una segunda capa aislante 654. La segunda capa aislante cubre al menos parcialmente la capa semiconductor 61, y la capa semiconductor 61 cubre al menos parcialmente la capa de material bidimensional 62. Este dispositivo comprende, también, un primer electrodo de puerta 643 en la superficie del sustrato, separado con respecto a la capa de material bidimensional 62 por una primera capa aislante 653. A la configuración ilustrada en la figura 6a se le puede denominar configuración de puerta inferior, y a la configuración ilustrada en la figura 6b se le puede denominar configuración de puerta superior o inferior.

En la figura 6c, se ilustra una tercera alternativa, que utiliza una puerta inferior 643 y un electrodo superior 644. En esta configuración, la capa semiconductor 61 cubre al menos parcialmente la capa de material bidimensional 62, la capa de material bidimensional 62 cubre una capa aislante 65 y la capa aislante cubre un primer electrodo de puerta 643. Adicionalmente, el electrodo superior 644 cubre al menos parcialmente la capa semiconductor. En esta configuración, y también en la configuración ilustrada en la figura 6b, el primer y el segundo electrodos de puerta 643 y 644 se pueden usar para formar un campo eléctrico externo sobre la capa semiconductor 61 y la capa de grafeno 62, lo cual puede hacer que mejore adicionalmente la separación de cargas en la interfase entre estas dos capas.

Segunda forma de realización del dispositivo transistor

Las figuras 7a-7c ilustran unos transistores de efecto de campo fotosensibles de acuerdo con una segunda forma de realización del dispositivo. Las capas del dispositivo no se han dibujado a escala. En los dispositivos ilustrados en las figuras 7a-7c, la capa de grafeno 72 y la capa semiconductor 71 se han depositado en el orden ilustrado en la figura 1c, con la capa de grafeno 72 encima de la capa semiconductor 71. Los números de referencia 71, 72, 73, 741, 742 y 743 se corresponden con los números de referencia 61, 62, 63, 641, 642 y 643 de las figuras 6a-6c.

La figura 7a ilustra un transistor en el que la capa de material bidimensional 72 cubre la capa semiconductor 71, y la capa semiconductor cubre al menos parcialmente un electrodo inferior 743. En otras palabras, en esta configuración, el primer electrodo de puerta 743 está separado con respecto a la capa de grafeno 72 por la capa semiconductor 71. El primer electrodo de puerta 743 y la capa semiconductor 71 pueden estar flanqueados, en ambos lados, por capas aislantes 751 y 752 que los separan con respecto a los electrodos de fuente y drenador 741 y 742 y que proporcionan una superficie superior de nivelación sobre la que puede extenderse el canal de transistor 72 desde el electrodo de fuente 741 al electrodo de puerta 742. En todos los dispositivos ilustrados en las figuras 6a-6c y 7a-7c, sobre sus elementos ilustrados del dispositivo se pueden depositar capas protectoras adicionales.

La figura 7b ilustra un transistor en el que el electrodo de puerta 744 cubre por lo menos parcialmente una capa aislante 753, la capa aislante 753 cubre al menos parcialmente la capa de material bidimensional 72 y la capa de

material bidimensional cubre parcialmente la capa semiconductor 71.

5 En otras palabras, en esta configuración de puerta superior, las capas aislantes 751 y 752 separan la capa semiconductor 71 con respecto a los electrodos de fuente y drenador 741 y 742. En la capa de grafeno 72 se ha depositado otra capa aislante 753 para separar el segundo electrodo de puerta 744 con respecto a la capa de grafeno 72.

10 La figura 7c ilustra un transistor de efecto de campo en el que la capa de material bidimensional 72 cubre la capa semiconductor 71 y la capa semiconductor 71 cubre al menos parcialmente un electrodo inferior 743. Adicionalmente, una capa aislante 753 cubre al menos parcialmente la capa de material bidimensional 72, y un electrodo de puerta 72 cubre al menos parcialmente la capa aislante 753.

Ejemplo práctico

15 Para ilustrar la invención reivindicada, se fabricó una estructura correspondiente a la figura 6 depositando una capa semiconductor que comprendía puntos cuánticos de PbS en un canal de grafeno utilizando una técnica de recubrimiento por rotación. La capa de puntos cuánticos se aplantilló por medio de fotolitografía y *lift-off*. El intercambio de ligandos se llevó a cabo usando ligandos de ácido 3-mercaptopropiónico (MPA) en la modalidad de estado sólido.

20 En un primer ejemplo, la capa semiconductor comprendía solamente un conjunto que comprendía puntos cuánticos de PbS con una banda prohibida de 0.7 eV y una función de trabajo de 4.7 eV. En la figura 8a se ilustra la característica de transferencia de este transistor de efecto de campo fotosensible.

25 En un segundo ejemplo, la capa semiconductor comprendía dos conjuntos. El primer conjunto depositado en el canal de grafeno comprendía puntos cuánticos de PbS con una banda prohibida de 0.7 eV y una función de trabajo de 4.7 eV. El segundo conjunto, depositado en el primer conjunto, comprendía puntos cuánticos de PbS con una banda prohibida de 1.3 de eV y una función de trabajo de 4.2 eV. En la figura 8b, se ilustra la característica de transferencia de este transistor de efecto de campo fotosensible.

30 Ambos transistores de efecto de campo fotosensibles de ejemplo mencionados tenían un área de 30 μm x 30 μm y ambos se polarizaron con un voltaje de -0.1 eV. Se realizó un barrido del voltaje de puerta desde - 5 V a + 5 V en condiciones de iluminación y oscuridad. En la figura 8a y 8b se ilustran fotorrespuestas registradas para una iluminación con longitud de onda de 520 nm ($1.1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$). A partir de las figuras 8a y 8b, puede observarse que la absorbente en tándem, que tiene, en sentido vertical, una banda prohibida creciente y una función de trabajo decreciente, da como resultado un mayor desplazamiento de la curva de transferencia de grafeno bajo iluminación. Esto indica que se produce un efecto más intenso de control de puerta por luz que conduce a mayores corrientes generadas por luz en el canal del transistor. De este modo, se puede esperar una mayor sensibilidad del fototransistor acoplado con la estructura en tándem, en el que la capa semiconductor comprende conjuntos apilados en un orden de función de trabajo decreciente.

35

40

REIVINDICACIONES

- 5 1. Transistor de efecto de campo fotosensible configurado para proporcionar una respuesta eléctrica cuando es iluminado por radiación electromagnética (14) que incide en el transistor, en el que el transistor de efecto de campo fotosensible comprende:
- por lo menos un electrodo de fuente (6411, 6412, 741) eléctricamente conductor y por lo menos un electrodo de drenador (6421, 6422, 742) eléctricamente conductor,
 - 10 - una capa de material bidimensional (12, 22, 32, 42, 52, 62, 72) que forma un canal de transistor horizontal y está en contacto con el electrodo de fuente y con el electrodo de drenador y configurada para transportar corriente entre dicho por lo menos un electrodo de fuente y dicho por lo menos un electrodo de drenador,
 - 15 - por lo menos un electrodo de puerta (643, 744) eléctricamente conductor que se superpone o subyace con respecto a la capa de material bidimensional,
 - una capa semiconductor horizontal (11, 21, 31, 41, 51, 61, 71) en contacto con el canal del transistor, que puede estar configurada para donar portadores de carga al canal del transistor cuando la radiación electromagnética es absorbida en la capa semiconductor, comprendiendo la capa semiconductor dos o
 - 20 más conjuntos de materiales semiconductores,
- caracterizado por que el material bidimensional en el canal del transistor tiene una función de trabajo que es superior a 4 eV, y los conjuntos de material semiconductor están apilados verticalmente sobre el canal del transistor en un orden de función de trabajo decreciente.
- 25 2. Transistor de efecto de campo fotosensible configurado para proporcionar una respuesta eléctrica cuando es iluminado por radiación electromagnética (14) que incide en el transistor, en el que el transistor de efecto de campo fotosensible comprende:
- 30 - por lo menos un electrodo de fuente (6411, 6412, 741) eléctricamente conductor y por lo menos un electrodo de drenador (6421, 6422, 742) eléctricamente conductor,
 - una capa de material bidimensional (12, 22, 32, 42, 52, 62, 72) que forma un canal de transistor horizontal y está en contacto con el electrodo de fuente y con el electrodo de drenador y configurada para transportar corriente entre dicho por lo menos un electrodo de fuente y dicho por lo menos un electrodo de drenador,
 - 35 - por lo menos un electrodo de puerta (643, 744) eléctricamente conductor que se superpone o subyace con respecto a la capa de material bidimensional,
 - 40 - una capa semiconductor horizontal (11, 21, 31, 41, 51, 61, 71) en contacto con el canal del transistor, que puede estar configurada para donar portadores de carga al canal del transistor cuando la radiación electromagnética es absorbida en la capa semiconductor, comprendiendo la capa semiconductor dos o más conjuntos de materiales semiconductores,
- 45 caracterizado por que el material bidimensional en el canal del transistor tiene una función de trabajo que es inferior a 5 eV, y los conjuntos de material semiconductor están apilados verticalmente sobre el canal del transistor en un orden de función de trabajo creciente.
- 50 3. Transistor de efecto de campo fotosensible según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 2, caracterizado por que los conjuntos de material semiconductor están apilados verticalmente sobre el canal del transistor también en un orden de banda prohibida creciente.
4. Transistor de efecto de campo fotosensible según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado por que cada uno de los conjuntos de material semiconductor comprende puntos cuánticos coloidales o nanocristales semiconductores.
- 55 5. Transistor de efecto de campo fotosensible según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado por que el conjunto de material semiconductor que está en contacto con el canal del transistor comprende una capa semiconductor de película delgada, y los conjuntos adicionales de material semiconductor comprende unos puntos cuánticos coloidales o nanocristales semiconductores.
- 60 6. Transistor de efecto de campo fotosensible según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado por que cada uno de los conjuntos de material semiconductor comprende una capa semiconductor de película delgada.
- 65 7. Transistor de efecto de campo fotosensible según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, caracterizado por que la capa semiconductor (61) cubre por lo menos parcialmente la capa de material bidimensional (62), la capa

de material bidimensional cubre una primera capa aislante (65) y la primera capa aislante cubre un primer electrodo de puerta (643).

5 8. Transistor de efecto de campo fotosensible según la reivindicación 7, caracterizado por que un segundo electrodo de puerta (644) cubre por lo menos parcialmente una segunda capa aislante (654), y la segunda capa aislante cubre por lo menos parcialmente la capa semiconductor (61).

10 9. Transistor de efecto de campo fotosensible según la reivindicación 7, caracterizado por que un electrodo superior (644) cubre por lo menos parcialmente la capa semiconductor (61).

10. Transistor de efecto de campo fotosensible según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, caracterizado por que la capa de material bidimensional (72) cubre la capa semiconductor (71).

15 11. Transistor de efecto de campo fotosensible según la reivindicación 10, caracterizado por que la capa semiconductor (71) cubre por lo menos parcialmente un electrodo inferior (743).

20 12. Transistor de efecto de campo fotosensible según la reivindicación 10, caracterizado por que una capa aislante (753) cubre por lo menos parcialmente la capa de material bidimensional (72), y un electrodo de puerta (744) cubre por lo menos parcialmente la capa aislante.

25 13. Transistor de efecto de campo fotosensible según la reivindicación 10, caracterizado por que la capa semiconductor (71) cubre por lo menos parcialmente un electrodo inferior (743), y una capa aislante (753) cubre por lo menos parcialmente la capa de material bidimensional (72), y un electrodo de puerta (744) cubre por lo menos parcialmente la capa aislante.

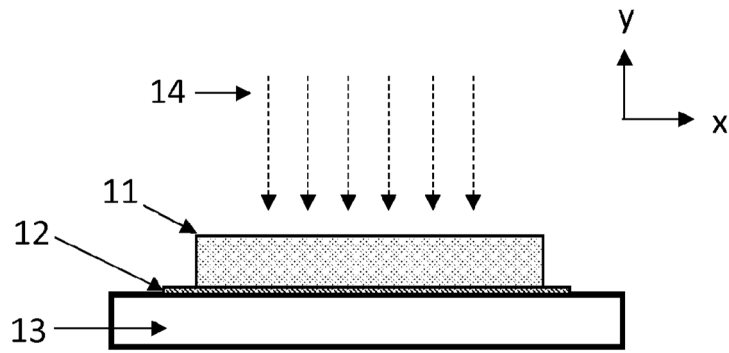


Figura 1a

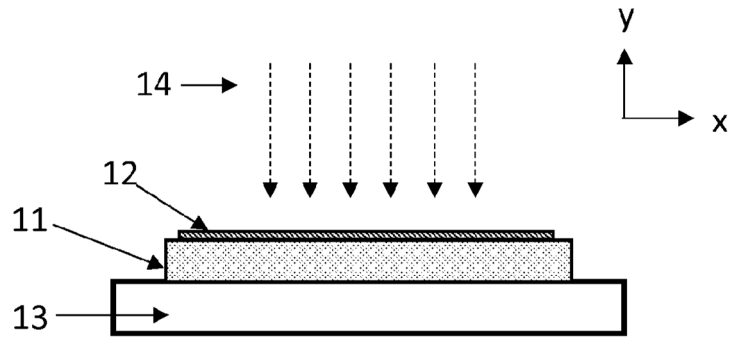


Figura 1b

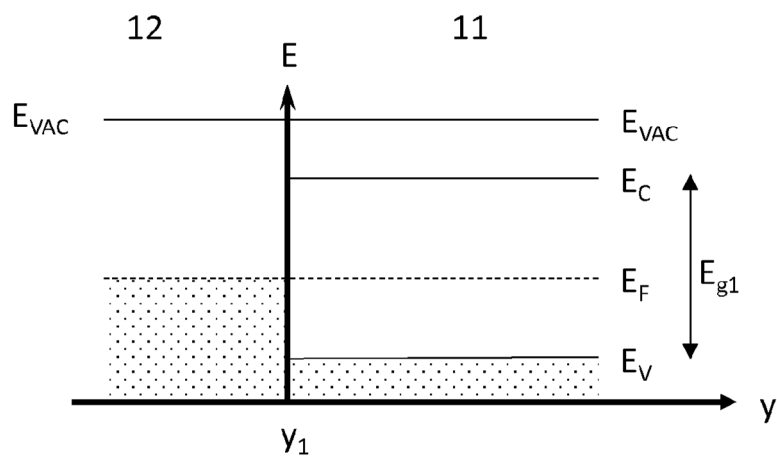


Figura 1c

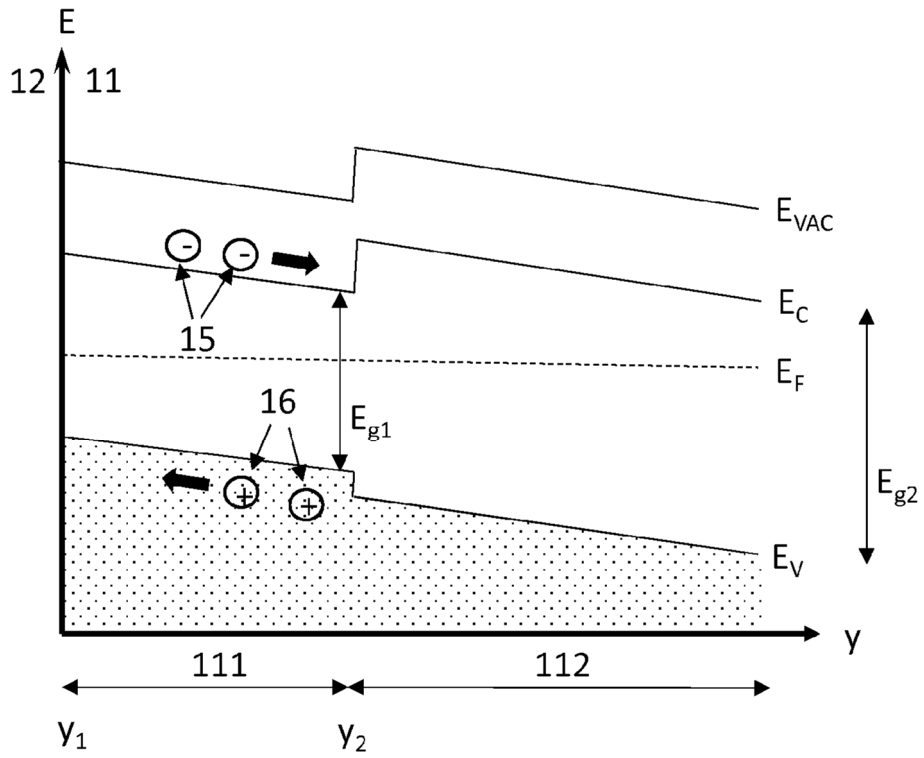


Figura 1d

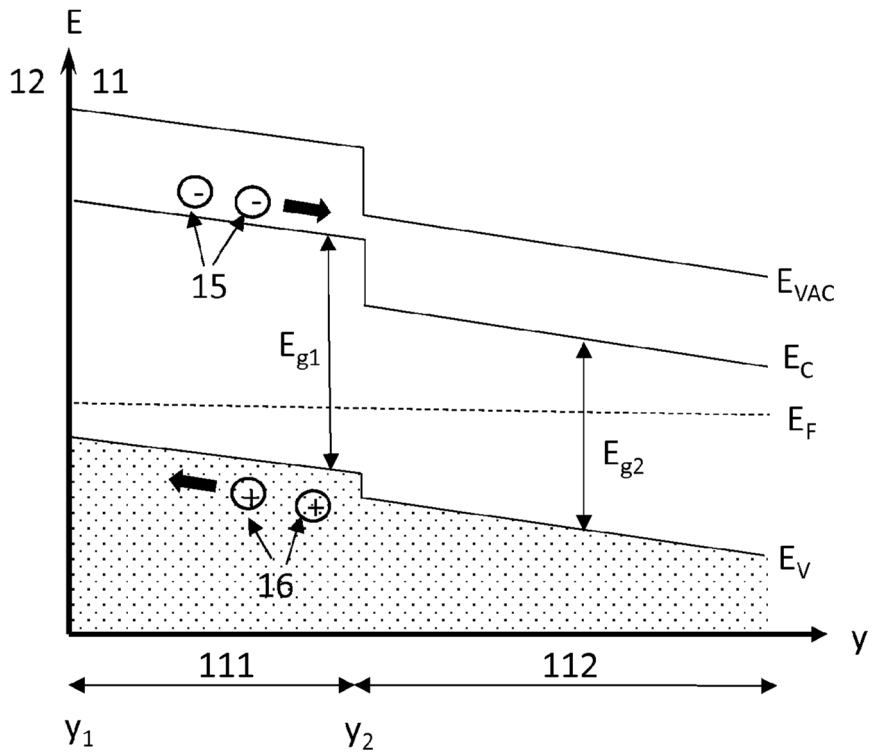


Figura 1e

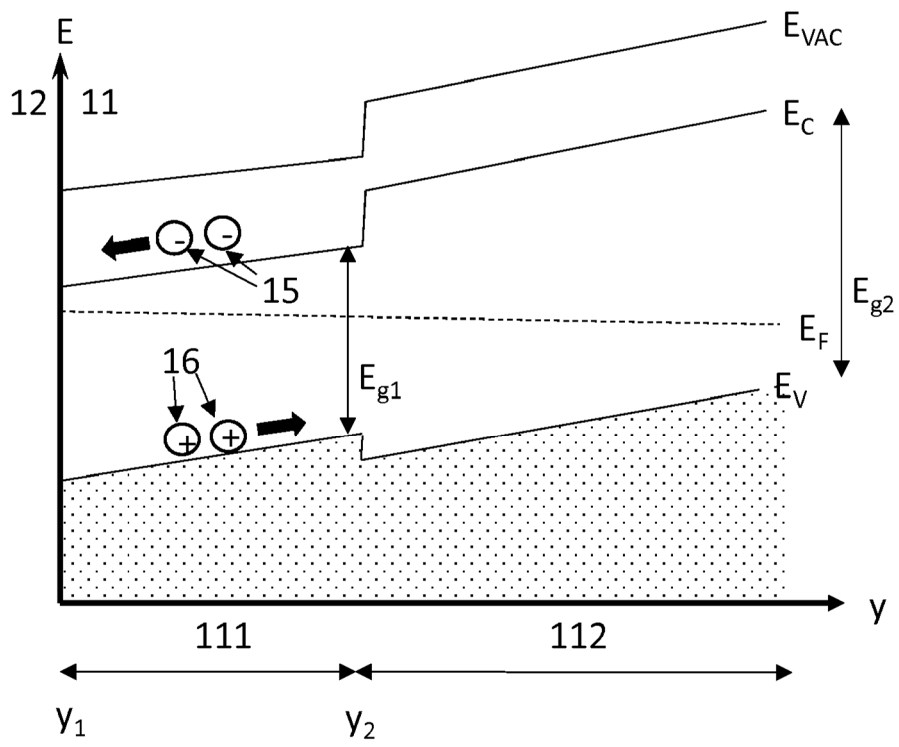


Figura 1f

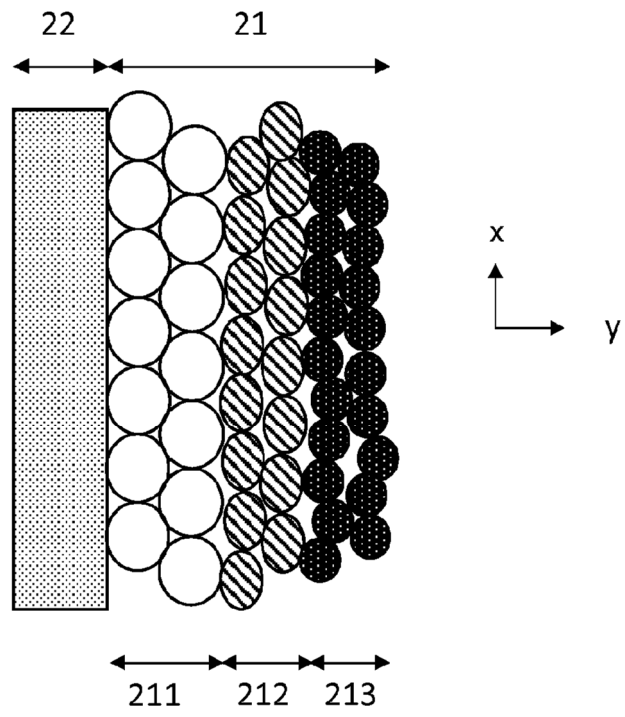


Figura 2

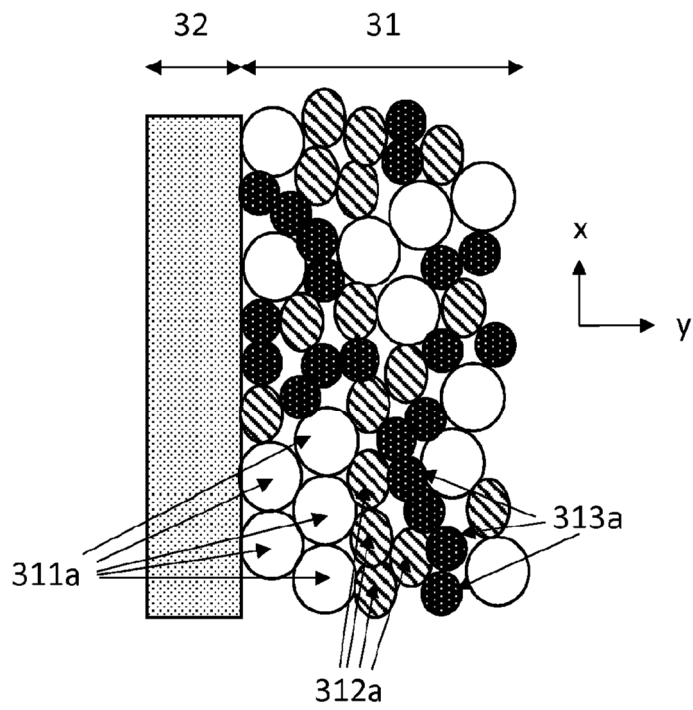


Figura 3

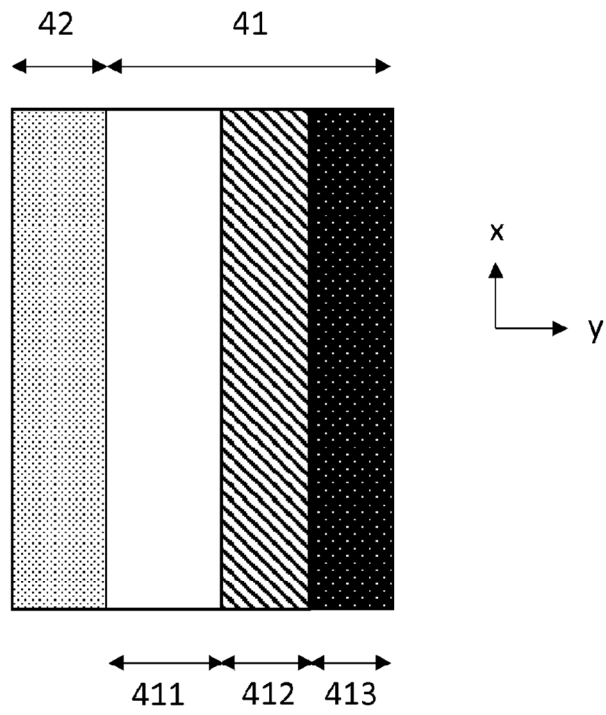


Figura 4

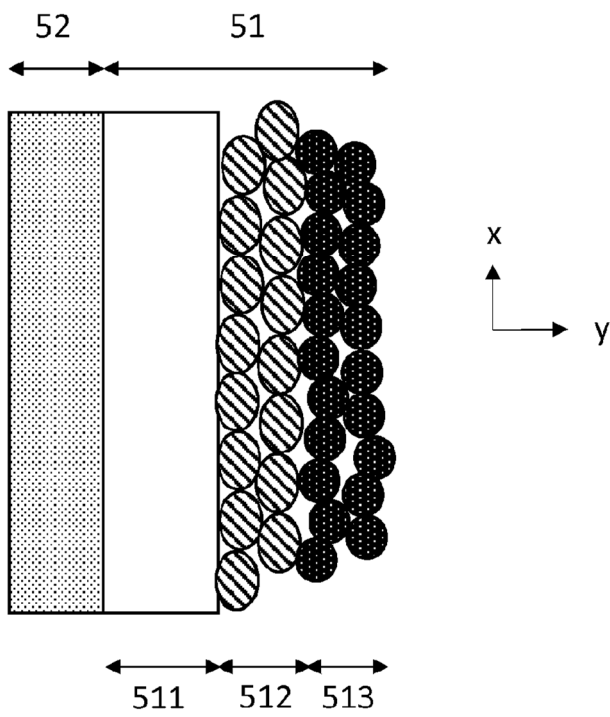


Figura 5

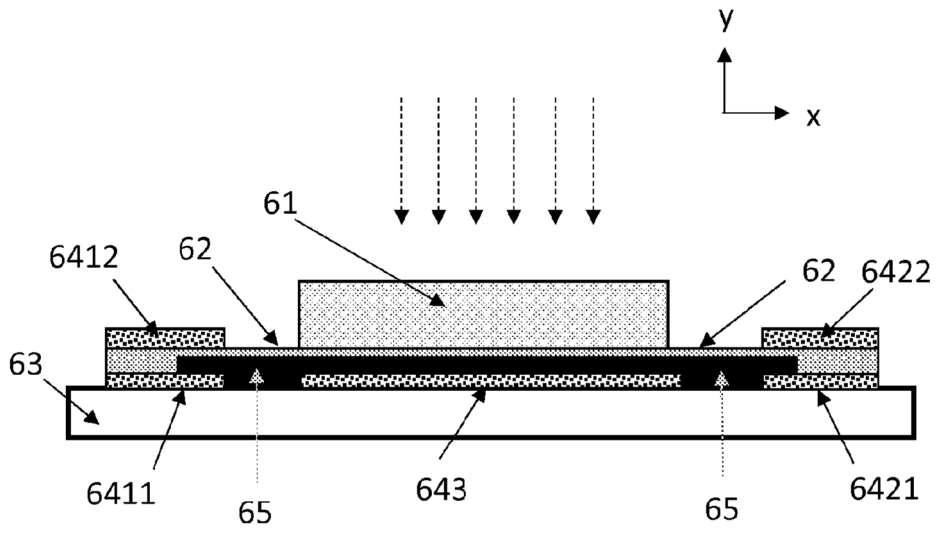


Figura 6a

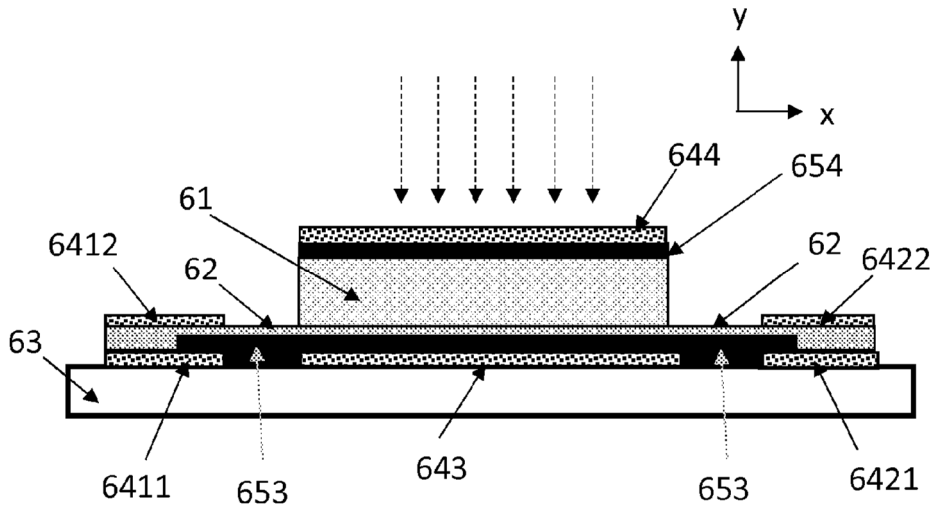


Figura 6b

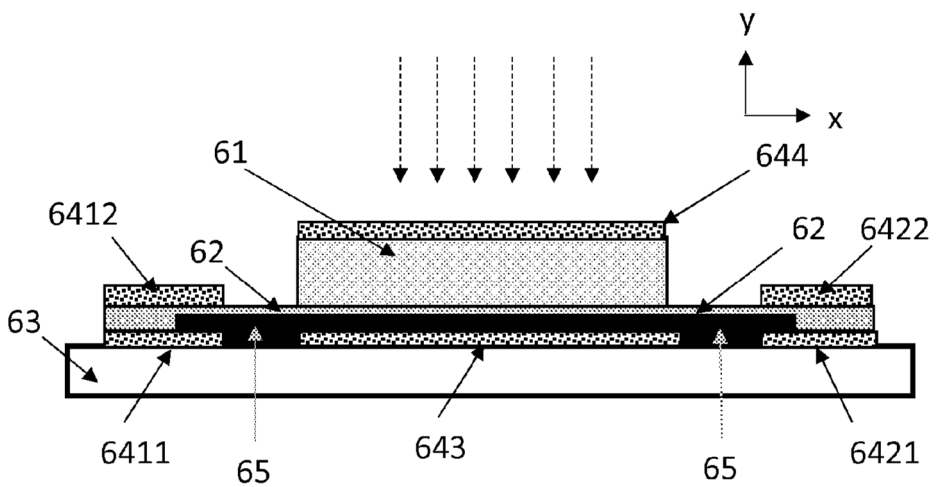


Figura 6c

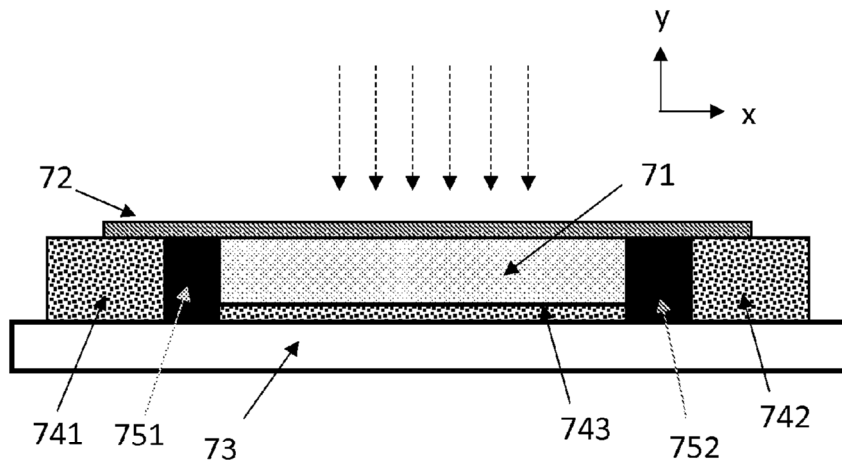


Figura 7a

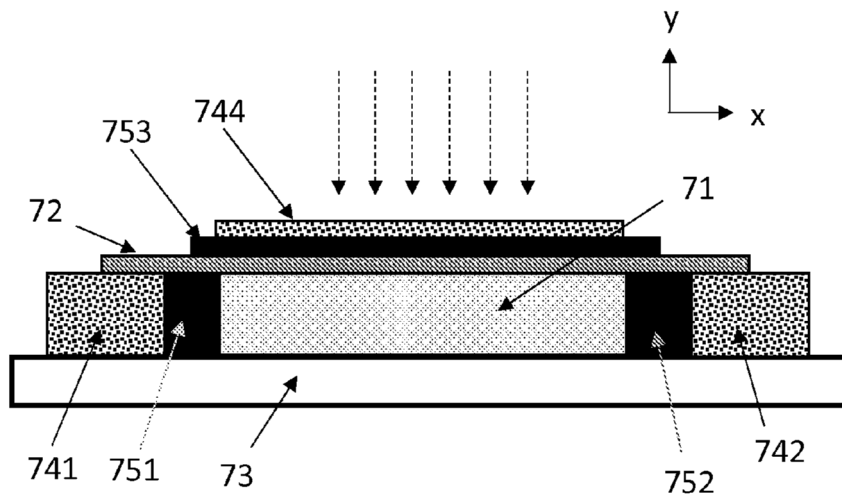


Figura 7b

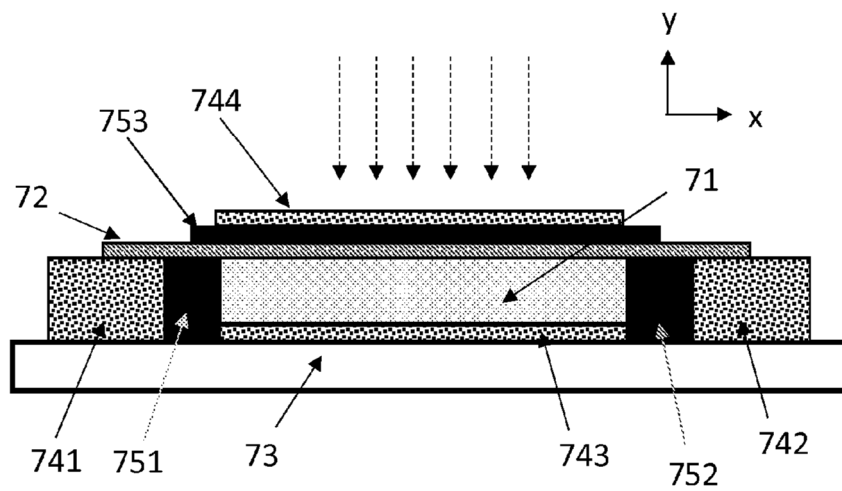


Figura 7c

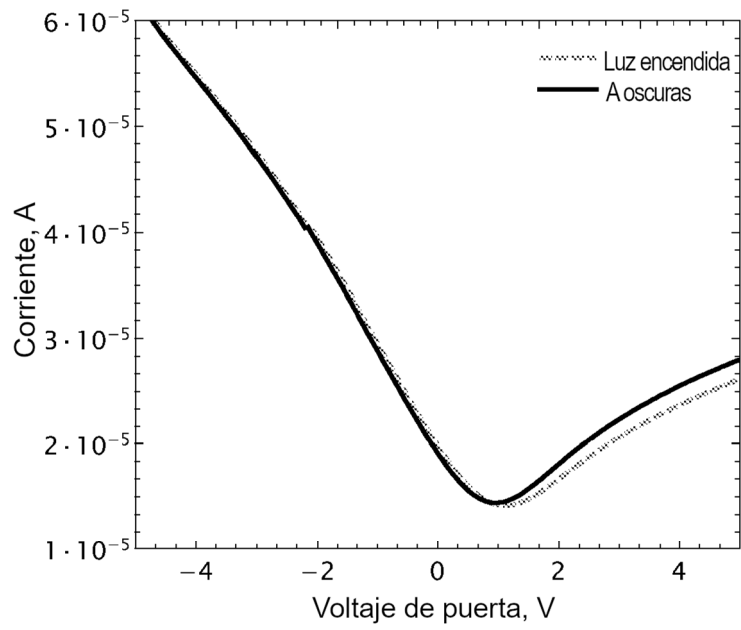


Figura 8a

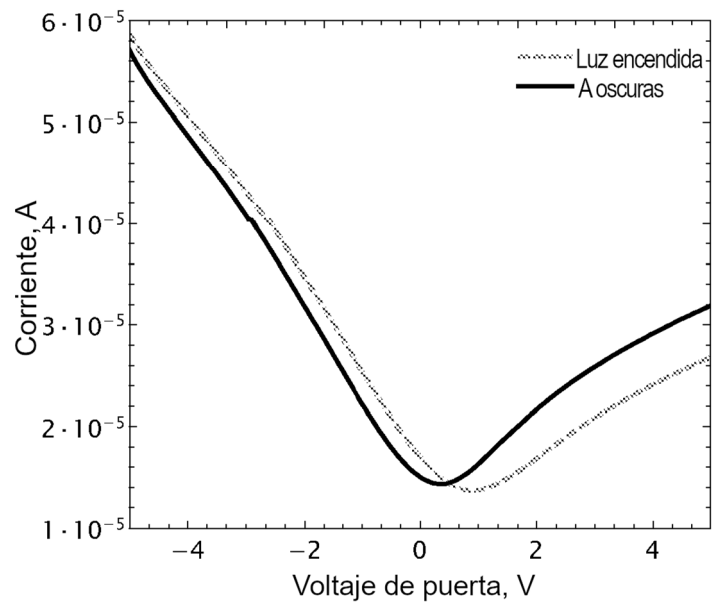


Figura 8b