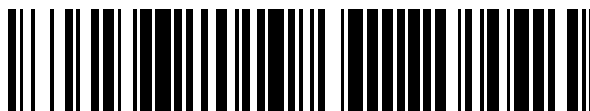


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 590 657**

51 Int. Cl.:

**H01L 21/02** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **17.02.2010 PCT/GB2010/000287**

87 Fecha y número de publicación internacional: **26.08.2010 WO10094920**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.02.2010 E 10707109 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.06.2016 EP 2399286**

54 Título: **Formación de capas finas de materiales semiconductores**

30 Prioridad:

**19.02.2009 GB 0902848**

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

**23.11.2016**

73 Titular/es:

**IQE SILICON COMPOUNDS LIMITED (100.0%)  
Beech House Pascal Close St Mellons Cardiff  
South Glamorgan  
Wales CF3 0LW, GB**

72 Inventor/es:

**HARPER, ROBERT, CAMERON**

74 Agente/Representante:

**UNGRÍA LÓPEZ, Javier**

**ES 2 590 657 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

Formación de capas finas de materiales semiconductores

5 **Campo de la invención**

La presente invención se refiere a métodos de formar capas finas de materiales semiconductores.

10 **Introducción**

Debido a su escasez relativa es improbable que la futura demanda de tecnologías basadas en Ge sea satisfecha fácilmente usando sustratos semiconductores de Ge a granel. Esto es especialmente relevante en pastillas de sustrato de mayor diámetro en las que se requiere un mayor grosor de Ge por área unitaria para proporcionar adecuada resistencia mecánica. Las pastillas de germanio sobre aislante (GeOI) presentan una alternativa factible. Se necesita solamente una pequeña fracción (típicamente de entre 0,001 y 1%) de material de Ge para fabricar una pastilla de diámetro equivalente, y se logran beneficios de electrostática y electrónica equivalentes a los de silicio sobre aislante (SOI). La presencia de una capa de parada de ataque óxido entre una capa superficial fina de germanio y la masa del sustrato también puede ser una clave que permita el uso en otras tecnologías como fotovoltaica de concentración.

Un sustrato de GeOI deseable consta de una capa fina de grosor uniforme de Ge sin defectos fuertemente unida a una pastilla de silicio oxidado. Sin embargo, la fabricación de pastillas de GeOI supone varios retos significativos que todavía no han sido resueltos, dando lugar a altos costos y pobres cualidades de material. A continuación se describen tres métodos conocidos para fabricar sustratos de GeOI.

Un primer método conocido es usar transferencia de capa de una pastilla de Ge donante. Las técnicas de transferencia de capa incluyen el conocido Smartcut (RTM) en el que se depositan iones al objeto de formar un plano de clivaje justo debajo de una superficie superior de la pastilla de Ge donante. La superficie oxidada de una pastilla receptora de silicio se une a la superficie superior de la pastilla donante. Las pastillas donante y receptora se separan entonces a lo largo del plano de clivaje de modo que quede una capa fina de Ge en el silicio oxidado. La aspereza superficial de la capa de Ge transferida es más alta que la obtenida en técnicas similares para producir pastillas SOI, y se necesita pulido adicional para quitar dicha aspereza adicional que da lugar a grosor no uniforme de la capa de Ge. Esto hace difícil producir capas de Ge ultrafinas con la necesaria uniformidad de grosor para aplicaciones CMOS Ge avanzadas, por ejemplo donde se desean dispositivos parcial o completamente empobrecidos. Además, el costo de la pastilla donante de Ge es alto, y es difícil restaurar la calidad superficial de la pastilla donante de Ge a un nivel donde pueda ser reutilizada.

Un segundo método conocido es hacer crecer epitaxialmente un grado de SiGe sobre una pastilla donante de silicio y hacer crecer epitaxialmente Ge en el grado de SiGe. Posteriormente se transfiere una capa de Ge a una pastilla receptora de silicio oxidada. Éste es otro método de uso común para producir pastillas de GeOI y SiGeOI de mayor diámetro de hasta 300 mm de diámetro. Sin embargo, la densidad de dislocaciones ascendentes (TDD) de películas de Ge puro que crecen en grados de SiGe es del orden de  $10^6$  a  $10^8$   $\text{cm}^{-2}$ . Este nivel de defectos degrada de forma significativa el rendimiento tanto dentro de la capa de Ge como dentro de cualesquiera capas posteriores crecidas en ella. La aspereza superficial de las capas epitaxiales que quedan en la pastilla donante después de la transferencia de capa tiene que ser restablecida después del uso por pulido para permitir la unión espontánea de una capa de Ge de nuevo crecimiento. El crecimiento de una película de Ge en un grado Si-Ge pleno, con una etapa intermedia de CMP (pulido mecánico químico), es lento y caro. Es difícil atacar selectivamente las capas superiores transferidas del grado de SiGe, que tiene alto contenido de Ge, desde la película de Ge puro transferida a la pastilla receptora.

Un tercer método conocido es comenzar con una pastilla de SiGe sobre aislante (SiGeOI) y usar un método de condensación de Ge para llegar a una pastilla de GeOI. La capa fina del SiGe se oxida, de tal manera que el Ge sea empujado a lo largo del frente de oxidación dando lugar a Ge puro en el límite con la capa de óxido aislante soterrada. Entonces se quita el material superyacente. Sin embargo, se han referido altos niveles de defectos de dislocación en pastillas de GeOI fabricadas con este método. Los defectos son activados por relajación de deformación durante el proceso debido a la constante de red en la interfaz de SiGeOI original que es equivalente al SiGe transferido. A pesar de la calidad cuestionable, la mayor parte de las pastillas de GeOI con diámetros superiores a 150 mm se producen actualmente con este método.

El documento US 2006/172505 describe un método de formar una película fina de un material de germanio, incluyendo; hacer crecer epitaxialmente dicho material de germanio sobre una superficie de dicha superficie que es soportada por un sustrato donante; y realizar transferencia de capa del material de germanio desde el sustrato donante a un sustrato receptor con GaAs residual de junto a dicha superficie unida a dicho material de germanio transferido; quitar después el material residual unido dejando solamente el material de germanio sobre el sustrato receptor donde el material de germanio es sustancialmente ajustado en red a GaAs.

La invención pretende resolver estos y otros problemas de la técnica anterior relacionada.

### Resumen de la invención

5 La invención se refiere a formar una capa de material de germanio sobre una superficie de GaAs que es transferida posteriormente a un sustrato receptor. El material de germanio es un material de SiGe con una menor proporción de silicio, ajustándose sustancialmente en red el material de SiGe a GaAs.

10 La invención proporciona un método de formar una película fina o capa de material de germanio. Una capa de material de germanio es transferida a otro sustrato, por ejemplo usando una técnica de implante de iones/clivaje o similar tal como Smartcut (RTM). El residuo del otro material unido a la capa transferida o el material restante se puede quitar dejando una superficie original expuesta por ataque químico selectivo usando la interfaz de GaAs/material de germanio como un tope de ataque.

15 La invención se aplica a la formación de sustratos del tipo de germanio sobre aislante, haciendo crecer epitaxialmente un material de germanio sobre un sustrato donante de GaAs, y realizando transferencia de capa del material de germanio junto con parte del GaAs residual a un sustrato receptor. Luego se quita el GaAs residual, actuando el límite de GaAs/material de germanio como un tope del ataque químico húmedo selectivo o similar.

20 La heterointerfaz entre el material de germanio y el GaAs residual (o viceversa) en la capa transferida proporciona un tope de ataque que permite quitar el GaAs residual usando atacantes selectivos para el GaAs dejando solamente el material de germanio sobre el sustrato receptor. El material de germanio es SiGe con un componente de silicio menor coherente con ajuste en red aproximado del SiGe al sustrato donante de GaAs. El material de germanio es sustancialmente ajustado en red a GaAs. El material de germanio y el GaAs se forman preferiblemente  
25 monolíticamente uno con otro, es decir, de forma monocristalina. El material de germanio puede exhibir un rango de composiciones, incluyendo por ejemplo un grado entre dos composiciones de SiGe diferentes.

La técnica permite transferir capas finas uniformes de germanio sin defectos o SiGe sobre sustratos alternativos. La etapa CMP comúnmente usada para eliminar el daño por clivaje/implante y restablecer la microrrugosidad para  
30 posterior crecimiento epitaxial en la superficie de la capa transferida es sustituida por un ataque selectivo para quitar el GaAs residual. Este ataque se para en el material de germanio permitiendo lograr capas finas muy uniformes de material de germanio transferido. El crecimiento de material de germanio relajado sobre GaAs ajustado en red da lugar a niveles de defectos muy bajos en comparación con los materiales de germanio crecidos sobre un grado de SiGe. Las pastillas donantes de GaAs son por lo general más baratas que las pastillas de Ge equivalentes, y la pastilla donante de GaAs puede ser reutilizada si se usa una técnica de transferencia de capa que deja en gran  
35 parte intacto el sustrato donante.

Múltiples ciclos de GaAs y material de germanio pueden hacerse crecer epitaxialmente en el sustrato donante de GaAs, antes de quitarse secuencialmente repitiendo la transferencia de capa para formar múltiples sustratos del tipo  
40 de germanio sobre aislante.

La capacidad de producir material de germanio uniforme fino sobre aislante es especialmente importante para CMOS a base de GeOI en los que se usan arquitecturas parcial y completamente empobrecidas, pero la técnica también es aplicable a un amplio rango de otros usos tal como fotovoltaica, optoelectrónica, e integración III/V con silicio.  
45

En particular, la invención proporciona un método de realizar transferencia de capa según la reivindicación 1.

50 El hecho de que el material residual se una a un primer material transferido, o al segundo material restante, depende del plano (por ejemplo un plano de clivaje o capa) a lo largo del que se separan los materiales primero y segundo, y en particular de si dicho plano está encima o debajo de dicha superficie.

El material de germanio es  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ . Para un ajuste en red aceptable de SiGe con GaAs el valor de x es del rango de 0,01 a 0,03. El material de germanio es sustancialmente ajustado en red a GaAs, de tal manera que se logre un  
55 nivel de defectos aceptablemente bajo, por ejemplo requiriendo que la constante de red del material de germanio esté dentro de  $\pm 0,08\%$  de la constante de red de GaAs, aunque otros criterios adecuados se explican más adelante.

60 Los materiales aquí descritos pueden hacerse crecer por técnicas CVD o similares, y pueden estar no dopados para facilitar la formación de uniones p-n.

El sustrato receptor puede incluir una capa aislante y la transferencia de capa de la capa de transferencia del primer material puede ser entonces sobre la capa aislante para formar un primer sustrato de material sobre aislante. Por ejemplo, el sustrato receptor puede ser un sustrato de silicio y la capa aislante puede incluir un óxido de silicio. Se puede usar otros sustratos receptores de varios tipos incluyendo materiales semiconductores, aisladores, vidrios, metales, etc, a voluntad.  
65

La transferencia de capa se puede llevar a cabo en varias formas conocidas por los expertos. Por ejemplo, el paso de realizar transferencia de capa puede incluir implantar iones para iniciar una capa de clivaje en el segundo material debajo de dicha superficie, unir el primer material (junto con cualesquiera capas adicionales añadidas encima del primer material) al sustrato receptor, y separar el sustrato receptor del sustrato donante a lo largo de la capa de clivaje dejando el segundo material residual de junto a dicha superficie unida a dicho primer material transferido. Si la capa de clivaje está dentro del primer material encima de la superficie, entonces el primer material residual procederá de junto a dicha superficie unida al segundo material restante. La transferencia de capa también se puede lograr rectificando una masa del sustrato donante.

El material residual unido se puede quitar de una o varias formas, incluyendo rectificado, pulido, ataque químico, etc. Sin embargo, la extracción incluye preferiblemente quitar al menos parte del material residual por ataque químico selectivo al que el otro de los materiales primero y segundo es insensible, dejando por ello el material restante con su superficie crecida original. En particular, se puede usar ataque químico húmedo selectivo para quitar una porción final del material residual unido para exponer el primer o el segundo material subyacente.

Convenientemente, el sustrato donante puede ser un sustrato de GaAs. En este caso, la superficie del segundo material puede ser una superficie de GaAs del sustrato de GaAs. Sin embargo, la superficie del segundo material puede ser en cambio la superficie de una capa crecida epitaxialmente del segundo material, que se puede hacer crecer sobre una superficie de GaAs de un sustrato de GaAs, o sobre una superficie subyacente diferente tal como una capa crecida epitaxialmente del primer material.

Igualmente, el sustrato donante puede ser un sustrato de Ge. En este caso, la superficie del segundo material puede ser una superficie de Ge del sustrato de Ge. Sin embargo, la superficie del segundo material puede ser en cambio la superficie de una capa crecida epitaxialmente del segundo material, que se puede hacer crecer sobre una superficie de Ge de un sustrato de Ge, o sobre una superficie subyacente diferente tal como una capa crecida epitaxialmente del primer material.

Un aspecto relacionado de la invención prevé el crecimiento de capas alternas repetidas de los materiales primero y segundo, de tal manera que se pueda usar la transferencia de capa repetida a un sustrato receptor separado, con múltiples pasos correspondientes de quitar material residual unido.

Cuando se usan los métodos anteriores para llevar a la práctica la transferencia de capa desde un sustrato donante sin rectificar la masa o la mayor parte del sustrato, el sustrato donante puede ser reutilizado entonces para llevar a la práctica una repetición del mismo proceso una o varias veces, o para otros procesos o usos. El uso de los métodos anteriores en una manera en la que el material residual es el segundo material que queda unido al primer material en el sustrato donante permite que una superficie de GaAs original, en la que se formó una capa de germanio a transferir, sea recuperada exactamente usando la técnica ya mencionada de ataque químico selectivo. Si la superficie que queda en el sustrato donante después de la transferencia de capa es el segundo material clivado, entonces se puede usar pasos de pulido y similares con los que los expertos están familiarizados para recuperar el sustrato donante para uso o reutilización posteriores.

Los métodos anteriores pueden ser usados para proporcionar una superficie en la que se formen otras estructuras. En un ejemplo, tales estructuras adicionales incluyen una o más uniones fotovoltaicas, que se pueden formar monolíticamente en el primer material transferido.

La invención proporciona un método de fabricar una película fina de un material de germanio, incluyendo: hacer crecer epitaxialmente una capa de material de germanio sobre un sustrato donante de GaAs; realizar transferencia de capa de la capa de material de germanio con GaAs residual del sustrato donante a un sustrato receptor; y quitar el material de GaAs residual para exponer la capa de material de germanio.

El material de germanio puede ser de una composición homogénea, o la composición puede variar en el material, por ejemplo cambiando la composición durante el crecimiento de capa. Una aplicación de esto es proporcionar un método de formar una capa fina de un material de germanio que está desajustada en red a GaAs. Se hace crecer un grado de SiGe en un sustrato donante, y se hace crecer en el grado una capa superior de material de germanio (que puede ser efectivamente la parte superior del grado, o una capa adicional). La capa superior, preferiblemente junto con parte del grado de SiGe o todo el grado de SiGe y un material de GaAs residual sobre el que se hizo crecer el grado de SiGe, es entonces transferido en capa a un sustrato receptor, y cualquier material residual de debajo de la capa se quita según sea preciso, y la superficie restante del material de germanio en el sustrato receptor se prepara según sea necesario para uso adicional. El material de germanio puede ser ajustado en red a la parte superior del grado. Alternativamente, puede estar deliberadamente desajustado en red, para obtener una capa deformada de material de germanio sobre el sustrato receptor.

La invención también proporciona métodos de formar un dispositivo, incluyendo los pasos del método expuesto anteriormente, siendo tal dispositivo un dispositivo optoelectrónico, un dispositivo de CMOS a base de Ge completamente empobrecido, o un dispositivo III/V sobre silicio.

5 La invención también proporciona productos de los métodos descritos, incluyendo un sustrato que soporta una capa de dicho primer material, formada según alguno de los métodos descritos. Un producto final concreto así formado es un sustrato de GeOI o SiGeOI, que puede tener reducidas densidades de defectos con respecto a sustratos de dimensiones similares formados según métodos de la técnica anterior. Tales sustratos de germanio o SiGe sobre aislante pueden incluir el material de germanio que recubre un aislante tal como un óxido de silicio, que se puede formar sobre un sustrato de silicio.

10 La invención puede ser usada para obtener una estructura sobre la que se forme un dispositivo fotovoltaico, por ejemplo como el descrito en la Solicitud de Patente titulada "Célula fotovoltaica", presentada conjuntamente y en tramitación, cuyo contenido completo se incorpora por ello por referencia a todos los efectos.

La invención también proporciona un dispositivo fotovoltaico así construido, tal como una célula solar.

15 La invención también proporciona uno o más de un dispositivo optoelectrónico, un dispositivo CMOS basado en Ge total o parcialmente empobrecido, y un dispositivo III/V sobre silicio, formados usando los métodos descritos.

20 La invención se puede aplicar a pastillas de semiconductores completas, por ejemplo donde los sustratos donante y receptor son pastillas donante y receptora.

### 20 Breve descripción de los dibujos

25 Ahora se describirán realizaciones de la invención, a modo de ejemplo solamente, con referencia a las figuras acompañantes de las que:

Las figuras 1A a 1E muestran esquemáticamente transferencia de capa de una capa de SiGe desde un sustrato donante de GaAs a un sustrato receptor, donde la capa transferida lleva algo de GaAs residual.

30 Las figuras 2A y 2B muestran algunas etapas de la figura 1, donde el sustrato receptor lleva una capa aislante.

La figura 3 ilustra una técnica en la que se hacen crecer múltiples capas alternas y luego se quitan a múltiples sustratos receptores usando pasos sucesivos de transferencia de capa.

35 La figura 4 ilustra la técnica aplicada a una capa de SiGe sobre una capa de GaAs crecida epitaxialmente.

Las figuras 5A a 5C muestran esquemáticamente la transferencia de capa de una capa de SiGe desde un sustrato donante de GaAs, donde la capa transferida deja algo de SiGe residual.

40 Las figuras 6A a 6D muestran un proceso similar al de la figura 1 que no es parte de la invención en el que una capa de GaAs es transferida de una capa de Ge subyacente o capa de SiGe o sustrato de Ge.

La figura 7 representa una célula solar o fotovoltaica de una sola unión o de uniones múltiples incluyendo uniones formadas o crecidas sobre una capa transferida como se ilustra en las figuras anteriores.

45 Las figuras 8A y 8B que no son parte de la invención ilustran la transferencia de una capa de SiGe u otro material de germanio que tiene una composición no ajustada en red a GaAs crecida en un grado adecuado de SiGe y luego transferida a un sustrato receptor.

50 Las figuras 9A y 9B son similares a las figuras 8A y 8B, pero la capa de material de germanio se ha deformado deliberadamente, estando desajustada en red a la parte superior del grado de SiGe.

### Descripción de realizaciones

55 Con referencia ahora a las figuras 1A a 1E se muestra una serie de etapas en la formación de una capa fina de un material de germanio sobre un sustrato. En la figura 1A se ha facilitado un sustrato donante de GaAs 10, y una capa 12 de material de germanio se ha hecho crecer epitaxialmente sobre el sustrato donante. En este caso, el material de germanio es un material de germanio de silicio (SiGe).

60 En la figura 1B se ha iniciado un plano de clivaje 14 en el material de GaAs del sustrato donante debajo de la capa 12 de germanio de silicio, por ejemplo implantando iones a través de la capa 12 usando un proceso de haz de iones.

65 En la figura 1C se ha unido un sustrato receptor a la capa de SiGe 12. Se puede usar un paso de recocido para mejorar la unión entre el sustrato receptor y la capa de SiGe, y también para debilitar el plano de clivaje, de manera conocida por los expertos a partir de la técnica Smartcut (RTM).

Los sustratos donante y receptor se separan entonces como se representa en la figura 1 D de modo que el sustrato

receptor lleve la capa 12 de SiGe y una capa de material de GaAs residual procedente del sustrato donante original.

La capa de material de GaAs residual se puede quitar con varias técnicas tales como rectificado, pulido y ataque químico, dejando la capa crecida epitaxialmente de material de germanio expuesta sobre el sustrato receptor como se representa en la figura 1E. Preferiblemente, al menos una porción final del material de GaAs residual se quita mediante un proceso de ataque químico, tal como un proceso de ataque químico húmedo, al que el material de germanio es insensible.

La pastilla donante de GaAs restante 10 puede ser reutilizada, después del repulido necesario u otras técnicas de preparación de superficies.

El proceso de transferir la capa epitaxial de material de germanio desde el sustrato donante al sustrato receptor se puede denominar un proceso de transferencia de capa. Se puede usar varias técnicas diferentes para lograr este efecto, y múltiples pasos pueden ser necesarios para llevar a la práctica tales técnicas, realizándose estos pasos antes, después, o tanto antes como después del crecimiento epitaxial de la capa 12 de material de germanio. Por ejemplo, una técnica de transferencia de capa alternativa implica rectificar la masa de la pastilla donante, en lugar de usar una técnica de plano de clivaje. Entonces todavía se puede usar un proceso de ataque químico para quitar una capa residual de GaAs.

Se puede usar sustratos receptores de varios materiales y estructuras para recibir la capa de material de germanio 12, tal como metales, semiconductores, aislantes, vidrios, y combinaciones de tales materiales. Para formar un sustrato de material de germanio sobre aislante se usa un sustrato receptor con una capa aislante para el sustrato receptor 20. Esta variación se ilustra en la figura 2A, que se puede comparar con la figura 1C. En la figura 2A, el sustrato receptor lleva una capa aislante 22, y esta capa aislante es la que está unida a la capa 12 de material de germanio, dando lugar a una estructura final como la representada en la figura 2B.

El material de germanio es SiGe. La composición indicada con x en  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  se puede variar a condición de que el material permanezca sustancialmente ajustado en red con el material de GaAs del sustrato donante. El ajuste en red ideal tiene lugar en torno a  $x=0,018$ , y x toma un valor de aproximadamente 0,01 a 0,03, aunque valores de  $x=0$  (germanio) a  $x=0,04$ , o también a  $x=0,06$  pueden proporcionar material de germanio de calidad razonable para muchos fines. Cuando se incrementa la proporción de silicio, el desajuste en red con GaAs incrementa aproximadamente 0,04% por cada cambio de x de 0,01, y aumenta el número de defectos consiguientes en la estructura cristalina del material de germanio.

Un rango adecuado de parámetros de red para que el material de germanio permanezca adecuadamente ajustado en red con GaAs puede ser por lo tanto una desviación de hasta +- 0,16% del parámetro de red de GaAs, y más preferiblemente hasta +-0,08%, y más preferiblemente todavía en el rango de +-0,04%. El material de germanio puede contener dopantes y otras impurezas a niveles bajos.

El proceso ilustrado en las figuras 1A a 1E se puede realizar típicamente usando pastillas semiconductoras de tipo convencional. La pastilla donante de GaAs puede tener típicamente un grosor de entre aproximadamente 100  $\mu\text{m}$  y 1000  $\mu\text{m}$ , siendo los grosores más grandes típicos de las pastillas más grandes. La pastilla receptora puede ser una pastilla de silicio en la que se haya hecho crecer una capa de óxido para proporcionar una capa aislante 22. La capa 12 de material de germanio epitaxial puede tener típicamente un grosor de entre aproximadamente 1 nm y 2  $\mu\text{m}$ , dependiendo de la aplicación final. Algunas aplicaciones de circuitería CMOS pueden beneficiarse típicamente de capas más finas que algunas aplicaciones ópticas y fotovoltaicas. El plano de clivaje se puede formar típicamente de aproximadamente 0,1 a 2  $\mu\text{m}$  por debajo de la superficie del GaAs, o por debajo de la superficie de la capa 12, pero de tal forma que el plano de clivaje esté al menos ligeramente dentro del material de GaAs.

El acercamiento antes descrito se puede extender por dos o más capas epitaxiales de un material de germanio sobre el sustrato donante, como se representa en la figura 3, y luego realizar múltiples pasos de transferencia de capa para quitar cada capa 12 en secuencia inversa. Cada par de capas de material de germanio 12 está separada por una capa 26 de GaAs también crecida epitaxialmente. Las capas de clivaje requeridas pueden iniciarse dentro de parte o todo el sustrato de GaAs y las capas de GaAs entre pasos de crecimiento, pero puede ser ventajoso formar todas las capas epitaxiales sin sacar la estructura de una cámara de reacción adecuada, y luego llevar a la práctica cualquier implante de iones necesario u otros pasos de iniciación de plano de clivaje después de de formar completamente las capas epitaxiales.

Más en general, como se ilustra en la figura 4, la técnica se puede aplicar a una capa epitaxial de un material de germanio que recubre material de GaAs epitaxial 30, donde puede haber una o más capas adicionales 28 entre el material de GaAs 30 y el sustrato de GaAs. En este caso más general, todavía se puede usar la técnica descrita anteriormente para llevar a la práctica la transferencia de capa de la capa de material de germanio 12, por ejemplo incluyendo formar un plano de clivaje 14, completar la transferencia de capa a un sustrato receptor, y someter selectivamente a ataque químico el GaAs residual de la capa de material de germanio 12 en el sustrato receptor.

En la figura 5A, el material de GaAs 30 subyace a una capa epitaxial 32 de un material de germanio como se ha

descrito anteriormente, por ejemplo con respecto a la figura 4. El material de GaAs 30 puede ser la parte superior de un sustrato de GaAs, o puede ser una capa crecida epitaxialmente. En una variación de las técnicas descritas anteriormente, se forma un plano de clivaje 34 en la capa de material de germanio 32. Una porción superior de la capa de material de germanio es transferida posteriormente a un sustrato receptor 20, por ejemplo completando una técnica de transferencia de capa como la utilizada anteriormente. El material de germanio transferido al sustrato receptor puede ser pulido después o preparado de otro modo para uso, y la porción inferior de la capa de material de germanio que queda en el GaAs se puede quitar mediante varias técnicas que incluyen preferiblemente que se quite al menos la porción final de este material usando un ataque selectivo al que el GaAs es insensible. Las estructuras resultantes se muestran en la figura 5C. Esta variación deja disponible una superficie atacada del material de GaAs 30 para uso adicional de la manera que sea necesaria.

La técnica de la figura 5 se puede aplicar a una o varias capas repetidas de la estructura de la figura 4.

Las técnicas descritas anteriormente también se pueden usar para formar películas finas de GaAs que no son parte de la invención. Con referencia a la figura 6A, una capa 36 de GaAs se hace crecer epitaxialmente sobre un material de germanio 38. Se puede iniciar un plano de clivaje 34 en el material de germanio. Un sustrato receptor 20 está unido a la capa de GaAs 36, como se representa en la figura 6B, y el sustrato recibido se separa del material de germanio 38 efectuando por ello transferencia de capa de la capa de GaAs 36 al sustrato receptor. También se transfiere una cantidad residual del material de germanio, como se ilustra en la figura 6C, y éste se puede quitar. En particular, al menos una parte final del material residual de germanio se puede quitar usando un ataque selectivo al que el GaAs es insensible, dando lugar a la estructura de la figura 6D en la que una capa de GaAs fina expuesta está unida al sustrato receptor. Algunas variaciones de esto, ya presentadas con respecto al material de germanio crecido en GaAs, incluyen: formar el plano de clivaje en el GaAs en lugar del material de germanio; y usar rectificado para quitar todo o un volumen de la pastilla donante que lleva la superficie de material de germanio.

La técnica ilustrada en las figuras 6A-6D que no es parte de la invención se puede aplicar a una pila de capas epitaxiales alternas de un material de germanio y GaAs similar al mostrado en la figura 4, para llevar a la práctica transferencia de capa de sucesivas capas de GaAs a partir de un solo sustrato donante. La técnica también se puede aplicar a una capa de GaAs formada sobre un sustrato de germanio.

Una capa de material de germanio formada según la invención puede ser usada como parte de una célula fotovoltaica. La figura 7 ilustra dicha célula en la que un sustrato receptor que puede ser o incluir una capa de metal lleva una capa de material de germanio en la que se forma, o es parte de una unión fotovoltaica de germanio 40. Se puede formar monolíticamente más uniones fotovoltaicas sobre la unión de germanio, por ejemplo una unión de GaAs 42 seguida por una unión de InGaP 44 para formar una célula solar de triple unión. Típicamente, cada unión fotovoltaica superyacente tendrá una energía de banda prohibida más alta que cada unión subyacente, de modo que luz de longitud de onda más larga se propague a uniones subyacentes para absorción y conversión a potencia eléctrica en una banda prohibida más óptima. Los contactos eléctricos, las capas de unión, las capas ventana y similares no se representan en la figura 7 por razones de simplicidad, pero es claro que se pueden incluir cuando sea apropiado según la práctica usual y el conocimiento de los expertos.

Con referencia a las figuras 8A y 8B se ilustra una técnica que no es parte de la invención por la que una capa de un material de germanio no ajustado en red a GaAs se puede formar y transferir a un sustrato alternativo, usando técnicas y materiales como ya se ha descrito anteriormente. Una primera capa de un material de germanio 52, tal como SiGe, que se ajusta sustancialmente en red a GaAs o Ge se hace crecer epitaxialmente sobre un sustrato donante 50, que puede ser típicamente un sustrato de GaAs o Ge. Para ajustarse sustancialmente en red a GaAs al objeto de minimizar defectos, el SiGe deberá tener una fracción de silicio de aproximadamente 0,02, o más generalmente en el rango de cero a aproximadamente 0,04, aunque también se puede aplicar otros criterios expuestos en otro lugar en este documento. Luego se forma un grado de SiGe 54 en el que la fracción de silicio se incrementa cuando el grado se hace crecer hacia arriba, de modo que la fracción de silicio esté más alta encima del grado que en la primera capa 52. Después se hace crecer una segunda capa 56 de SiGe que tiene una fracción de silicio ajustada a la parte superior del grado 52.

Después se usa una técnica de transferencia de capa para transferir material de la segunda capa de SiGe 56 a un sustrato receptor 60. Esto puede implicar transferir toda la estructura de material de germanio, incluyendo algún material de GaAs residual, al sustrato receptor, o transferir la segunda capa 56 de SiGe con algo de material de SiGe residual a partir del grado 52. La técnica de transferencia de capa puede usar un plano de clivaje para quitar masa del material, o se puede usar una técnica de rectificado para esta finalidad, o se puede usar alguna otra técnica de transferencia de capa. Finalmente, se puede quitar cualquier material residual del sustrato donante o grado que también se lleve a cabo en el proceso de transferencia de capa, y la cara expuesta de la capa de SiGe transferida se puede pulir y preparar de otro modo cuando sea necesario para uso adicional. El sustrato receptor puede tomar una variedad de formas como se expone en otros ejemplos anteriores. El sustrato donante puede ser de diferentes composiciones y constantes de red, pero por lo general la parte inferior del grado de SiGe deberá ajustar el sustrato en constante de red.

En una variación en la técnica ilustrada en las figuras 8A y 8B que no es parte de la invención, se puede hacer

crecer una capa de material de germanio deformado 62 en lugar del material de germanio ajustado en red 56, como se representa en las figuras 9A y 9B. Por ello se transfiere una capa de material de germanio deformado 62 al sustrato receptor como se representa en la figura 9B. En particular, la capa 62 puede estar deformada por compresión. El material de germanio deformado puede ser, por ejemplo, SiGe deformado o Ge deformado.

5 Las capas de material de germanio deformadas por compresión pueden ser beneficiosas en términos de mejor movilidad de portadores en comparación con los equivalentes no deformados.

10 La transferencia de capa de SiGe sobre un grado de SiGe en GaAs o Ge permite producir material de fracción de Ge alto con menos grado que los métodos convencionales que empiezan con un sustrato de silicio y aumentan gradualmente la fracción de Ge al nivel requerido. En consecuencia, se puede lograr fracciones de Ge alto, por ejemplo más de 0,7, con menos defectos de dislocación y sin la necesidad de una etapa CMP intermedia para reducir defectos de apilamiento y restablecer la planaridad superficial.



**REIVINDICACIONES**

1. Un método de formar una película fina de un material de germanio, incluyendo:

5 hacer crecer epitaxialmente dicho material de germanio sobre una superficie de GaAs, soportándose dicha superficie por un sustrato donante;

realizar transferencia de capa del material de germanio desde el sustrato donante a un sustrato receptor con GaAs residual procedente de junto a dicha superficie unida a dicho material de germanio transferido; y

10 quitar el material residual unido dejando solamente el material de germanio sobre el sustrato receptor,

**caracterizado porque** el material de germanio es germanio de silicio sustancialmente ajustado en red a GaAs, indicado como  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  de tal manera que x sea del rango de 0,01 a 0,03.

15 2. El método de la reivindicación 1, donde el crecimiento del material de germanio incluye:

hacer crecer un grado de SiGe sobre un sustrato donante, siendo el grado de SiGe de una primera composición de SiGe a una segunda composición de SiGe; y

20 hacer crecer epitaxialmente otra capa de material de germanio sobre el grado de SiGe;

donde la primera composición está sustancialmente ajustada en red a GaAs, y la segunda composición tiene una fracción de silicio más alta que el primer material e incluyendo además el método realizar transferencia de capa de al menos parte del material de germanio a un sustrato receptor.

25 3. El método de cualquier reivindicación precedente, donde el sustrato receptor incluye una capa aislante y la transferencia de capa de la capa de transferencia del material de germanio es sobre la capa aislante para formar un material de germanio sobre sustrato aislante, donde el sustrato receptor es un sustrato de silicio y la capa aislante incluye un óxido de silicio.

30 4. El método de cualquier reivindicación precedente, donde el paso de realizar transferencia de capa incluye uno de los siguientes:

35 rectificar al menos parte del sustrato donante para dejar GaAs residual de junto a dicha superficie unido a dicho material de germanio transferido;

implantar iones para iniciar una capa de clivaje en el GaAs debajo de dicha superficie, unir el material de germanio al sustrato receptor, y separar el sustrato receptor del sustrato donante a lo largo de la capa de clivaje dejando GaAs residual de junto a dicha superficie unido a dicho material de germanio transferido; e

40 implantar iones para iniciar una capa de clivaje en el material de germanio encima de dicha superficie, unir el material de germanio al sustrato receptor, y separar el sustrato receptor del sustrato donante a lo largo de la capa de clivaje dejando material de germanio residual de junto a dicha superficie unido a dicho GaAs.

45 5. El método de cualquier reivindicación precedente, donde el paso de quitar el material residual unido incluye quitar el material residual por ataque químico selectivo al que el material de germanio no es sensible para exponer el material de germanio subyacente.

50 6. El método de cualquier reivindicación precedente, donde la superficie del GaAs es la superficie de un sustrato donante de GaAs, o la superficie de una capa crecida epitaxialmente de GaAs.

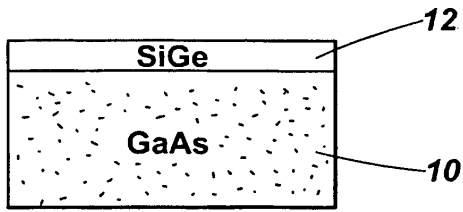
55 7. El método de la reivindicación 6 incluyendo: hacer crecer epitaxialmente una pluralidad de capas alternas de dicho GaAs y material de germanio, y después de hacer crecer todas las capas, realizar dichos múltiples pasos de transferencia de capa cada una a un sustrato receptor separado y dichos múltiples pasos correspondientes de quitar material residual unido.

60 8. El método de la reivindicación 2, donde la transferencia de capa incluye transferencia de capa de al menos una porción del grado de SiGe y material residual del sustrato donante.

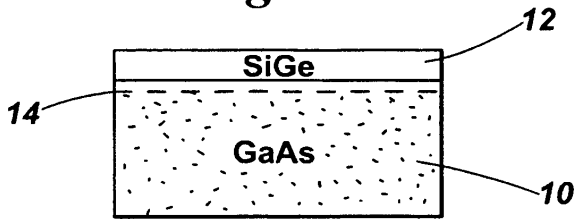
9. Un método de formar una célula fotovoltaica incluyendo realizar los pasos de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8 y formar monolíticamente una o más uniones fotovoltaicas en al menos parte del material de germanio transferido.

65 10. Un método de formar uno de un dispositivo optoelectrónico, un dispositivo CMOS basado en Ge total o parcialmente empobrecido, y un dispositivo III/V sobre silicio, incluyendo los pasos de cualquiera de las

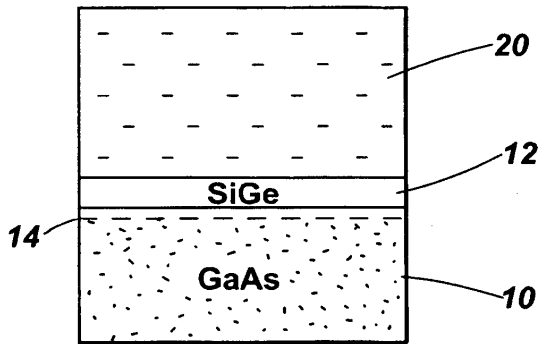
reivindicaciones 1 a 8.



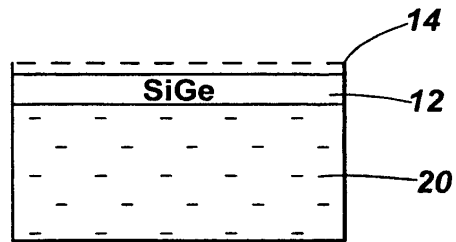
*Fig. 1A*



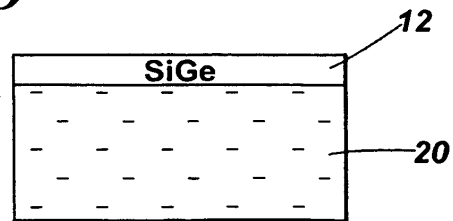
*Fig. 1B*



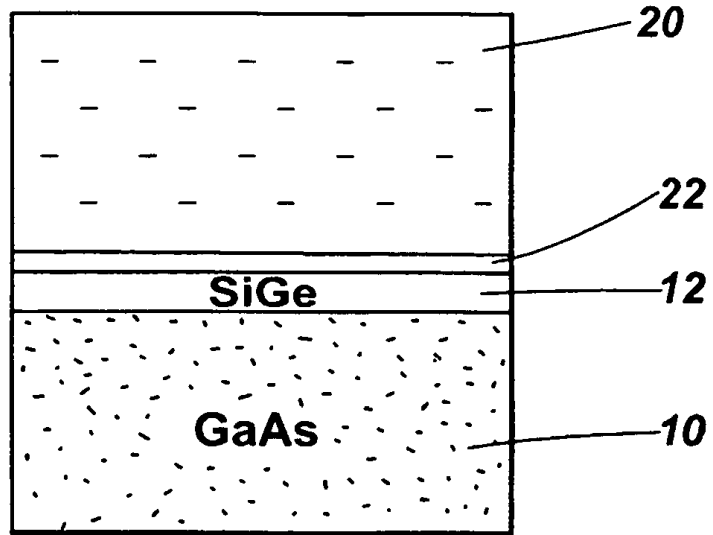
*Fig. 1C*



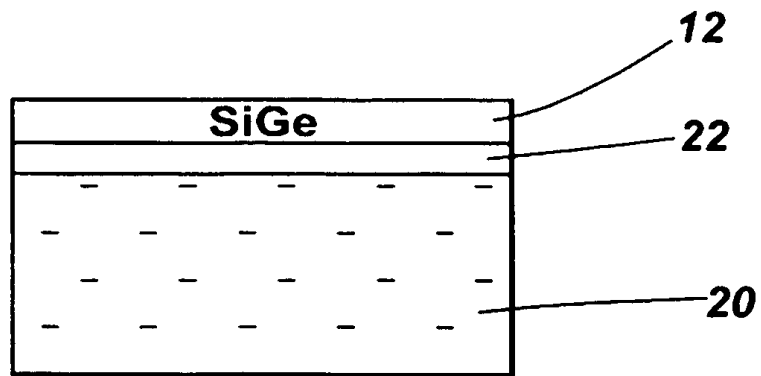
*Fig. 1D*



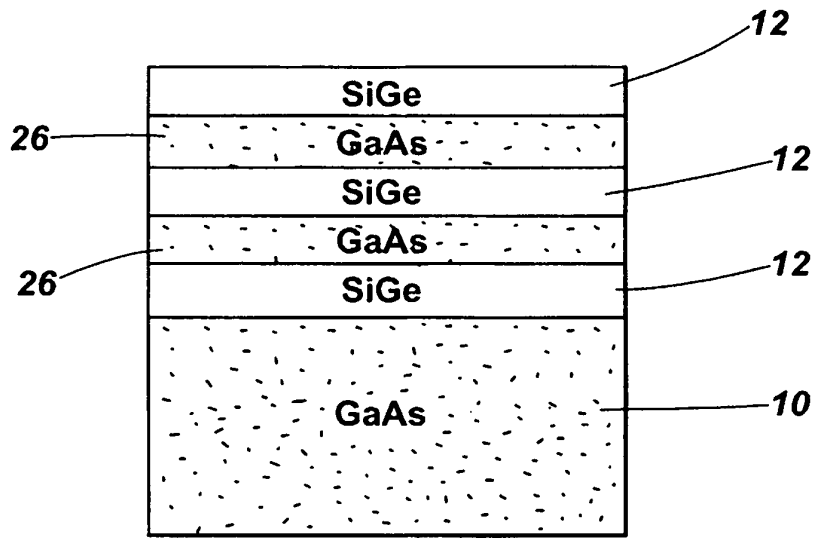
*Fig. 1E*



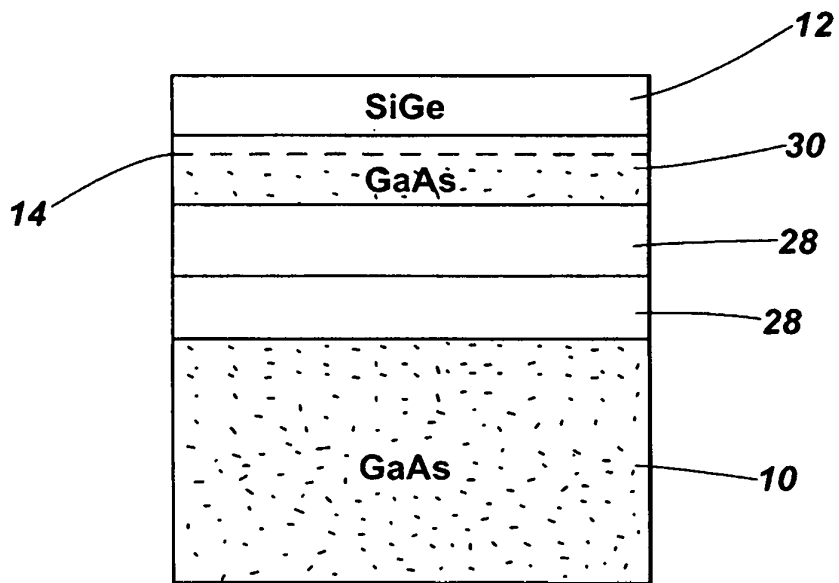
*Fig. 2A*



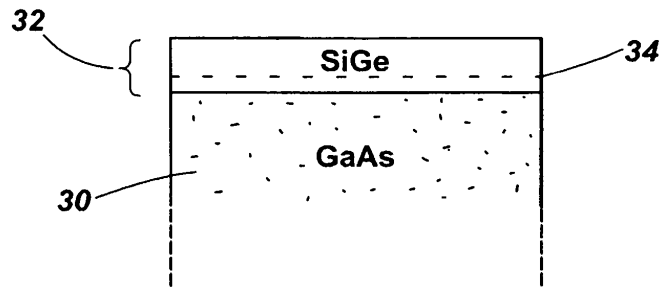
*Fig. 2B*



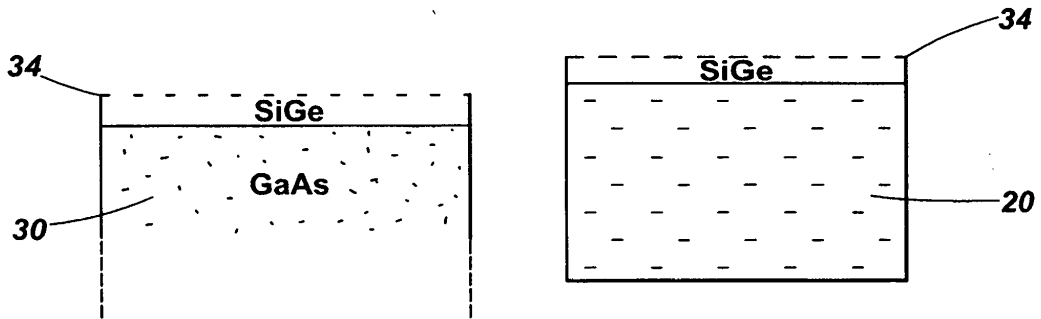
*Fig. 3*



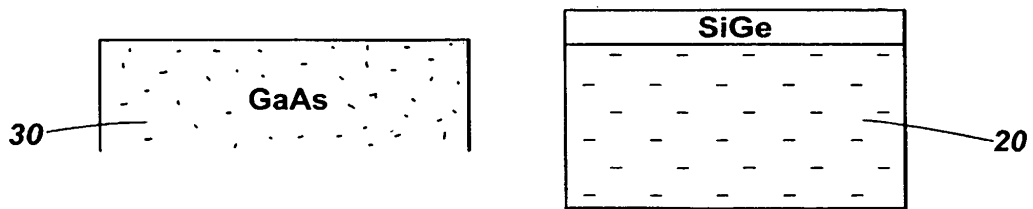
*Fig. 4*



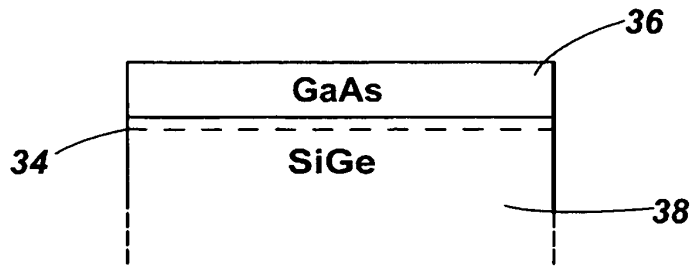
*Fig. 5A*



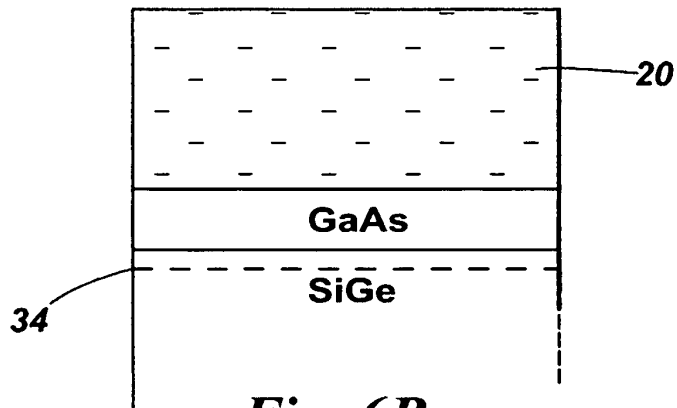
*Fig. 5B*



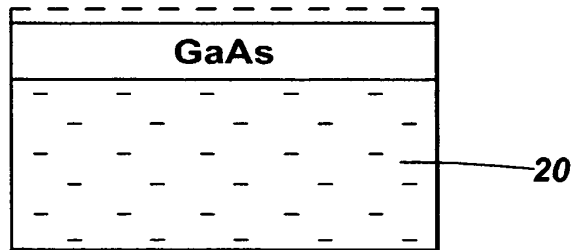
*Fig. 5C*



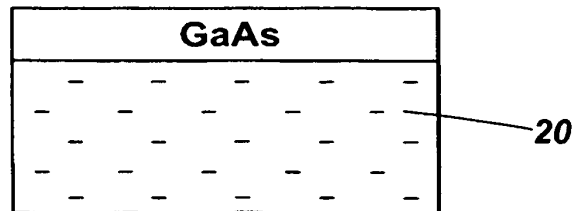
*Fig. 6A*



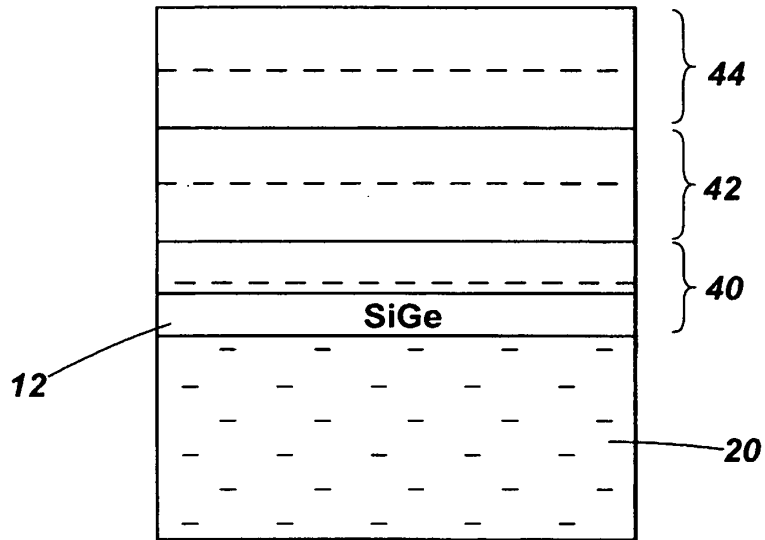
*Fig. 6B*



*Fig. 6C*

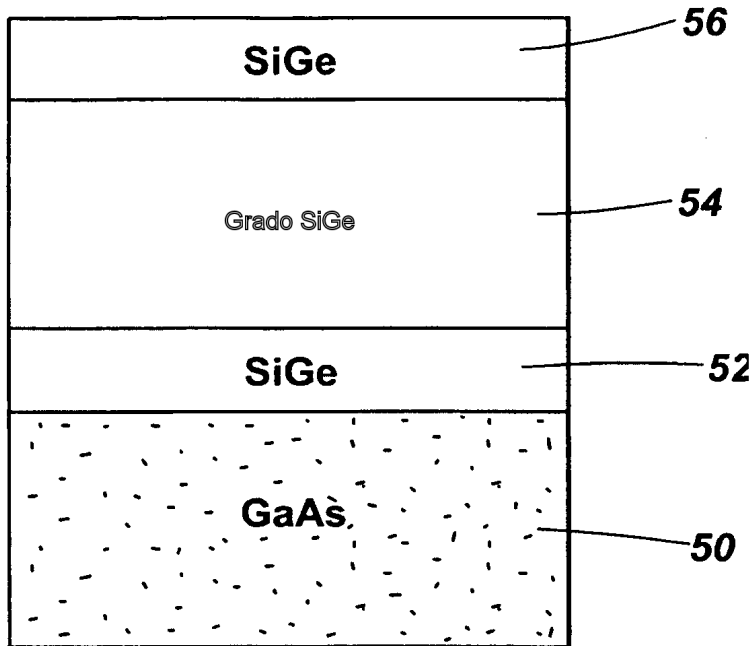


*Fig. 6D*

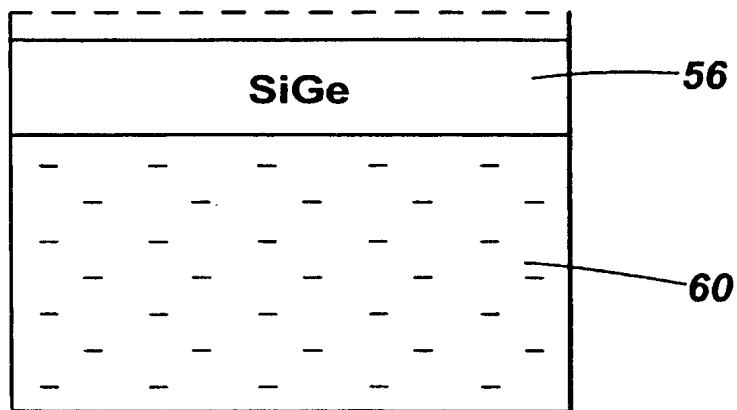


**Fig. 7**

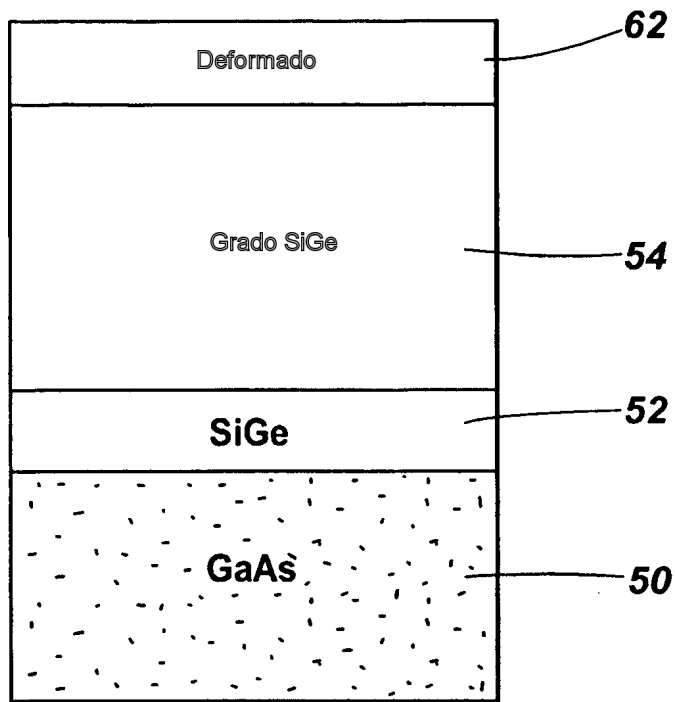




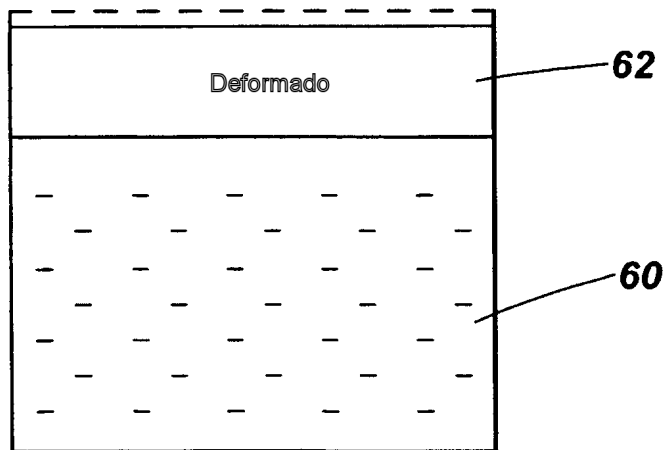
*Fig. 8A*



*Fig. 8B*



*Fig. 9A*



*Fig. 9B*