

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 616 248**

51 Int. Cl.:

H01L 31/105 (2006.01)

H01L 31/102 (2006.01)

H01L 31/0304 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **03.02.2003 PCT/US2003/03181**

87 Fecha y número de publicación internacional: **07.08.2003 WO03065416**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.02.2003 E 03708942 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **30.11.2016 EP 1470574**

54 Título: **Fotodiodo PIN de alta velocidad con respuesta incrementada**

30 Prioridad:

01.02.2002 US 353849 P

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

12.06.2017

73 Titular/es:

**PICOMETRIX, LLC (100.0%)
2925 BOARDWALK
ANN ARBOR, MI 48104, US**

72 Inventor/es:

**KO, CHENG, C. y
LEVINE, BARRY**

74 Agente/Representante:

ISERN JARA, Jorge

ES 2 616 248 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

Fotodiodo PIN de alta velocidad con respuesta incrementada

CAMPO DE LA INVENCION

5 La presente invención se refiere a un fotodetector basado en semiconductores, y en particular a un fotodetector de ancho de banda amplia de alta velocidad que tiene características de absorción mejoradas.

ANTECEDENTES Y RESUMEN DE LA INVENCION

10 Existe un equilibrio bien conocido entre alta velocidad y sensibilidad en un fotodetector. La detección de señal de ancho de banda alta requiere un corto tiempo de tránsito de los portadores y por lo tanto una capa de absorción delgada. Sin embargo, las restricciones geométricas sobre el espesor de la capa de absorción dan como resultado una absorción reducida y una menor capacidad de respuesta.

Un tipo de fotodetector basado en semiconductores se denomina un diodo de unión p-i-n, o un diodo PIN. Este tipo de estructura se compone generalmente de una serie de semiconductores sólidos intercalados entre sí en una estructura epitaxial. En particular, un material semiconductor tipo p y una región semiconductor tipo n están separados por un semiconductor intrínseco.

15 En un diodo PIN, la capa de agotamiento se extiende en cada lado de la unión por una distancia que es inversamente proporcional a la concentración de dopado. Por lo tanto, la capa de agotamiento p-i se extiende bien dentro del material intrínseco, al igual que la capa de agotamiento de la unión i-n. En consecuencia, un diodo PIN funciona como una unión p-n con una capa de agotamiento que abarca la totalidad del material intrínseco. Las principales ventajas inherentes a esta estructura son dos. En primer lugar, la adición de la capa intrínseca permite un
20 aumento fraccionario en la cantidad de luz que debe ser capturada por el diodo. En segundo lugar, debido a la capa de agotamiento extendida, el diodo PIN tiene una capacitancia de unión muy pequeña y una respuesta rápida correspondiente.

25 La mayoría de los intentos para aumentar la velocidad de los diodos PIN se han centrado en reducir la capacitancia en la unión. Al menos un diseño propuesto ha incluido una región de deriva no dopada para este propósito, aumentando efectivamente el tamaño de la porción intrínseca del diodo. Aunque esta solución es adecuada para disminuir la capacitancia de unión, desafortunadamente aumenta el tiempo de tránsito para los portadores y reduce así el tiempo de respuesta del fotodetector. Como tal, existe una necesidad en la técnica de un fotodetector mejorado que alcance el equilibrio apropiado entre la capacitancia y el tiempo de respuesta, al tiempo que aumente la capacidad de respuesta del dispositivo.

30 El documento Jordan et al, "Photoeffect on Diffused P-N Junction with Integral Field Gradients", IRE transactions on electron devices, vol. 2, no. 4, p. 242-251 divulga un fotodiodo PN que tiene una concentración de dopante tipo p de grado p exponencial. El campo incorporado así provisto hace disminuir el componente de electrones de la corriente oscura y reduce el tiempo de tránsito de los electrones considerablemente. Esto conduce a una respuesta de frecuencia mejorada del fotodiodo.

35 Por consiguiente, la presente invención se refiere a un fotodiodo de PIN de acuerdo con el objeto de la reivindicación 1. El fotodiodo tiene una primera capa semiconductor tipo p y una capa semiconductor tipo n acoplada por una segunda capa semiconductor tipo p. La segunda capa semiconductor tipo p tiene un grado de dopado a lo largo de la trayectoria de los portadores. En particular, el dopado se gradúa en concentración desde un valor elevado cerca del ánodo a una concentración de p más baja hacia el cátodo. Mediante la graduación del dopaje de esta
40 manera, se consigue un aumento en la absorción, mejorando la capacidad de respuesta del dispositivo. Aunque este dopaje aumenta la capacitancia con respecto a un semiconductor intrínseco del mismo espesor, el pseudocampo eléctrico que se crea por el dopaje graduado da a los electrones una velocidad muy alta que compensa de más esta capacitancia aumentada. Otras realizaciones y ventajas de la presente invención se discuten a continuación con referencia a las figuras.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

La Figura 1 es un diagrama de banda de energía de un fotodiodo PIN de acuerdo con la presente invención.

La Figura 2 es una vista en sección transversal de una configuración básica de un fotodiodo PIN en una estructura iluminada en superficie de acuerdo con la presente invención.

45 La Figura 3 es un gráfico que representa la relación entre el campo eléctrico y la velocidad de los electrones de acuerdo con un aspecto de la presente invención.

La Figura 4 es un gráfico que representa la relación entre la concentración de dopado y la profundidad relativa de una capa semiconductor de la presente invención.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA REALIZACIÓN PREFERIDA

55 De acuerdo con la presente invención, se proporciona una estructura epitaxial para fines de fotoconducción. La estructura fotoconductor es un diodo PIN modificado que se optimiza para aumentar el rendimiento a través de una

capa mejorada que tiene una concentración de dopaje graduada. Los detalles de la estructura y el método de fabricación de la presente invención se discuten adicionalmente en el presente documento.

5 Con referencia a la figura 1, un diagrama de banda de energía de un fotodiodo 10 PIN muestra los niveles de energía relativa de los materiales semiconductores que forman el fotodiodo 10. En particular, el fotodiodo 10 está compuesto por un grupo de materiales semiconductores, que incluye una primera capa 14 semiconductora tipo p, una segunda capa 16 semiconductora tipo p y una capa 18 semiconductora tipo n. Una capa 12 de ánodo se muestra adyacente a la primera capa 14 semiconductora tipo p para recolectar agujeros.

10 La primera capa 14 semiconductora tipo p se selecciona de un grupo que comprende semiconductores terciarios o semiconductores del grupo III-V. Por consiguiente, la primera capa 14 semiconductora tipo p tiene o bien dos elementos del grupo III combinados con un elemento del grupo V o, por el contrario, dos elementos del grupo V combinados con un elemento del grupo III. A continuación se muestra una tabla de grupos representativos de la tabla periódica.

GRUPO II	GRUPO III	GRUPO IV	GRUPO V
Zinc (Zn)	Aluminio (Al)	Silicio (Si)	Fósforo (P)
Cadmio (Cd)	Galio (Ga)	Germanio (Ge)	Arsénico (As)
Mercurio (Hg)	Indio (In)		Antimonio (Sb)

15 En la realización preferida, la primera capa 14 semiconductora tipo p es InAlAs. Sin embargo, se entiende que la primera capa 14 semiconductora tipo p puede ser cualquier semiconductor terciario que proporcione la brecha de banda necesaria para el funcionamiento optimizado del fotodiodo 10.

20 La capa 18 semiconductora tipo n se selecciona también de un grupo que comprende semiconductores terciarios o semiconductores del grupo III-V. Como antes, la capa 18 semiconductora tipo n es de o bien dos elementos del grupo III combinados con un elemento del grupo V o, por el contrario, dos elementos del grupo V combinados con un elemento del grupo III. En la realización preferida, la capa 18 semiconductora tipo n es InAlAs. Sin embargo, se entiende que la capa 18 semiconductora tipo n puede ser cualquier semiconductor terciario que proporcione la brecha de banda necesaria para el funcionamiento optimizado del fotodiodo 10.

25 La segunda capa 16 semiconductora tipo p también se selecciona de un grupo que comprende semiconductores terciarios o semiconductores del grupo III-V. En la realización preferida, la segunda capa 16 semiconductora tipo p es InGaAs con una concentración de dopaje graduada. Sin embargo, se entiende que la segunda capa 16 semiconductora tipo p puede ser cualquier semiconductor terciario que proporcione la brecha de banda baja necesaria para el funcionamiento optimizado del fotodiodo 10.

30 Con el fin de conseguir una concentración de dopaje graduada, la segunda capa 16 semiconductora tipo p no está dopada de una manera típica. En general, un semiconductor tipo p se fabrica utilizando dopantes con una deficiencia de electrones de valencia, también conocidos como aceptores. El dopaje tipo p da como resultado una abundancia de agujeros. Por ejemplo, en un semiconductor tipo III-V, algunos de los átomos del grupo III pueden ser reemplazados por átomos del grupo II, tales como Zn o Cd, produciendo de este modo un material tipo p. De manera similar, dado que los átomos del grupo IV actúan como aceptores para los átomos del grupo V y donantes para los átomos del grupo III, un semiconductor III-V dopado del grupo IV tendrá un exceso de electrones y agujeros.

35 La figura 2 es una vista en sección transversal de una configuración básica de un fotodiodo 10 en una estructura iluminada de superficie diseñada de acuerdo con la presente invención. Se proporciona una capa 20 de sustrato para el crecimiento de la estructura semiconductora. La capa 18 de semiconductor tipo n se deposita sobre el sustrato. La primera capa 14 semiconductora tipo p y la segunda capa 16 semiconductora tipo p se depositan de tal manera que la segunda capa 16 semiconductora tipo p es directamente adyacente a la capa 18 semiconductora tipo n. Como antes, una capa 12 de ánodo se deposita sobre la primera capa 14 semiconductora tipo p para recolectar agujeros. También se muestra una capa 22 de cátodo, o capa de contacto tipo n, para recolectar electrones.

40 Como se ha indicado, es una característica de la segunda capa 16 semiconductora tipo p que incluya una concentración de dopaje graduada. La presencia de dopantes en la segunda capa 16 semiconductora tipo p se controla con el fin de optimizar el rendimiento del fotodiodo. Una primera concentración 15 está situada cerca del primer semiconductor 14 tipo p y una segunda concentración 17 es directamente adyacente al semiconductor 18 tipo n. Preferiblemente, una profundidad D de la segunda capa 16 semiconductora tipo p está entre 800 y 1.000 angstroms de profundidad, es decir, la dimensión paralela al recorrido de los portadores.

45 En la realización preferida, la primera concentración 15 es mayor que la segunda concentración 17. En particular, la primera concentración 15 se localiza en una posición x_0 y define una concentración de dopante p_0 . Un gradiente de concentración de dopado preferido se rige por la siguiente ecuación:

$$(1) \quad p = p_0 e^{-\frac{x}{D}}$$

sobre la profundidad D de la segunda capa semiconductor 16 tipo p para todo x y D mayor que cero. En la Figura 4 se muestra una representación genérica de la concentración de dopantes p.

La estructura de dopaje graduada de la segunda capa 16 semiconductor tipo p da como resultado un mejor rendimiento del fotodiodo 10. Durante el funcionamiento, la luz incidente es absorbida en la segunda capa 16 de semiconductor tipo p del fotodiodo 10. La luz que es absorbida en la segunda concentración 17 que parte de la segunda capa 16 semiconductor tipo p que produce electrones y agujeros que van a la deriva en el ánodo 12 y el cátodo 22 bajo la influencia del campo eléctrico grande derivado. Aunque esta es la situación habitual en los fotodetectores de PIN absorbentes dopados uniformemente bajos en la presente invención, la fotorrespuesta de los portadores es más compleja.

Los electrones generados en la segunda parte de concentración 17 de la segunda capa 16 semiconductor tipo p llegan al cátodo con su velocidad de saturación y son recolectados. Los agujeros generados en la segunda concentración 17 que es parte la segunda capa 16 semiconductor tipo p se trasladan al ánodo 12, entrando así en la primera concentración 15 donde la concentración de dopantes es relativamente alta y en la que se recolectan, terminando así su tiempo de tránsito.

A modo de comparación, la luz que se absorbe en la primera concentración 15 que es parte de la segunda capa 16 semiconductor tipo p también produce electrones y agujeros. En este caso, sin embargo, los agujeros se recolectan fácilmente en la primera concentración 15 y por lo tanto no suman sustancialmente al tiempo de tránsito de los portadores ni reducen el ancho de banda del fotodiodo 10. En consecuencia, en la medida en que se refiere a los agujeros, la concentración de dopado graduada del fotodiodo 10 no suma a su tiempo de tránsito ni reduce el ancho de banda del detector ya sea en la primera concentración 15 o en la segunda concentración 17.

Otro aspecto de la concentración de dopaje graduada de la segunda capa 16 semiconductor tipo p es la creación de un pseudocampo eléctrico. Los electrones generados en la primera región de concentración 15 están sujetos a este pseudocampo mostrado a continuación como

$$(2) \quad E = - \left(\frac{kT}{q} \right) \frac{dp}{dx} \frac{1}{p},$$

donde k es la constante de Boltzman, T es la temperatura, q es la carga de un electrón y el valor $\frac{dp}{dx}$ es el gradiente de concentración de dopaje.

El pseudocampo E produce una velocidad de electrón de "sobreeexpansión", es decir, la velocidad de los electrones es potencialmente muchas veces más rápida que la velocidad de saturación. Una velocidad de saturación de electrones típica es del orden de 5×10^6 cm/seg. Sin embargo, el gradiente exponencial mostrado en la ecuación (1) con $D = 1.000$ angstroms produce un campo $E = 2.5\text{kV} / \text{cm}$, que corresponde a una velocidad de sobrevoltaje de electrones de 3×10^7 E y la velocidad de los electrones se muestra en la Figura 3.

Como se describe, la presente invención mejora el estado de la técnica en fotodiodos mediante la implementación de una concentración de dopaje graduada en la región intrínseca de un fotodiodo PIN. De esta manera, la absorción neta de un fotodiodo puede aumentarse sin reducir sustancialmente el ancho de banda global del dispositivo. Se entiende además que puede ser ventajoso optimizar la velocidad global ajustando la concentración de dopado, la capacitancia del dispositivo y el espesor total de la región de absorción. Debe ser evidente para los expertos en la técnica que las realizaciones descritas anteriormente son meramente ilustrativas de solamente algunas de las muchas realizaciones específicas posibles de la presente invención.

REIVINDICACIONES

1. Un fotodiodo (10) PIN que comprende:

una primera capa (14) semiconductor tipo p;

una capa (18) semiconductor tipo n;

5 una segunda capa (16) semiconductor tipo p dispuesta entre la primera capa (14) semiconductor tipo p y la capa (18) semiconductor tipo n de tal manera que el segundo semiconductor (16) tipo p está directamente adyacente a la capa (18) semiconductor, teniendo la segunda capa (16) semiconductor tipo p una concentración de dopaje graduada;

un sustrato (20), creciendo la capa (18) semiconductor tipo n sobre el sustrato (20);

10 una capa (12) de ánodo para recolectar agujeros;

una capa (22) de cátodo para recolectar electrones;

en el que la concentración de dopaje graduada define una primera concentración (15) adyacente a la primera capa (14) semiconductor tipo p y una segunda concentración (17) adyacente a la capa (18) semiconductor tipo n, y además en el que la primera concentración (15) es mayor que la segunda concentración (17);

15 en el que la luz incidente es absorbida en la segunda capa (16) semiconductor tipo p siendo absorbida la luz incidente en la segunda concentración (17) que es parte de la segunda capa (16) semiconductor tipo p produce electrones y agujeros que derivan al ánodo y cátodo;

20 en el que los electrones generados en la segunda concentración (17) que es parte de la segunda capa (16) semiconductor tipo p alcanzan el cátodo con su velocidad de saturación y son recolectados, los agujeros generados en la segunda concentración (17) que es parte de la segunda la capa (16) semiconductor tipo p se desplazan hasta el ánodo (12),

en el que la luz incidente que se absorbe en la primera concentración (15) que es parte de la segunda capa (16) semiconductor tipo p produce electrones y agujeros, en donde los agujeros se recolectan en la primera concentración (15) que es parte;

25 y en el que dichos electrones en la primera concentración (15) que es parte están sujetos a un pseudocampo capaz de proporcionarles una velocidad electrónica de sobreexpansión, siendo regido el pseudocampo por la siguiente ecuación:

$$E = - \left(\frac{kT}{q} \right) \frac{dp}{dx} \frac{1}{p},$$

30 donde k es la constante de Boltzman, T es la temperatura, q es la carga de un electrón y el valor $\frac{dp}{dx}$ es el gradiente de concentración de dopaje, y

en el que la primera concentración (15) está situada en una posición x_0 y define una concentración p_0 , y además en el que la concentración de dopaje graduada se rige por la siguiente ecuación:

$$p = p_0 e^{\frac{-x}{D}}$$

sobre la profundidad D de la segunda capa (16) semiconductor tipo p para todo x y para D mayor que cero.

35 2. El fotodiodo según la reivindicación 1, en el que la primera capa (14) semiconductor tipo p es InAlAs.

3. El fotodiodo de la reivindicación 1, en el que la capa (18) semiconductor tipo n es InAlAs.

4. El fotodiodo según la reivindicación 1, en el que la segunda capa (16) semiconductor tipo p es InGaAs.

5. El fotodiodo según una de las reivindicaciones anteriores, en el que la profundidad D está comprendida entre 800 y 1000 angstroms de longitud.

40

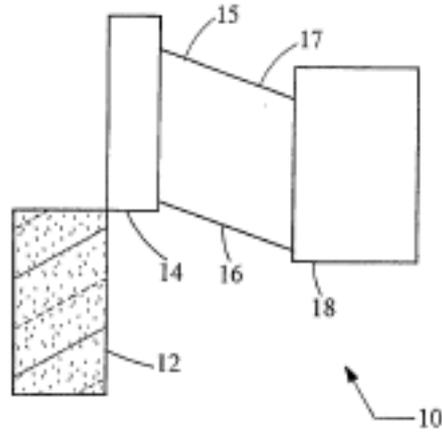


Fig. 1

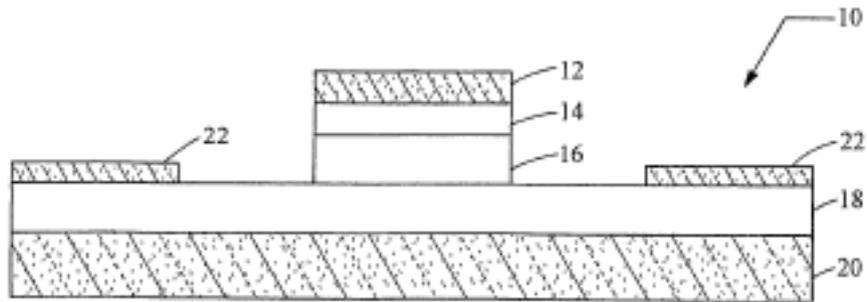


Fig. 2

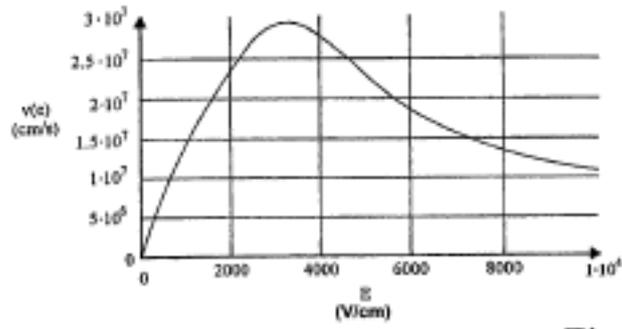


Fig. 3

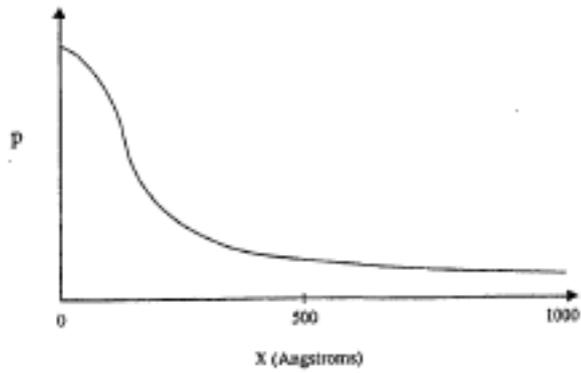


Fig. 4