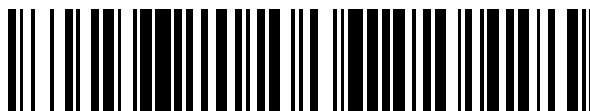


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 852 725**

51 Int. Cl.:

**H01L 31/0288** (2006.01)

**H01L 31/18** (2006.01)

**C30B 29/06** (2006.01)

**C30B 31/04** (2006.01)

**C30B 28/04** (2006.01)

**H01L 21/00** (2006.01)

**H01L 31/068** (2012.01)

12

## TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **14.10.2015** **PCT/US2015/055460**

87 Fecha y número de publicación internacional: **04.08.2016** **WO16122731**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.10.2015** **E 15880612 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **02.12.2020** **EP 3251146**

54 Título: **Procedimiento para crear una oblea semiconductora que tiene dopado perfilado**

30 Prioridad:

**26.01.2015 US 201562107711 P**

**08.10.2015 US 201562239115 P**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**14.09.2021**

73 Titular/es:

**1366 TECHNOLOGIES INC. (100.0%)**

**6 Preston Court  
Bedford, MA 01730, US**

72 Inventor/es:

**JONCZYK, RALF;  
KERNAN, BRIAN, D.;  
HUDELSON, G. D. STEPHEN;  
LORENZ, ADAM, M. y  
SACHS, EMANUEL, M.**

74 Agente/Representante:

**GONZÁLEZ PECES, Gustavo Adolfo**

ES 2 852 725 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

Procedimiento para crear una oblea semiconductora que tiene dopado perfilado

## Documentos relacionados

- 5 Una oblea semiconductora puede ser formado directamente a partir de una masa fundida de semiconductores, en general usando las técnicas divulgadas en la Patente de los Estados Unidos No. 8.293.009, emitida el 23 de octubre de 2012, titulada METHODS FOR EFFICIENTLY MAKING THIN SEMICONDUCTOR BODIES FROM MOLTEN MATERIAL FOR SOLAR CELLS AND THE LIKE, de Sachs, et al.

10 Los colectores solares convencionales se componen de obleas semiconductoras que tienen una porción relativamente más espesa, en la cual hay portadores mayoritarios, por ejemplo, orificios en celosía, y una sección mucho más delgada en la cual el tipo opuesto de portador, en ese caso, electrones, son los portadores mayoritarios. Las dos porciones se encuentran en lo que se llama la unión p/n. En una oblea estándar de industria de 180 micrones de espesor, la porción de tipo p tendría 180 micrones de espesor, y la porción de tipo n tendría aproximadamente 0,5 micrones de espesor. En tales obleas convencionales, el dopado es uniforme a lo largo de la porción más espesa de la oblea, tal como la porción de tipo p, dopada con aceptores (orificios) en una oblea de tipo p, tal como una oblea de silicio dopado con boro. En tal colector, los portadores de carga minoritarios son libres de moverse de una manera esencialmente aleatoria, difundiéndose aleatoriamente desde su punto de generación (en cada porción, pero aquí la preocupación principal es con la porción más espesa). Algunos portadores minoritarios pueden ir hacia la región de recolección de unión p/n, algunos, en otras direcciones. Tal situación carece de eficiencia. Se conoce que establecer un campo eléctrico que impulsaría a los portadores de carga minoritarios hacia la región de recolección de unión p/n podría, siendo las otras cosas iguales aumentar la eficiencia. Se dice que tal campo eléctrico apunta hacia la unión p/n y produciría que los portadores de carga minoritarios generados se muevan preferentemente hacia la unión p/n de recolección. Esta preferencia direccional aumentaría la eficiencia de recolección de la célula solar. Se cree que este efecto no puede ser logrado mediante ningún procedimiento de solidificación de masa fundida convencional usado para cortar obleas de lingotes o ladrillos gruesos. Tal campo a veces se denomina como un campo de deriva.

25 Un intento conocido de crear tal campo eléctrico de deriva en una oblea estableció un gradiente de dopado, que estableció un campo eléctrico que apuntaba hacia la unión p/n de recolección. Este trabajo conocido se describe en la solicitud de patente PCT no PCT/NL2005/000422, publicada como WO2005122287A1, titulada, Method for the production of crystalline silicon foils. Esta solicitud de patente fue asignada a Stichting Energie, y el trabajo se denomina a continuación como el trabajo de Stichting. El trabajo de Stichting tuvo efectos negativos significativos. El principal material semiconductor era silicio, y el dopante era galio. Un perfil de nivel de dopado fue creado mediante el enfriamiento rápido de un cuerpo fundido, donde el enfriamiento rápido inicial dio como resultado una segregación afectada en la superficie inicialmente solidificada y a medida que el enfriamiento disminuyó, el galio se segregaría preferentemente lejos de la superficie solidificada subsecuentemente más adelante, debido al coeficiente de segregación de equilibrio significativo del galio (aproximadamente 0,008). La segregación afectada implica que el enfriamiento ocurre lo suficientemente rápido de tal manera que el coeficiente de segregación real de la impureza de galio es más de 10 veces mayor que el coeficiente de segregación de equilibrio. Un coeficiente de segregación de 1 significa que no hay preferencia de segregación entre las fases líquida y sólida, lo que representa el valor máximo para el coeficiente de segregación. Para un dopante de segregación débil tal como boro, que, como un coeficiente de equilibrio de 0,8, el aumento máximo del mecanismo de disfunción sería solamente 1,25 veces.

40 Una consecuencia necesaria de este enfriamiento rápido no se menciona en la solicitud de patente de Stichting, pero es evidente para un profesional experto. Las impurezas metálicas dentro del material fundido también serían incorporadas necesariamente en el sólido del cristal semiconductor enfriado y solidificado inicialmente de manera rápida en un grado grande e inaceptable. El procedimiento de trabajo de Stichting aprovecha el coeficiente de segregación relativamente significativo, (numéricamente muy pequeño), del galio para lograr el gradiente en concentración. Pero las impurezas metálicas también tienen unos coeficientes de segregación relativamente significativos (numéricamente muy pequeños), y para que el galio esté presente en un grado suficiente para proporcionar un perfil de dopado usable, también sería necesariamente que cualquier impureza metálica también estaría presente en el cristal solidificado en un grado alto, y de este modo, inaceptable. De este modo, aunque se crearía un perfil de dopado mediante el procedimiento de Stichting, ningún cuerpo formado sería prácticamente útil para la captación solar, que tendría impurezas en un grado de al menos un orden de magnitud mayor de contenido de metal en relación con la segregación de equilibrio.

55 Expresado de manera ligeramente diferente, para lograr una diferencia de 10 veces (un orden de magnitud) en el dopado de una porción de una oblea a otra, el procedimiento de Stichting tendría inherentemente este mismo factor, es decir, 10 veces más metal en la región de mayor dopado, que estaría presente en la región de menor dopado. Los profesionales en la técnica entienden que un contenido de metal tan alto (y también un contenido de metal tan variado (u otras impurezas)) tiene efectos nocivos graves. Por ejemplo, la vida útil de portadores minoritarios sería menor de lo que sería de otra manera en la ausencia de estas impurezas. Tal vida útil menor da como resultado una célula que funciona menos bien que una con vida útil más alta.

Un caso hipotético pero razonable ilustra los problemas. Considerar un caso en donde hay 1ppm de metal en la masa fundida, con un coeficiente de segregación de equilibrio de  $k = 10^{-6}$ , por ejemplo, hierro (Fe). Con el procedimiento de Stichting, esto daría como resultado  $5 \times 10^{11}$  átomos/cm<sup>3</sup> de metal en la oblea. Esto daría como resultado una vida útil de portador minoritario de aproximadamente 7 microsegundos, lo que conduce a una eficiencia de 16,4%.

- 5 Otro tipo de campo impuesto a las obleas usadas en colectores solares conocidos se denomina un campo de superficie posterior (BSF). Las células convencionales a menudo tienen un campo de superficie posterior. Este campo baja la velocidad efectiva de recombinación de superficie posterior y mejora la probabilidad de recolección de portadores minoritarios. Una forma típica de lograr esto es proporcionar una capa delgada de aluminio o aleación de aluminio en la superficie posterior durante el procesamiento. La aplicación de aluminio tiene desventajas. Primero, es una etapa separada en el procesamiento, añadiendo de esa manera una complicación que estaría ausente si no fuera requerida tal capa de aluminio. Segundo, el aluminio es un reflector bastante pobre de luz de longitud de onda larga. De este modo, cuando está presente una capa de superficie posterior de aluminio, una cantidad relativamente alta de tal luz de longitud de onda larga no se refleja, y se pierde. Sería beneficioso poder reflejar y de este modo capturar algo o la totalidad de tal luz de longitud de onda larga. (Como un punto de clarificación, debe anotarse que la discusión de BSF conlleva la repulsión, o reflexión de dos entidades totalmente diferentes-portadores minoritarios son impulsados lejos de la superficie posterior por el BSF. Ciertos fotones no se reflejan adecuadamente desde la superficie posterior, debido a que son absorbidos o al menos, no reflejados, por la capa de aluminio que da lugar al BSF).

- 20 El documento "Fabrication of polycrystalline Si wafer by vacuum casting and the effect of mold coating materials", G.H. Lee et al., Journal of Crystal Growth 233 (2001) 45-51, describe un procedimiento para hacer una oblea semiconductora empujando una masa fundida en un molde, estando el molde recubierto con BN.

- 25 De este modo, hay una necesidad de obleas semiconductoras que tengan un medio para establecer un campo eléctrico en una dirección para impulsar a los portadores de carga minoritarios (principalmente en la porción más espesa de la oblea) a la unión p/n de recolección. Hay una necesidad adicional de tales obleas que tengan excelentes propiedades eléctricas y niveles aceptablemente bajos de impurezas. También hay una necesidad de tales obleas dopadas mediante dopantes que no tengan un coeficiente de segregación significativo. También hay una necesidad de tales obleas perfiladas con dopante de semiconductor de tipo p, y también de semiconductor de tipo n. Hay una necesidad adicional de un procedimiento de fabricación de tales obleas. También hay una necesidad de colectores solares y paneles solares que incorporen tales obleas.

- 30 También hay una necesidad de obleas para uso en células solares en las cuales pueda ser establecido un BSF sin requerir una etapa de procesamiento dedicada a ese propósito, y también sin requerir una capa de aluminio reflectante de manera ópticamente pobre en la superficie posterior. Hay una necesidad adicional de tal oblea que pueda ser construida para permitir la reflexión de una cantidad relativamente alta de luz de longitud de onda larga y de este modo su captura dentro de la oblea y célula.

- 35 De este modo, el objeto de la invención es un procedimiento para fabricar una oblea semiconductora para uso como un colector solar como se define por la materia objeto de la reivindicación 1.

Este objeto es logrado mediante la invención que se muestra más completamente en las diversas Figuras del Dibujo, las cuales son:

#### Sumario de figuras

- 40 La figura 1A, que muestra, esquemáticamente, en sección transversal, un molde que es tratado con un agente de dopado que se aproxima a una masa fundida de material semiconductor;

La figura 1B, que muestra, esquemáticamente, en sección transversal, el molde tratado de la figura 1A puesto en contacto con la masa fundida, con la porción superior de la masa fundida que tiene algo del material de tratamiento entrando en la masa fundida;

- 45 La figura 1C, que muestra, esquemáticamente, en sección transversal, el molde tratado de la figura 1B todavía puesto en contacto con la masa fundida, con una oblea solidificándose sobre el molde, y con una porción mayor de la masa fundida que la que se muestra en la figura 1B que tiene algo del material de tratamiento entrando en la porción mayor de la masa fundida;

- 50 La figura 1D, que muestra, esquemáticamente, en sección transversal, el molde tratado de la figura 1C todavía puesto en contacto con la masa fundida, con una cantidad más espesa de oblea solidificándose sobre el molde, y con una porción aún mayor de la masa fundida que la que se muestra en la figura 1C que tiene algo del material de tratamiento entrando en la porción mayor de la masa fundida;

La figura 2A, que muestra esquemáticamente en sección transversal, una oblea formada sobre el molde como se muestra en la figura 1D, con un perfil de gradiente de dopado;

La figura 2B, que muestra esquemáticamente en sección transversal, la oblea de la figura 2A después de que ha sido añadido un dopado de material de tipo n a un lado, formando de esa manera una unión p/n, y ha sido formada una región de mayor dopado en el lado opuesto del material de tipo n, que dará lugar a un BSF;

5 La figura 3, que muestra, esquemáticamente, en sección transversal, un molde de una invención de la presente, que está tratado con material de dopado a lo largo de su volumen;

La figura 4, que muestra, esquemáticamente, en sección transversal, un molde de una invención de la presente, que está tratado con material de dopado en un par de capas o recubrimientos sobre y cerca de una superficie;

10 La figura 5, que muestra, en forma gráfica, una relación entre el número de aceptores ( $\text{Na}/\text{cm}^3$ ) y la posición desde el lado del molde, de obleas representativas fabricadas de acuerdo con las invenciones de la presente;

La figura 6A, que muestra, esquemáticamente en sección transversal, una oblea de la técnica anterior para uso en un colector solar, con un electrodo de superficie posterior de aleación de Aluminio;

15 La figura 6B, que muestra, esquemáticamente en sección transversal, una oblea de una invención de la presente, para uso en un colector solar, con una superficie posterior altamente dopada debido a un perfil de dopado, sin un electrodo de superficie posterior de aleación de Aluminio, pero con un electrodo de rejilla abierta y un reflector óptico de alta eficiencia;

La figura 7, que muestra, en forma gráfica la relación entre la Eficiencia Cuántica, en comparación con la longitud de onda de luz incidente, para dos configuraciones diferentes, incluyendo las mostradas en las figuras 6A y 6B;

20 La figura 8A es una representación esquemática de una oblea de una invención de la presente, que muestra la segregación de átomos dopantes de compensación de donante en los límites de grano; y

La figura 8B es una representación esquemática de una oblea de una invención de la presente mostrada en la figura 8A, que también muestra la segregación de átomos dopantes de contracomensación de aceptor en los límites de grano.

## 25 Sumario

Aunque la expresión "invenciones" se menciona en algún momento en la siguiente divulgación, se recuerda sin embargo que la presente divulgación comprende sólo una invención que está definida por el ámbito de las reivindicaciones.

30 Una oblea es formada en un molde, que está de alguna manera provisto de un dopante. Por ejemplo, el molde puede tener un recubrimiento que contenga un dopante. Para crear una oblea de tipo p usando silicio, un dopante puede ser boro, que proporciona aceptores de electrones extra. Cuando el molde se calienta, el dopante entra en la masa fundida (mediante varias modalidades posibles), dopando de esa manera una región de la masa fundida directamente adyacente al molde, de tal manera que, en esa región adyacente, la concentración del dopante (tal como boro), es relativamente mayor, en comparación con la concentración de dopante en la mayor parte de la masa fundida. Dentro  
35 de muy poco tiempo una oblea semiconductora inicia a solidificarse en la superficie del molde. El dopante, tal como boro, no se difunde significativamente en el silicio sólido. De este modo, después de que es formada una oblea sólida, el dopante ya no puede entrar en la masa fundida desde el molde, debido a que, el silicio sólido en la superficie de molde actúa como una barrera de difusión de dopante de boro. En ese momento y después, la concentración de dopante de boro en la región de la masa fundida adyacente a la superficie de desarrollo de la oblea será menor que la concentración que estaba presente en la región de la masa fundida donde la oblea comenzó primero a formarse. A medida que la oblea continúa desarrollándose, las nuevas regiones adicionales de la oblea son formadas a partir de una nueva región de desarrollo de la masa fundida, que tiene una concentración de dopante de boro, que, con el tiempo, se vuelve continuamente cada vez menos. Esta disminución continua de dopante en cada nueva región de desarrollo sucesiva establece un gradiente de concentración o perfil de dopante de boro, con una mayor concentración  
40 que está presente en la oblea adyacente al molde, que se había solidificado primero, y una menor concentración de boro en el lado de masa fundida de la oblea solidificada, que solidificó en último lugar. El gradiente puede ser adaptado mediante diversos medios. Un gradiente en el dopado daría lugar a un campo eléctrico que apunta en una dirección específica, y cuya fuerza en cualquier ubicación está relacionada con el grado de gradiente en esa ubicación y ubicaciones adyacentes. Tal campo eléctrico puede tener una influencia en los portadores de carga minoritarios en  
50 una oblea usada para un colector solar.

Un perfil de concentración de gradiente puede ser útil para crear un campo de deriva dentro de la oblea. Otro perfil puede ser útil para crear un campo de superficie posterior dentro de la oblea. Las obleas de las invenciones de la presente pueden ser usadas en células solares. Se promueve una mayor eficiencia debido al campo de deriva, que promueve la recolección de portadores dentro de la célula. También surge una mayor eficiencia debido a la provisión  
55 de mejores reflectores en la superficie posterior, hecho posible por el campo de superficie posterior intrínseco que

surge del perfil de dopado, que permite la eliminación de reflectores pobres estándar de industria de elementos de superficie posterior de aleación de Aluminio.

Una característica que se refiere a la concentración de dopado local de una manera determinista es la resistividad local. También está presente un gradiente en resistividad, y midiendo la resistividad en diferentes ubicaciones, puede ser determinada la concentración. De este modo, una forma equivalente de pensar y analizar un gradiente en la concentración de dopante y de este modo un gradiente generado de campo eléctrico es considerar el perfil de resistividad, de una superficie de una oblea a la otra.

Las invenciones de procedimientos incluyen procedimientos para hacer tal oblea a partir de una masa fundida. Las invenciones de procedimientos también incluyen hacer una pluralidad de tales obleas a partir de la misma masa fundida, que incluyen las etapas para compensar dentro de la masa fundida la acumulación de dopante primario dentro de la masa fundida que de otro modo sería demasiado alta para usar para obleas que se hacen a una concentración neta de dopante objetivo para alcanzar la resistividad en volumen objetivo para uso en células solares. La compensación es lograda proporcionando a la masa fundida un dopante de compensación del tipo aceptor/donante opuesto (por ejemplo, para compensar el dopante aceptor de boro, puede ser usado un dopante donante de fósforo), periódicamente a medida que se forman más y más obleas. En algunos casos, el dopante de compensación podría segregarse de manera desproporcionada a los límites de grano, lo cual podría ser desventajoso. En tales casos, una invención de procedimiento de la presente es añadir un dopante de contracompensación (en el caso del sistema de boro (aceptor) y fósforo (donante), un dopante de contracompensación sería un aceptor, tal como galio, con una segregación adecuadamente significativa constante, para minimizar los efectos eléctricos de la concentración del dopante de compensación en los límites de grano.

### Descripción

Como se discutió anteriormente, una oblea semiconductor típica para uso con un colector solar tiene una porción relativamente más espesa, en la cual los portadores mayoritarios son de un tipo donante/aceptor, por ejemplo, típicamente de tipo p. Tales obleas son formadas, y subsecuentemente tratadas de tal manera que una cara es dopada para tener portadores mayoritarios del tipo donante/aceptor opuesto, de este modo, tipo n, en el caso de una oblea principalmente de tipo p. Para una oblea típica la primera porción sería esencialmente el espesor total de 180 micrones, y la otra porción de tipo sería sólo aproximadamente 0,5 micrones de espesor. La unión entre las dos porciones se conoce como la unión p/n. La siguiente discusión trata principalmente de un nuevo procedimiento para hacer la porción relativamente más espesa, que típicamente es una porción de tipo p. Los procedimientos que se discuten a continuación serían usados típicamente para crear tal oblea. La unión p/n y la porción de tipo de portador opuesto se crearían en una superficie después de realizar las etapas de procedimiento discutidas en la presente memoria. Estos procedimientos también podrían ser usados para crear una oblea gruesa, principalmente de tipo n. En tal oblea de una invención de la presente, habrá un perfil de gradiente de dopado desde una cara de la oblea desarrollada a la otra. Este perfil de gradiente de dopado dará lugar a un campo eléctrico en la oblea desarrollada terminada, cuyo campo puede actuar como un campo de deriva, y también o alternativamente como un campo de superficie posterior (BSF).

Las figuras 1A, 1B, 1C y 1D muestran un molde 110 (también llamado a veces un sustrato), que está de alguna manera provisto de un dopante, sobre el cual será formada una oblea 100 (figura 2A). Por ejemplo, el molde 110 puede tener un recubrimiento 112 que contiene un dopante 114. Para crear una oblea de tipo p usando silicio fundido, el dopante puede ser boro (que es un aceptor portador de carga). Una realización alternativa, mostrada esquemáticamente en la figura 3 tiene un molde 310 con un dopante 314 distribuido ya sea de manera uniforme o de algún otro modo a lo largo de su cuerpo. A continuación, se discuten varias realizaciones diferentes de tratamiento dopante de molde. El principal uso típico de las invenciones de la presente sería con obleas semiconductoras de tipo p y de este modo, dopantes aceptores. De este modo, la discusión se centrará principalmente en tales combinaciones. Sin embargo, las invenciones de la presente también pueden ser usadas con semiconductores de tipo n, y dopantes donantes de portadores de carga. (Un ejemplo de tal sistema sería un sustrato dopado con fósforo, con compensación de masa fundida de boro). También es posible aún otra combinación más complicada, y se discute a continuación.

El dopante primario, tal como boro, puede estar en cualquier lugar en la superficie de tal molde 110, o dentro del cuerpo de tal molde 310. Sin embargo, se cree que, si está presente en una región del molde más cercana a la masa fundida, tal como un recubrimiento 112 o una región dentro del cuerpo 310 inmediatamente adyacente a la superficie, que esto proporciona la mayor ventaja, como se discute a continuación. Pueden ser usados muchos semiconductores diferentes como el componente de masa fundida principal. El silicio es usado muy comúnmente, y será usado como un ejemplo representativo en la siguiente discusión. Asimismo, son posibles otros dopantes. El boro será usado como un ejemplo de dopante representativo en la siguiente discusión. Sin embargo, la generalidad de esta divulgación no está prevista para ser limitada al silicio como el semiconductor o al boro como el dopante. Todas las alternativas razonables son consideradas como aspectos de las invenciones de la presente. Por ejemplo, para el Silicio como el semiconductor, ejemplos de dopantes incluyen, pero no se limitan a: boro (B), aluminio (Al), galio (Ga) e indio (In). Para las obleas de tipo n, los dopantes incluyen, pero no se limitan a: Fósforo (P), Arsénico (As), plomo (Sb) y Bismuto (Bi).

Cuando el molde 110 se calienta, tal como cuando entra en contacto con la masa fundida 116 semiconductor caliente, por ejemplo de silicio fundido, el dopante, tal como boro 314 dentro del molde (figura 3) o el boro 114 del recubrimiento

112 de molde entra en la masa fundida 116, dopando de esa manera una región 118b de la masa fundida 116 directamente adyacente al molde 110, de tal manera que adyacente al molde, la concentración del boro 114b, es relativamente mayor, en comparación con la concentración de boro en el volumen (regiones restantes) 120 de la masa fundida 116. Se discutirán en primer lugar una realización como se muestra en las figuras 1A, 1B, 1C y 1D, que usa un recubrimiento 112. Como se muestra en la figura 1C, dentro de un tiempo muy corto (por ejemplo, unos pocos milisegundos a varios segundos) una oblea 100 semiconductora (por ejemplo, silicio), inicia a solidificarse en la superficie 122 del molde 110.

El molde podría ser calentado de otras formas (por ejemplo, puede ser precalentado antes de entrar en contacto con la masa fundida). Típicamente es ventajoso que el molde esté más frío que la masa fundida cuando toca el silicio líquido para permitir mejor extracción de calor y por lo tanto solidificación del silicio fundido. Este proceso de solidificación calentará el molde desde su temperatura de partida.

El boro no se difunde significativamente en el silicio sólido. De este modo, como se muestra en la figura 1C, después de que es formada una oblea 100 sólida, el boro 114 ya no puede entrar en la masa fundida 116 desde el molde/sustrato 110, debido a que, se ha formado silicio 100 sólido en la superficie 122 de molde y el silicio sólido actúa como una barrera de difusión de boro. (Este es también típicamente el caso de otros dopantes y sistemas de obleas semiconductoras discutidos en la presente memoria). Típicamente, un espesor de unos pocos micrones de material sólido es suficiente para evitar una difusión adicional. Este espesor puede aparecer inicialmente en ubicaciones espaciadas en la superficie de molde, pero de manera relativamente rápida, el espesor solidificado en todas partes en molde es suficiente para evitar una difusión adicional. En ese momento, la concentración de boro 114c en la región 118c de la masa fundida 116 adyacente a la superficie 111 de desarrollo de la oblea 100 será menor que la concentración 114b que estaba presente en la región 118b donde la oblea 100 comenzó primero a formarse, inmediatamente después de que la superficie 122 de molde entrara en contacto con la masa fundida 116, como se muestra en la figura 1B, debido a que los átomos de boro 114c se han difundido y movido por convección lejos del molde 110 y de la oblea 100 en desarrollo y lejos de la región 118c adyacente al molde 110 y de la superficie 111 de desarrollo de la oblea 100, en la masa fundida 116.

A medida que la oblea 100 continúa desarrollándose (es decir, espesándose) durante una escala de tiempo de los siguientes pocos segundos, las nuevas regiones adicionales de la oblea 100 de formación son formadas en la superficie 111, a partir de una nueva región 118c, 18d de desarrollo de la masa fundida adyacente a la superficie 111 de desarrollo, cuya nueva región 118d de desarrollo tiene una concentración 114d de boro que, con el tiempo, se vuelve continuamente cada vez menos. Para cada cantidad sucesiva de oblea en desarrollo, la nueva región 118 de desarrollo se aleja además muy de manera ligeramente progresiva del molde, la fuente original del dopante. El dopante se ha difundido rápidamente en el volumen 120 de la masa fundida 116, distante del molde 110.

La figura 2A muestra la oblea 100 de silicio desarrollada. La disminución continua de dopante en cada nueva región 118 de desarrollo sucesiva establece un gradiente de boro dopante en la oblea 100 desarrollada, como se muestra en la figura 2A, con una mayor concentración de boro que está presente en la porción 132 de la oblea que estaba adyacente al molde 110 y su superficie 122 cuando la oblea completó su formación, cuya superficie 132 se había solidificado primero, desde la región 118 de la masa fundida 116, cuando tenía una concentración relativamente más alta de boro. Hay una menor concentración de boro en la superficie 136 de la oblea 100 solidificada, que solidificó en último lugar, desde la región 118 de la masa fundida (relativamente distante de la superficie 122 de molde, con el contenido de boro en esa ubicación) en un momento cuando y una ubicación donde la masa fundida tenía una concentración relativamente más baja de boro.

La discusión anterior se formula en términos de regiones sucesivas de oblea 100 desarrollada y nuevas regiones 118 de desarrollo sucesivas de la masa fundida, como si estas regiones de desarrollo fueran discretas, en capas, tales como láminas de papel. En la realidad, el desarrollo de la oblea es continuo, átomo por átomo, y la difusión del dopante en la masa fundida también es continua, átomo por átomo. La cantidad de dopante que se incorpora a la oblea en desarrollo depende de las tasas relativas de difusión del dopante en la masa fundida, lejos de y fuera de las nuevas regiones de desarrollo continuamente sucesivas de la masa fundida, y la tasa de desarrollo de la oblea semiconductora. Estas dos tasas son afectadas por las propensiones a la difusión del dopante en la masa fundida, la temperatura, las velocidades de desarrollo de cristales, etc. De este modo, la concentración de boro en la oblea varía suavemente, desde la superficie 132, que se formó más cerca del molde, hasta la superficie 136, que se formó de manera más distante del molde, más profunda dentro de la masa fundida. (La figura 2A muestra tres regiones diferentes de la oblea formada, con tres concentraciones discretas diferentes de dopante, estando la concentración indicada por la cercanía de las líneas horizontales sombreadas, indicando el sombreado más cercano una mayor concentración de dopante. Esto no pretende representar de manera realista la oblea formada, sino que es simplemente una limitación de los dibujos, que deben mostrar en blanco y negro una situación física que podría ser mostrada mejor en una secuencia de escalas de grises desde la superficie 132, que se formó adyacente al molde, a la superficie 136, que se formó más distante del molde).

La figura 5 muestra la concentración de dopado de tipo p para dos obleas diferentes (designadas oblea 1 y oblea 2), cada una mostrando una concentración de aproximadamente  $1 \times 10^{19} \text{ N}_a/\text{cm}^3$  en la porción de la oblea que se formó primero, inmediatamente adyacente al molde, descendiendo en una curva suave con una forma de desintegración aproximadamente exponencial, con concentraciones de  $\text{N}_a/\text{cm}^3$  de entre aproximadamente  $1 \times 10^{17}$  y  $1,5 \times 10^{17}$  en un

intervalo de posiciones de aproximadamente 25 a aproximadamente 150 micrones desde la porción de la oblea que se formó primero, inmediatamente adyacente al molde. Se cree que es posible un  $N_a$  tan alto como  $1 \times 10^{20} N_a/\text{cm}^3$ , y también en la ubicación de la oblea que se formó en último lugar, la más alejada del molde, se cree que las concentraciones tan bajas como  $1 \times 10^{15} N_a/\text{cm}^3$  son posibles. La unidad  $N_a$  representa el número de aceptores, como en aceptores de electrones. Para un dopante de tipo n, una unidad correspondiente sería  $N_d$ , que representa el número de donantes, como en donantes de electrones. (En algunos casos a continuación, y en las reivindicaciones, la expresión  $N_x$ , es usada para denotar ya sea  $N_a$  o  $N_d$ , según sea el caso, dependiendo de si se pretenden donantes o aceptores de electrones). Como se puede ver, la transición de una concentración relativamente más alta a una concentración relativamente más baja es suave y continua.

No se conoce que hayan sido producidos antes obleas semiconductoras que tengan tal gradiente de dopado, excepto en el tipo muy limitado mencionado anteriormente, usando el procedimiento de Stichting. Como se discutió anteriormente, ese procedimiento creó semiconductores que tenían propiedades eléctricas muy pobres.

Recordando el ejemplo hipotético descrito anteriormente con respecto a las impurezas y el procedimiento de Stichting, que tiene un factor de diez diferencias en dopado, y de este modo la misma diferencia en las, y  $5 \times 10^{11}$  átomos/ $\text{cm}^3$  de metal en la oblea, dando como resultado una vida útil de portador minoritario de aproximadamente 7 microsegundos, lo que conduce a una eficiencia de 16,4%, las obleas hechas de acuerdo con las invenciones de la presente tendrían propiedades significativamente mejores. Tal oblea tendría  $5 \times 10^{10}$  átomos/ $\text{cm}^3$  de metal en la oblea, dando como resultado una vida útil de portador minoritario de aproximadamente 70 microsegundos, lo que conduce a una eficiencia de 18,4%. Este ejemplo es hipotético, y otros factores entrarán en cualquier caso físico real, pero la comparación es apropiada.

En una oblea perfilada con dopante de una invención de la presente, si se forma a partir de una masa fundida dopada con material de tipo p, la oblea se forma primero, y luego el material de tipo opuesto, en este caso de tipo n, se creará en una superficie, creando de esa manera una unión p/n. La figura 2B muestra, esquemáticamente, la relación entre la unión p/n y el perfil de dopado de una invención de la presente. Para una oblea de tipo p formada a partir de una masa fundida como se discutió anteriormente, con un perfil de dopado, el lado p de la oblea 100 (el lado más positivamente dopado) será el lado 242, con el dopante de tipo p más alto de concentración de boro, que se formó más cerca de la superficie 122 de molde. El lado n de la oblea (el lado menos positivamente dopado, o el lado más negativo) será formado en el lado 246, con una concentración de boro dopante de tipo p inicialmente más baja, que se formó más distante de la superficie 122 de molde. La formación de la porción 250 de tipo n (o dopada de manera opuesta) se puede hacer mediante cualquier procedimiento convencional, o aún por ser desarrollado. Típicamente, la profundidad de tal sección sería solo aproximadamente 0,5 micrones de espesor. En una aplicación típica, el dopado de tipo p con boro proporciona  $N_a$  de aproximadamente  $1 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ . El dopado de tipo n proporciona  $N_d$  de aproximadamente  $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ . De este modo, en el lado 246, predomina el dopado de tipo n. La unión 252 p/n está entre la porción 250 de tipo n y el lado 246 con una concentración de dopante de tipo p inicialmente más baja. El lado que mira al sol de esta oblea tendría la porción 250 de tipo n mirando al sol. También se muestra una porción 254 de campo de superficie posterior (discutida con más detalle a continuación), que está adyacente al lado 242 que tiene una concentración de dopante de tipo p inicialmente más alta, en el lado opuesto de donde estaría el sol.

Como se discutió anteriormente, tal gradiente de dopante es beneficioso debido a que establece un campo eléctrico que apunta hacia la unión p/n de recolección con respecto a los portadores minoritarios. El campo eléctrico hace que los portadores de carga minoritarios generados se muevan preferentemente hacia la unión p/n. Esta preferencia direccional aumenta la eficiencia de recolección de la célula solar. Se cree que este efecto no puede ser logrado mediante ningún procedimiento convencional de dopado por fusión. (En un semiconductor de tipo p, los portadores minoritarios son electrones).

Debe anotarse que considerar la concentración de dopante en diferentes ubicaciones dentro del cuerpo de la oblea es solo una forma de describir su estructura y propiedades. Otra forma es considerar la resistividad del material en las mismas ubicaciones diferentes a lo largo de su cuerpo. También es cierto que, debido a la diferente concentración neta de dopado, habrá una diferencia correspondiente y relacionada en la resistividad de la oblea en diferentes ubicaciones a lo largo del cuerpo. De este modo, también hay un gradiente en resistividad del cuerpo, cuyo gradiente es en general inverso al del gradiente neto de dopado. Por eso, se entiende que la resistividad es mayor en las regiones de menor concentración de dopante, y es menor en las regiones de mayor concentración de dopante. También debe anotarse que, aunque estos gradientes en concentración y resistividad son generados por los fenómenos descritos anteriormente de solidificación y segregación de masa fundida, es relativamente difícil medir las concentraciones de material en diferentes ubicaciones dentro de una oblea. Sin embargo, es mucho más fácil medir la resistividad en tales ubicaciones a través del cuerpo. (Esto se puede hacer midiendo la resistividad de un cuerpo, retirando una capa de material, y midiendo la resistividad del cuerpo restante, por lo que es posible determinar, a partir de la diferencia, la resistividad de la porción que ha sido retirada). A partir de esta resistividad determinada, también es posible determinar la concentración de material, es decir, la concentración de dopado, de la capa que ha sido retirada. Capa por capa, el perfil de resistividad, y de este modo también el perfil de concentración de dopado a través de todo el cuerpo, puede ser medido y de este modo determinado.

La relación entre resistividad y dopante, o concentración de portador es determinista y no lineal. La Tabla 1 a continuación muestra un conjunto representativo de valores que relacionan la resistividad (ohm-cm) por un lado con la concentración de portador aceptor (átomos/cm<sup>3</sup>) y también con la concentración de portador donante.

Tabla 1- Relación entre resistividad y concentración de portador

Resistividad (ohm-cm)	Con. de Aceptor. (átomos/cm <sup>3</sup> ) Dopante de tipo P	Con. de Donante. (átomos/cm <sup>3</sup> ) Dopante de tipo N
0,001	$1,15 \times 10^{20}$	$7,36 \times 10^{19}$
0,01	$7,98 \times 10^{18}$	$4,38 \times 10^{18}$
0,1	$2,40 \times 10^{17}$	$7,77 \times 10^{16}$
0,3	$5,83 \times 10^{16}$	$1,87 \times 10^{16}$
0,5	$3,19 \times 10^{16}$	$1,04 \times 10^{16}$
1	$1,47 \times 10^{16}$	$4,83 \times 10^{15}$
2	$6,97 \times 10^{15}$	$2,31 \times 10^{15}$
4	$3,38 \times 10^{15}$	$1,13 \times 10^{15}$
6	$2,23 \times 10^{15}$	$7,43 \times 10^{14}$
10	$1,32 \times 10^{15}$	$4,41 \times 10^{14}$

5

La relación también puede ser caracterizada gráficamente, tal como en una gráfica logarítmica. Tal gráfico se muestra en [www.solecon.com/pdf/converting\\_resitivity\\_to\\_carrier\\_concen\\_tra\\_tion\\_graph\\_sige.pdf](http://www.solecon.com/pdf/converting_resitivity_to_carrier_concen_tra_tion_graph_sige.pdf). Este es un sitio web que muestra el trabajo de Solecon Laboratories of Trademark Dr., Reno, NV. La escala vertical denota concentración de portador/cm<sup>3</sup>, con la escala horizontal denotando resistividad (ohmios-cm). La relación entre la concentración de portador y resistividad muestra en general que una concentración mayor se correlaciona con una resistividad menor, y viceversa. En la escala logarítmica, la pendiente es en general negativa. Los gráficos para el dopado de tipo n y tipo p del mismo semiconductor, por ejemplo, germanio, son en general congruentes y están espaciados, con el del tipo p estando desplazado hacia la derecha, en general de tal manera que en el semiconductor de tipo p, habrá mayor resistividad para la misma concentración de portador en un semiconductor de tipo n. La relación entre la concentración de portador y la resistividad para los semiconductores de silicio es en general la misma que se describe para el semiconductor de germanio. Los valores fueron determinados usando Análisis de Resistencia a la Propagación (SRA). Los autores explican que, para calcular los valores de concentración de portadores para el silicio, usaron valores de movilidad derivados de Thurber, Mattis, Liu, y Filliben, National Bureau of Standards Special Publication 400-64, The Relationship Between Resistivity and Dopant Density for Phosphorus- and Boron-Doped Silicon (mayo de 1981), Tabla 10, Página 34 y Tabla 14, Página 40. Para calcular los valores de concentración de portadores de germanio, usaron valores de movilidad de portadores derivados de D.B. Cuttriss, Bell System Technical Journal (marzo de 1961), pág. 509.

10

15

20

El proceso descrito anteriormente funciona muy bien sin modificación para crear uno, o un pequeño número de obleas a partir de una única masa fundida sin ajustar la composición de masa fundida.

25

Un desafío presentado por este proceso es que, sin modificación, resultará, con el tiempo, a medida que se hagan más y más obleas, en un aumento en la concentración del dopante, tal como boro, en la masa fundida. Esto se debe a que menos de todo el boro que se había movido del molde durante el tiempo de la producción de una única oblea, se incorporará a la oblea que es formada durante ese intervalo de tiempo. Esta acumulación de concentración en la masa fundida limita el número de obleas que pueden ser desarrolladas, antes de que la masa fundida se vuelva demasiado rica en dopante, por ejemplo, boro, para el nivel de dopado de línea base. Para ser precisos, la masa fundida se ha vuelto demasiado rica en lo que sea que proporciona el dopante, ya sean donantes o aceptores de electrones. Finalmente, es alcanzado el equilibrio, en cuyo punto, la cantidad de boro retirado de la masa fundida con la formación de cada oblea es igual a la cantidad de boro añadido del molde a la masa fundida con cada ciclo de desarrollo de oblea. La concentración de boro a la cual es alcanzado este equilibrio es típicamente demasiado alta para hacer una oblea celular solar convencional de calidad a partir de la masa fundida rica en dopantes.

30

35

Para compensar tal acumulación de boro en la masa fundida, puede ser añadida directamente a la masa fundida una cantidad (especificada a continuación) de un material diferente, denominado en la presente memoria como un dopante de compensación, por ejemplo, en el caso de un dopante primario de boro, un dopante de compensación de fósforo. (Como se explica a continuación, en algunos casos hay una razón para aún otro dopante de compensación (por



diferentes razones), y así, en algunos casos, este dopante de compensación a punto de ser descrito puede ser denominado como un primer dopante de compensación).

El boro es un miembro del Grupo III de la tabla periódica de elementos, y tiene una propensión a aceptar, o recibir un electrón. De este modo, el boro es un aceptor de electrones. El fósforo es miembro del Grupo V de la tabla periódica de elementos, y de este modo, tiene un exceso de electrones que puede donarse a la masa fundida. De este modo, el fósforo es un donante de electrones. De este modo, el Fósforo compensa el exceso de aceptores de electrones del boro, debido a que el fósforo proporciona los electrones que el exceso de boro tiende a aceptar, compensando de este modo los aceptores excesivos de boro. Un único átomo de fósforo dona un único electrón, y un único átomo de boro acepta un único electrón.

El fósforo añadido en la cantidad adecuada compensará el exceso de boro y mantendrá el proceso de formación de oblea indefinidamente a niveles deseables de dopante de boro. La cantidad (como se mide por el número de átomos) de fósforo (dopante de compensación, donante) para compensar es aproximadamente igual a la cantidad (como se mide por el número de átomos) de boro (dopante en exceso, primario, aceptante) en la masa fundida, multiplicado por el coeficiente de segregación  $k$  del boro y dividido por el coeficiente de segregación del fósforo (específicamente  $k=0,8$  para el boro y  $k=0,3$  para el fósforo).

Indicado de manera diferente, el dopado por fusión (la concentración de aceptores, o donantes, según sea el caso, dependiendo de si es un semiconductor de tipo p o tipo n) idealmente debería mantenerse en o cerca de las condiciones bajo las cuales una oblea desarrollada en un molde sin material de dopado contenido en ninguna parte del molde o recubrimiento de molde será de alta resistividad, tal como típicamente para el tipo n, mayor que 1 Ohm-cm, y para el tipo p, mayor que 2 Ohm-cm. Para lograr esto, la cantidad de material de dopado de compensación del tipo opuesto al tipo primario presente en el molde o recubrimiento, debe estar presente preferiblemente en la masa fundida en una concentración descrita por la siguiente relación:

$$C_{cd} \text{ aproximadamente igual } C_{md} * (k_{md} / k_{cd})$$

donde:

$C_{md}$  es la concentración de masa fundida del dopante primario de molde (boro por ejemplo);

$C_{cd}$  es la concentración de masa fundida del dopante de compensación (fósforo para el ejemplo anterior de un dopante primario de boro);

$k_{md}$  es el coeficiente de segregación efectivo del dopante primario de molde; y

$k_{cd}$  es el coeficiente de segregación efectivo del dopante de compensación.

La oblea resultante tendrá un gradiente medible en la concentración de boro (véase la figura 5), desde, por ejemplo, aproximadamente  $1 \times 10^{19} \text{ N}_a/\text{cm}^3$  a aproximadamente  $1 \times 10^{17} \text{ N}_a/\text{cm}^3$ . De este modo, un aspecto de una invención divulgada en la presente memoria es un artículo de fabricación, que es una oblea que tiene un gradiente medible en una concentración de dopante primario, tal como boro, como se mide desde una superficie a la superficie opuesta. De hecho, una diferencia mínima razonable entre el dopado en el lado de masa fundida y el dopado en el lado de sustrato es un factor de tres veces. Esto produce un aumento de 0,1% en la eficiencia sobre un perfil de dopado plano que contiene el mismo número de aceptores. El tamaño de la ganancia es dependiente de muchos factores, tales como arquitectura de célula, vida útil de portador minoritario de la oblea, pasivación de superficie, etc. El ejemplo anterior (ganancia de 0,1%, diferencia de dopado de adelante hacia atrás de 1/3, se logra con una arquitectura PERC. La ganancia puede ser diferente con una arquitectura de BSF de aluminio. Como se mencionó anteriormente, es difícil medir directamente la concentración de dopante, tal como boro, dentro del cuerpo de la oblea. De este modo, por concentración de dopante medible, lo que se entiende es una concentración de dopante que puede ser determinada ya sea midiendo la concentración de dopante directamente, ya sea por medios actuales o aún por ser desarrollados, o midiendo la resistividad, capa por capa, como se discutió anteriormente, y luego a partir de la resistividad, calcular o determinar de alguna otra forma, tal como por referencia a una tabla tal como la Tabla 1 o gráfico, la concentración de dopante que se correlaciona con esa resistividad, y de este modo recopilar un perfil de gradiente de resistividad y también un perfil de gradiente de dopante.

El dopante de compensación debe ser añadido periódicamente, o continuamente, para hacer coincidir la tasa de adición de dopante del molde.

De este modo otro aspecto de una invención divulgada en la presente memoria es un procedimiento de fabricación de una oblea, y un aspecto más específico de una invención divulgada en la presente memoria es un procedimiento de fabricación de una oblea que tiene un gradiente medible en concentración de dopante, tal como boro, o resistividad, como se describió anteriormente, y una invención de procedimiento particular de la presente es un procedimiento de producción de una pluralidad de tales obleas a partir de una masa fundida a lo largo del tiempo, mientras que se mantiene un perfil de dopado y resistividad relativamente similar, incluso a medida que se hacen más y más obleas, y entra más dopante primario en la masa fundida.

Pasando ahora a una discusión de la ubicación de la fuente de dopante que se incorporará en la oblea, se muestra una ubicación típica en la figura 1A, como un recubrimiento en la superficie 122 de formación del molde 110, o como se muestra en la figura 3 y figura 4, en algún lugar dentro del cuerpo del molde 110, en una ubicación donde, tras el calentamiento del molde, el dopante puede moverse a través del cuerpo de molde, para salir del molde y dopar la masa fundida 116. De este modo, como se muestra en 114 en la figura 1A, el dopante 114 puede estar en una capa 112 más externa de un recubrimiento sobre el molde 110, tal como una capa de liberación. O, como se muestra en la figura 3, puede estar ubicado dentro del cuerpo 314 del molde 310, ya sea distribuido uniformemente, o en regiones más concentradas, tales como más concentradas más cerca de la superficie 322 de formación. O, como se muestra en la figura 4, puede ubicarse en una capa 414 sumergida de un recubrimiento sobre el molde, con otra capa, 424, tal como una capa de liberación, en la superficie.

Más específicamente, el propio molde 310, puede contener compuestos 314 volátiles que contienen boro, tales como: óxido de boro, nitruro de boro, boro, ácido bórico y vidrio de borosilicato. Alternativamente, o además, el recubrimiento 112 de molde que está en contacto inmediato con la masa fundida puede contener compuestos de boro volátiles y compuestos de boro solubles en silicio (en el caso de que se forme una oblea de silicio, de otra manera, soluble en el semiconductor que se forma) que incluyen: óxido de boro, nitruro de boro, boro, ácido bórico, vidrio de borosilicato, carburo de boro, siliciuro de boro. Aún además en alternativa, o además, la región 414 de recubrimiento de molde que no está en contacto inmediato con la masa fundida puede contener compuestos de boro volátiles, que incluyen: óxido de boro, nitruro de boro, boro, ácido bórico, vidrio de borosilicato.

Otro asunto a considerar, relacionado con la ubicación del dopante, es la modalidad por la cual pasa o migra desde el molde al material fundido. Se cree que existen tres principales modalidades diferentes posibles. Una sería la disolución de dopante en el silicio fundido, seguida de una difusión además en la masa fundida. Se cree que esta modalidad de disolución y difusión confiere muchos beneficios. Una segunda sería la difusión desde el molde al líquido de la masa fundida. La tercera, y actualmente la menos preferente, es la vaporización desde el molde hasta la masa fundida.

Pasando a cada uno de estos a su vez, el más preferente sería donde el dopante del molde, tal como en la forma de  $B_4C$  (carburo de boro) o  $B_4Si$  (siliciuro de boro) se disolvería del molde, tal como del recubrimiento, en la masa fundida. Dentro de la masa fundida, el dopante se descompondría en sus constituyentes, y el dopante, tal como boro, se difundiría además en el cuerpo de material fundido. Los otros componentes, tales como C o Si, en la medida en que la masa fundida no estuviera ya saturada con estos, tal como es probable que sea el caso, también se difundirían. Las ventajas que se deducen de esta modalidad son que cada oblea hecha en el mismo molde recibe la misma cantidad de dopante, a diferencia de otras modalidades, tales como la tercera que se menciona a continuación, donde es liberado más dopante para las obleas hechas anteriormente.

Se cree que la segunda modalidad, en la cual el dopante se difunde directamente en el líquido del molde, se difundiría desde un recubrimiento, o desde el propio molde hasta la masa fundida, es menos probable debido a que la mayoría, si no todos los materiales entrarían en la masa fundida por algún modo distinto a la difusión solamente, tal como por disolución o vaporización. En cualquier caso, para todos los modos en los cuales el dopante está en contacto real con la masa fundida, la difusión tendrá lugar hasta cierto punto.

La tercera modalidad, vaporización directa, no es preferente. Por ejemplo,  $B_2O_3$  (Óxido de boro) o BN (nitruro de boro) pudiera ser calentado a un grado que se vaporice directamente desde su ubicación en el molde (por ejemplo, en un recubrimiento) o en el molde, para pasar directamente al material semiconductor fundido como un gas. Esto no es preferente debido a que se espera que sea difícil controlar el grado en el cual se libera el dopante en la masa fundida. Toda la fuente de dopante se calienta a la vez, y liberará boro por vaporización, no solo la porción de la fuente de dopante en contacto con la masa fundida. De este modo, la primera vez que se calienta el molde, se liberará más dopante, por ejemplo, las partículas pequeñas podrían desaparecer después de un solo ciclo de calor. O el proceso está limitado por la difusión a la superficie del molde de las partículas dopantes.

En relación tanto con la ubicación del dopante, como con la modalidad, algunos ejemplos son instructivos. Para el dopado de un recubrimiento del molde, tal como un recubrimiento de liberación, que entra en contacto con la masa fundida directamente, tal como se muestra en la figura 4 en la capa 424, o en la figura 1B, en la capa 112, cuando se desea un transporte de vapor mínimo, una fuente de dopante adecuada sería un material de recubrimiento de  $Si_3N_4$  o  $SiO_2$ , y un dopante de  $B_4C$  o  $SiB_4$ . Para el dopado de cualquier capa de un recubrimiento de molde que no esté en contacto directo con la masa fundida, tal como se muestra en la figura 4, en la capa 414, una fuente de dopante adecuada sería un material de recubrimiento de  $Si_3N_4$  o  $SiC$ , y un dopante de  $B_2O_3$  o BN. Para el dopado del molde, pero no un recubrimiento, tal como se muestra en 314 en la figura 3, un material de molde adecuado sería  $SiC$ , y un dopante de  $B_2O_3$  o BN.

El procedimiento básico descrito anteriormente también funcionará con cualquier otro dopante primario de tipo p en vez de Boro (tal como Aluminio (Al), Galio (Ga), Indio (In)) y usando cualquier dopante de tipo n adecuado para compensar la masa fundida (Fósforo (P), Arsénico (As), antimonio (Sb), Bismuto (Bi)), respectivamente. Sin embargo, se cree que el par de B y P es extremadamente ventajoso para uso con obleas de silicio en desarrollo, debido a que tienen los coeficientes de segregación numéricamente más altos de todos los dopantes efectivos en silicio. (Un elemento con un coeficiente de segregación relativamente más alto segrega durante la solidificación relativamente menos que otros, y como tal, aquellos con el coeficiente de segregación más alto segregarán menos durante la

solidificación). De este modo, tras la solidificación, el dopante B y el dopante de compensación P serían distribuidos de manera relativamente uniforme dentro del cristal, en comparación con el caso que surgiría si fueran usados elementos que tuvieran coeficientes de segregación numéricamente menores (con mayor propensión a segregar). También podría ser usado un proceso similar, pero correlativo, para hacer obleas dopadas principalmente de tipo n. En ese caso, el dopante primario proporcionado por el molde o un recubrimiento sobre el mismo sería un dopante de tipo n (tal como P, As, Sb, Bi) y el dopante de compensación de fusión sería un dopante de tipo p (tal como B, Al, Ga, In).

La Tabla A a continuación muestra los dopantes primarios representativos y los dopantes de compensación para semiconductores de tipo p y tipo n y sus respectivos coeficientes de segregación.

Tabla A- Dopantes y constantes de segregaciones de equilibrio

Tipo P		Tipo N	
Dopante primario	dopante de compensación	Dopante primario	dopante de compensación
B (0,8)	P (0,3)	P	B
Al (0,002)	As (0,3)	As	Al
Ga (0,008)	Sb (0,023) (antimonio)	Sb (antimonio)	Ga
In (0,004)	Bi (0,0007)	Bi	In

Este procedimiento de dopado de un material semiconductor podría ser aplicado a cualquier semiconductor que pueda ser desarrollado a partir de una masa fundida, incluyendo Silicio (Si), Germanio, (Ge), arseniuro de Galio (GaAs), etc. Las obleas/cuerpos semiconductores en desarrollo a partir de materiales semiconductores aparte de silicio requerirían usar diferentes dopantes (por ejemplo, silicio como un dopante primario para obleas de GaAs) y diferentes materiales dopantes de compensación.

La Tabla B a continuación muestra compuestos de elementos de dopado que podrían ser usados como fuente. Una marca x significa que el compuesto existe, por ejemplo, carburo de boro, óxido de boro, etc. (En contraste, no hay siliciuros para P, As, Sb, Bi). También podrían ser usados elementos puros y cualquier compuesto de Si, C, O, N, podría ser dopado con cualquiera de los elementos y luego usado como fuente para dopante. Algunos de los compuestos enumerados existen, pero no son prácticos, debido a su baja estabilidad, reactividad con la humedad, toxicidad, etc.

Tabla B- compuestos de elementos de dopado

Elemento	B	Al	Ga	In	P	As	Sb	Bi
Carburo	x	x	x	x	x	x	x	x
Óxido	x	x	x	x	x	x	x	x
Nitruro	x	x	x	x	x	x	x	
Siliciuro	x	x	x	x				

Las invenciones divulgadas en la presente memoria confieren muchos beneficios. Uno es un campo eléctrico beneficioso que mejora la recolección de portadores minoritarios y de este modo la eficiencia de una célula solar. Otra es mayor eficiencia a una resistividad más baja, lo cual implica que es posible un factor de llenado más alto. También hay posibles sinergias con procesos similares a PERC (resistividad más baja es beneficiosa para arquitecturas celulares similares a PERC). (PERC significa Contacto Trasero de Emisor Pasivado).

Aún otro beneficio se refiere al hecho de que el gradiente de dopante (o su correlativo, resistividad) puede dar lugar a un campo de pasivación automáticamente. (Esto se evidencia por la muy alta concentración de dopado en la porción de la oblea que fue formada más cerca del molde, como se muestra en el lado izquierdo de la curva, como se muestra en la figura 5). Un campo de pasivación reducirá las recombinaciones en la superficie trasera. El beneficio es que un BSF (Campo de Superficie Posterior) de Aluminio convencional, que sería aplicado convencionalmente durante el procesamiento de célula, no es necesario, y podría ser eliminado. Esto reduciría entonces el número de etapas en la formación de una célula típica.

Otra ventaja surge de esto. Si el BSF de Al no necesita estar presente, entonces puede ser usado un contacto de rejilla abierta en la parte posterior de la oblea, lo que permite que la luz de longitud de onda larga pase a través de la célula y sea reflejada en una lámina reflectante de manera eficiente en la parte posterior de módulo y luego pasada de vuelta a través de la célula de nuevo. Esto se discute con más detalle a continuación.

El gradiente de dopado (y su correlación, resistividad) a través del espesor de la oblea también puede proporcionar lo que denomina un Campo de Superficie Posterior (BSF). La figura 6A muestra esquemáticamente en sección transversal una célula 600 solar conocida que incorpora un BSF. Un BSF es creado por una región 662 de concentración particularmente alta de dopante en la parte posterior (superficie que mira lejos del sol) de la célula solar, lo cual crea un fuerte campo eléctrico dentro del material semiconductor en la parte posterior de la célula. Este campo eléctrico repele a los portadores minoritarios que se acercan a la parte posterior de la célula y evita que la gran mayoría de ellos lleguen a la superficie 664 muy posterior del material semiconductor. Esto es importante debido a que, si llegaran a esta superficie 664 posterior, hay una alta probabilidad de que se recombinen en esta superficie y por lo tanto ya no estén disponibles para crear corriente en un circuito externo.

Los campos de deriva y campos de superficie posterior ambos dependen de la variación espacial de la densidad de dopado a través del espesor de la oblea, con una densidad de dopado más alta hacia la parte posterior de la célula y una densidad de dopado más baja hacia la parte frontal de la célula. Sin embargo, difieren en varios aspectos importantes. Primero, un campo de deriva es más efectivo cuando se extiende a través del espesor de la oblea, debido a que como tal, seguirá empujando suavemente a los portadores minoritarios hacia la unión de recolección (y no dejará que estén sujetos exclusivamente a difusión). Por el contrario, un BSF se limita a la porción posterior de una oblea celular. Por ejemplo, en una oblea celular de 180-200 micrones de espesor, una región de BSF de la oblea celular podría ser 1-10 micrones de espesor, con un espesor típico de aproximadamente 5 micrones. Adicionalmente, el nivel de dopado en un BSF es muy alto, para crear un campo eléctrico alto, que luego repele efectivamente a los portadores minoritarios hacia la parte frontal. De hecho, este nivel de dopado es tan alto que puede afectar negativamente a la longitud de difusión de portador minoritario (o vida útil) en esta porción trasera de la célula. El impacto neto en el rendimiento de dispositivo todavía es muy positivo, debido a que la reducción en la longitud de difusión es localizada solo en la parte muy posterior de la célula y debido a que el propio BSF minimiza el número de portadores que entran en esta región. Por el contrario, los niveles de dopado más bajos en un campo de deriva tienen un impacto negativo relativamente pequeño en la longitud de difusión de portadores minoritarios. Tal célula de BSF se muestra en la figura 6A.

La forma más común de crear un BSF es serigrafar pasta de aluminio en la parte posterior de la oblea y calentarla en un horno de cinta. Esto da como resultado una región 662 de silicio con una densidad de dopado muy alta de aluminio - un dopante de tipo p. Además, hay una capa 668 de aleación de aluminio-silicio (gran parte de esta en la composición eutéctica) detrás de esta. Esta región 668 de aleación de aluminio actúa como el contacto/conductor trasero para la célula. Desafortunadamente, para la operación de tal célula de BSF convencional, la aleación de aluminio-silicio no es un reflector óptico particularmente bueno, teniendo un coeficiente de reflexión de aproximadamente 60%. De este modo, el 40% de la luz infrarroja que no es absorbida en su primer paso a través del cuerpo 652 de célula es absorbida por este contacto trasero y ya no está disponible para recorrer de vuelta a través del cuerpo 652 de célula en un segundo paso. Esto limita la corriente generada por la célula significativamente y el voltaje en una pequeña cantidad. La superficie que mira al sol de la célula puede estar provista de una superficie 650 texturizada, y de dedos 670 de contacto eléctrico.

Como se muestra en la figura 6B, el dopado desarrollado de una invención de la presente puede proporcionar una región 682 con un perfil de dopado, que funciona como un BSF, sin las desventajas mencionadas anteriormente. En ciertas realizaciones, esta región 682 de dopado particularmente alto (para la superficie posterior) puede ser creada junto con una región 692 más extensa de dopado de campo de deriva perfilado a través del espesor de la oblea celular. (Como se muestra en la figura 6B, la región 692 no tiene ninguna representación gráfica de un perfil de dopado, con el fin de simplificar la figura. Sin embargo, debe entenderse que puede haber un perfil de dopado gradual o menos gradual similar al que se muestra en las figuras 2A y 2B, discutidas anteriormente). En otras realizaciones, la castina de dopante procedente del molde o recubrimiento de molde puede ser diseñada para ser confinada más estrechamente a la parte posterior de la oblea celular. Esta podría ser usada luego para crear una región 682 de BSF significativamente dopada, y también para crear una región 692 de campo de deriva que está solo muy levemente dopada, de tal manera que, aunque habría un campo de deriva, su gradiente sería muy gradual, o menos abrupto. O, ambos efectos pueden ser logrados con el mismo dopado, o, con diferentes patrones de dopado.

Existen varios procedimientos para crear un dopado desarrollado, que funciona como un BSF. Un BSF típico tendría aproximadamente  $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$  aceptores. Para lograr esto, se proporcionaría una gran cantidad de un dopante aceptor, tal como boro, dentro del molde. Para mejorar el dopado de lado posterior, en comparación con el dopado de lado frontal, el cristal semiconductor podría ser desarrollado de manera relativamente lenta, después de la nucleación inicial, lo cual proporcionaría más tiempo para que los aceptores que ya están en la masa fundida se difundan más profundo en la masa fundida, lejos del cristal de solidificación, permitiendo de este modo una concentración mucho menor de aceptores (boro) en la mayoría del cristal en comparación con la capa inicial que se desarrolla inmediatamente adyacente al molde. La fuerza del BSF es proporcional a la relación de dopado en la parte posterior sobre el dopado en la mayor parte de la oblea. Además, o alternativamente, la nucleación podría ser mejorada proporcionando un mayor vacío (o diferencial de presión), como se discute a continuación, durante las primeras

porciones de solidificación. Esto provocaría que la solidificación y desarrollo de cristales inicien antes, mientras que se formará la concentración de dopante cerca del molde en la porción de la masa fundida a partir de la cual se solidificará el cuerpo. La técnica de variar el vacío (o régimen de presión diferencial) a lo largo del tiempo, o en diferentes ubicaciones, se describe en la Patente No. 8.293.009 anteriormente referenciada, de Sachs et al. Han sido hechas obleas con una concentración de portador de  $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$  aceptores en la superficie de la oblea que fue formada adyacente a la cara de molde.

Lo anterior menciona el ajuste de la presión de vacío o régimen de presión diferencial durante la solidificación. Esto se refiere a un procedimiento divulgado en la patente 8.293.009. Es beneficioso que el molde descrito en la misma sea poroso (como se discute a continuación). Se proporciona un diferencial de presión entre la superficie del molde que entra en contacto con la superficie del material fundido, y una superficie posterior del molde, de tal manera que tras entrar en contacto, el material fundido es arrastrado hacia la cara de molde. La porosidad del molde es de tal manera que el material fundido no es arrastrado en las porosidades. Esto es logrado por las porosidades que son lo suficientemente pequeñas de tal manera que la tensión superficial y otros fenómenos evitan que el material fundido entre en las porosidades antes de que se solidifique el material. También son lo suficientemente numerosos de tal manera que pueda ser establecido el diferencial de presión, a pesar de sus pequeños tamaños individuales. El diferencial de presión puede ser establecido proporcionando un vacío, o proporcionando la superficie del material fundido a una presión por encima de la presión atmosférica, con la superficie opuesta del molde a una presión menor, de tal manera que el diferencial de presión proporcione una fuerza que fuerce al material fundido y luego el cuerpo solidificado hacia la cara de molde. Al proporcionar este diferencial de presión, la fuerza de contacto entre el material fundido y la cara de molde es mejorada en comparación con un caso sin diferencial de presión, lo cual proporciona una solidificación más rápida. También se puede proporcionar un diferencial de presión mejorado en ubicaciones individuales a través de la cara de molde, a diferencia de otras ubicaciones no mejoradas, por diversos medios, tales como insertos térmicos o vacíos en ubicaciones específicas en la cara de molde. Por poroso, se entiende un cuerpo que está lleno de orificios y pasajes muy pequeños, de tal manera que existen trayectorias continuas para que el gas fluya desde una superficie del molde a la otra. Las porosidades son muy pequeñas. Típicamente son una escala de micrones, tales como diez micrones en diámetro, hasta quizás treinta o cuarenta micrones de diámetro. Son numerosas, cubriendo la superficie del molde y pasando a través de un gran volumen de su cuerpo. Las rutas son tortuosas, tal como en una esponja natural. Como se define en la presente memoria, poroso no incluye orificios macroscópicos simples que pasan de una superficie a la otra, tales como orificios perforados a través del cuerpo de molde.

La figura 6B muestra una oblea 601 celular con una región 682 de BSF y con un electrodo 698 trasero en la forma de dedos 671 similar a los dedos 673 del electrodo 699 frontal que mira al sol, que también muestra dedos. Un reflector 695 óptico (típicamente blanco) (que puede ser especular o difuso) está detrás (con relación al sol) del electrodo 698 trasero. Este reflector puede ser la lámina posterior usada durante la encapsulación del módulo. Puede haber un espacio 687 físico entre la parte posterior de la oblea celular y el reflector o puede no haber espacio. De esta forma, los fotones que no son absorbidos en su primer paso a través del cuerpo principal de silicio 693 saldrán de la oblea celular, serán reflejados por el reflector 695 óptico y reentrarán en la oblea celular desde la superficie posterior, para un segundo paso a través el cuerpo 693 de silicio y una posibilidad adicional para ser absorbido. La reflectividad óptica de la mayor parte del contacto posterior está en ese caso gobernada por la reflectividad del material 695 colocado detrás de la oblea celular, que puede ser mayor que 90% y en muchos casos, mayor que 95%. La superficie que mira al sol de la oblea celular puede estar provista de una superficie 651 texturizada similar a la realización de la técnica anterior mostrada en la figura 6A.

La figura 7 muestra, gráficamente, las mediciones de eficiencia cuántica (QE) para los dos tipos de células. La fotorespuesta para la estructura mostrada en la figura 6A se muestra en línea discontinua y en general está dentro de la otra curva. La fotorespuesta para la estructura de una invención de la presente, con un BSF desarrollado y una lámina posterior reflectante, mostrada en la figura 6B, se muestra en línea continua, y en general está fuera de la otra curva. De este modo, como se puede ver, la fotorespuesta de la célula es mayor para la estructura de una invención de la presente, mostrada en la figura 6B. La QE aumentada está en la región infrarroja de las longitudes de onda de espectro en el gráfico 900nm-1200nm, como se esperaba - debido a que son estas longitudes de onda más largas las cuales pueden penetrar en la parte posterior de la célula. El resultado es una célula de mayor eficiencia.

Se conoce en la técnica una estructura de célula básica de una oblea, y alguna forma de BSF, por ejemplo, proporcionada por aleación de aluminio durante la etapa de disparo por contacto, respaldada por una región abierta, un electrodo en forma de rejilla, y un reflector. Un ejemplo es una estructura de célula PASHA. También se conoce proporcionar un BSF mediante una etapa de dopado separada para proporcionar un dopado más pesado cerca de la superficie posterior de la célula. Para crear tal estructura se requiere esta etapa de dopado separada. Se considera que es una invención de la presente crear tal BSF dopado sin una etapa separada para el mismo, a saber, creando el BSF durante la fase de desarrollo de la oblea, junto con el campo de deriva, como se explicó anteriormente. De este modo otra invención de la presente se refiere a un procedimiento novedoso y no obvio de fabricación de tal estructura, en el que el dopado requerido para crear el BSF es creado durante el proceso de desarrollo de obleas de acuerdo con los procedimientos discutidos anteriormente.

Ha sido determinado que, en cualquier sistema particular, tal como usando Silicio como el semiconductor, Boro como dopante primario, y Fósforo como dopante de compensación, puede surgir una condición indeseable. Recordar que el

dopante de compensación es añadido a la mayor parte de la masa fundida con el tiempo ya que se hacen muchas series de obleas del mismo recipiente y se funden, para mantener la resistividad de cada oblea recién hecha en una serie de obleas hechas de esta misma masa fundida, para ser el mismo. Esto debe hacerse a pesar del hecho de que hay una acumulación creciente del dopante primario (por ejemplo, el boro) en la masa fundida con el tiempo.

El fenómeno indeseable es que el dopante de compensación, que tiene un coeficiente de segregación más bajo que el dopante primario, se segrega más fuertemente a los límites de grano. Véase por ejemplo la figura 8A, que muestra, esquemáticamente, un cristal 800 de Si, y un dopante de compensación de bajo coeficiente de segregación acumulado D en los límites 860 de grano. Esto es en general indeseable, debido a que la mayor concentración de dopante de compensación D cerca de los límites 860 de grano da como resultado que haya una mayor concentración cerca de los límites de grano del portador tipo D que implica el dopante de compensación (en el caso de P, estos son donantes, y de este modo, la letra D es usada para representarlos). Como tal, habrá un campo eléctrico establecido dentro de los granos dirigido hacia los límites de grano, y de este modo, los portadores minoritarios serán arrastrados hasta los límites. Tal condición es indeseable, debido a que no es allí donde se desea dirigir estos portadores. Deben ser dirigidos lejos de la superficie 242 de la oblea con la concentración más alta del dopante aceptor A, hacia la unión p/n (aún no formada, y de este modo no se muestra en la figura 8A), que se formará adyacente a la superficie 246, que tiene la concentración más baja del dopante aceptor A.

Ha sido determinado que este efecto indeseable puede ser superado mediante la etapa contrario a la intuición de proporcionar un segundo dopante de compensación, que se denomina en la presente memoria como un dopante de contracompensación, por ejemplo, en el caso de un sistema de Si/B/Ph, un dopante de contracompensación de Aluminio (Al). El aluminio es el mismo tipo de donante/aceptor portador que el dopante primario. De este modo, el aluminio es un aceptor, como es el boro. Es más beneficioso que el coeficiente de segregación del dopante de contracompensación sea numéricamente menor que el del primer dopante de compensación, y numéricamente, lo más cercano posible al valor del coeficiente del primer dopante de compensación. Teniendo un coeficiente de segregación numéricamente menor, el dopante de contracompensación migra a los límites de grano incluso con más fuerza que el dopante de compensación. De este modo, su carácter de aceptor/donante cancela, compensa, el exceso de grado de donante/aceptores presentes de la concentración relativamente alta de dopante de compensación en estos límites.

En los casos en los cuales el coeficiente de segregación del dopante primario es numéricamente menor que el del primer dopante de compensación, no es necesario usar un segundo dopante de contracompensación (y de este modo, el dopante de compensación es simplemente un dopante de compensación, no un primer dopante de compensación). Una combinación muy útil para un semiconductor de Silicio usa Boro para el dopante primario, Fósforo para el dopante de compensación, y Ga (Galio) para el segundo dopante de contracompensación. B tiene el coeficiente de segregación más grande (menos segregante), en 0,8 seguido de P en 0,3 y Ga en 0,008.

La Tabla C muestra diferentes combinaciones de dopante Primario (sustrato), dopante de compensación y segundo dopante de contracompensación, tanto para cristales semiconductores de tipo P, tales como Silicio, como para semiconductores de tipo N, como se muestra en la Tabla A, pero con la información adicional relacionada con los dopantes de contracompensación. El coeficiente de segregación para cada elemento también se proporciona en la primera mención del elemento.

Tabla C - Combinaciones de dopante primario, de compensación y contracompensación, para semiconductores de tipo P y tipo N

Tipo P			Tipo N		
Dopante primario	dopante de comp.	dopante de contracomp.	Dopante primario	dopante de comp.	dopante de contracomp.
B (0,8)	P (0,3)	Al	P	B	As
Al (0,002)	As (0,3)	Ga	As	Al	Sb
Ga (0,008)	Sb (0,023)	In	Sb	Ga	Bi
In (0,004)	Bi (0,0007)		Bi	In	
B (0,8)	P (0,3)	Ga			

Los compuestos enumerados en la Tabla C anterior pueden ser usados para proporcionar el dopante de contracompensación así como los dopantes primarios y de compensación. En el caso donde es añadido tanto un dopante de tipo n como de tipo p a la masa fundida, podría ser usado un semiconductor compuesto para añadir el segundo dopante de contracompensación. Por ejemplo, con un dopante primario de Boro, podría ser usado InP (fosfuro de Indio). El fósforo proporcionaría un dopado de compensación, y el Indio proporcionaría

contracompensación, de la misma manera que lo haría el Ga, en la tabla anterior. Pero el P e In se proporcionarían como un agente compuesto, en vez de como aditivos individuales.

### Ejemplos

Han sido desarrolladas obleas y han sido hechas células solares. Las células solares muestran una alta eficiencia a una resistividad muy baja. Por ejemplo, las células solares hechas en obleas que usaban este procedimiento que tenían una resistividad en volumen promedio de sólo 0,30 hm-cm tenían 2% mayor eficiencia que las obleas de control que tenían una resistividad de 2,20 hm-cm. El perfil de dopado mostrado esquemáticamente en la figura 5 fue medido retirando selectivamente capa tras capa de silicio y midiendo la resistividad de la oblea restante. En general, la resistividad más baja está presente en regiones con mayor concentración de dopante, y viceversa. (El dopado fue inferido midiendo la resistividad, debido a que medir las concentraciones de material en una oblea formada es difícil, sin embargo, medir la resistividad, capa por capa, no es particularmente difícil. De este modo cuando se considere una infracción de las reivindicaciones en la presente memoria, la presencia de un perfil en resistividad, de una superficie a otra, se puede considerar como evidencia de un perfil correspondiente en la concentración de dopante. Adicionalmente, las obleas que exhiben un perfil en resistividad, con menor resistividad en una superficie (típicamente la superficie posterior, que no mira al sol, donde hay una mayor concentración de dopante en obleas de tipo p), y una mayor resistividad en la otra superficie, que sería la superficie que mira al sol, en ese caso, se consideran como una invención de la presente, como lo son las células solares que incluyen tales obleas, y los procedimientos para hacer tales obleas.

La concentración neta de aceptor promedio fue aproximadamente  $5 \times 10^{15}/\text{cm}^3$  con aproximadamente 10 veces más dopado en la superficie posterior (formada en el lado que mira al molde). La célula tenía un campo de superficie posterior de aluminio, no un desarrollo en BSF, como también se discutió anteriormente. El dopante de boro fue aproximadamente  $1 \times 10^{18}$  átomos/ $\text{cm}^3$ . El contenido de impureza fue mínimo, y, en cualquier caso, menos de diez veces la cantidad que estaría presente en la segregación de equilibrio. Hubo un intervalo de dopante de compensación desde ninguno (al muy comienzo de la serie) hasta aproximadamente  $1 \times 10^{18}$  átomos/ $\text{cm}^3$  al final de la serie (en la cual fueron hechos aproximadamente 2.000 obleas).

Las invenciones divulgadas en la presente memoria resuelven numerosos problemas. Una invención de la presente permite el establecimiento de bajo coste de un gradiente de dopante desde una superficie de la oblea formada a la otra. Hasta la fecha, los procedimientos conocidos para establecer un gradiente en dopantes en obleas de silicio dan como resultado silicio de baja calidad (tal como RGS dopado con galio (desarrollo de cinta sobre sustrato) o son muy costosos (silicio desarrollado epitaxial).

Debe anotarse que muchas/cualquiera de las técnicas anteriores para proporcionar una oblea con un perfil de nivel de dopado puede ser usada con otras. Por ejemplo, cualquiera de las modalidades de proporcionar dopante al molde, por ejemplo en un recubrimiento, en el cuerpo del molde o cerca de la superficie del molde, puede ser usada con cualquiera de los procedimientos de compensación del dopante excesivo en la masa fundida con el tiempo, y también cualquier procedimiento de contracompensación para la segregación excesiva del dopante de compensación a los límites de grano puede ser usado con cualquier otro procedimiento para proporcionar un perfil de dopado. La provisión de dopante en un grado y en ubicaciones para crear un BSF se puede usar con cualquiera de las técnicas para la compensación de dopante, y también para contrarrestar la acumulación de dopante de compensación en los límites de grano. Las técnicas para formar un perfil dopante de cualquier curva, o forma, pueden ser usadas con las técnicas de compensación y contracompensación, y también con los procedimientos de formación de un BSF.

Por ejemplo, la invención de un campo de deriva no es esencial para la invención de un BSF, y viceversa. Puede ser establecido un campo de deriva que sea gradual, y que no tenga un BSF dopado de manera extremadamente alta. Se puede proporcionar un BSF con una región dopada de manera relativamente alta, y el resto de la oblea puede ser relativamente uniforme, esencialmente sin campo de deriva, o con solo un campo de deriva de grado leve. No es necesario proporcionar dopante de compensación en una masa fundida, ya sea para la formación de única oblea, o incluso para una serie de obleas, en tanto que la concentración de dopante primario en la masa fundida no sea demasiado grande para formar obleas de calidad. Pueden ser usados otros procedimientos de compensación de dopantes. Asimismo, no necesita ser usado el procedimiento de contracompensación, para evitar la acumulación excesiva del dopante de compensación en los límites de grano, que se divulga en la presente memoria para proporcionar un contradopante con un coeficiente de segregación aún menor. Tal acumulación puede ser tolerada para algunas aplicaciones, o podrían ser usados otros procedimientos para contrarrestar la acumulación.

# REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento de fabricación de una oblea semiconductor para uso como un colector solar, comprendiendo el procedimiento las etapas de:

- a. proporcionar un material semiconductor fundido, que tiene una superficie;
- b. proporcionar un molde, que comprende una superficie de formación, comprendiendo el molde también un dopante primario en relación con el material semiconductor;
- c. poner en contacto la superficie de formación con la superficie del material fundido, de tal manera que el dopante primario migra desde el molde al material semiconductor fundido; y
- d. solidificar un cuerpo de material semiconductor en la forma de una oblea sobre la superficie de formación, con una primera superficie de la oblea puesta en contacto con la superficie de formación, teniendo la oblea un perfil de la concentración de dopante primario, habiendo una concentración mayor del dopante primario en la primera superficie de la oblea, y una concentración menor del dopante primario en una segunda superficie de la oblea que en la primera superficie de la oblea, estando la segunda superficie de la oblea opuesta a la primera superficie de la oblea, y siendo la primera y segunda superficies de la oblea superficies principales de la oblea.

2. El procedimiento de la reivindicación 1, que comprende además la etapa de separar la oblea solidificada de la superficie de formación.

3. El procedimiento de la reivindicación 1, comprendiendo el molde un recubrimiento sobre la superficie de formación, cuyo recubrimiento contiene el dopante primario.

4. El procedimiento de la reivindicación 1, comprendiendo además el molde un cuerpo, en el que el dopante primario está distribuido dentro del cuerpo de molde.

5. El procedimiento de la reivindicación 1, comprendiendo el molde además un cuerpo, en el que el dopante primario está dentro del cuerpo de molde en una concentración más alta cerca de una superficie.

6. El procedimiento de la reivindicación 1, comprendiendo el dopante primario un portador de carga de un solo tipo de un donante y un tipo aceptor, que comprende además;

realizar etapas a, b, c, y d al menos dos veces; proporcionar en el material fundido, una cantidad de dopante de compensación de un tipo donante/aceptor portador de carga opuesto al dopante primario.

7. El procedimiento de la reivindicación 6, que comprende además, la etapa de proporcionar en el material fundido, una cantidad de dopante de contracomensación de un tipo donante/aceptor portador de carga opuesto al dopante de compensación.

8. El procedimiento de la reivindicación 1, siendo la concentración de dopante primario menor que o igual a  $1 \times 10^{20} \text{ N}_x/\text{cm}^3$  en la primera superficie de la oblea y mayor que o igual a aproximadamente  $1 \times 10^{15} \text{ N}_x/\text{cm}^3$  en la segunda superficie de la oblea, donde  $\text{N}_x$  significa para un dopante aceptor de portador de carga, el número de aceptores de portador de carga  $\text{N}_a$  y, para un dopante donante de portador de carga, el número de donantes de portador de carga  $\text{N}_d$ .

9. El procedimiento de la reivindicación 1, comprendiendo el semiconductor un semiconductor de tipo p, siendo el dopante primario elegido del grupo que consiste en:

boro, aluminio, galio e indio.

10. El procedimiento de la reivindicación 1, comprendiendo el semiconductor un semiconductor de tipo n, siendo el dopante primario elegido del grupo que consiste en: fósforo, arsénico, antimonio (Sb) y bismuto.

11. El procedimiento de la reivindicación 6, comprendiendo el semiconductor un semiconductor de tipo p, siendo el dopante de compensación elegido del grupo que consiste en:

fósforo, arsénico, antimonio (Sb) y Bismuto.

12. El procedimiento de la reivindicación 6, comprendiendo el semiconductor un semiconductor de tipo n, siendo el dopante de compensación elegido del grupo que consiste en boro, aluminio, galio e indio.

13. El procedimiento de la reivindicación 11, que comprende además la etapa de proporcionar en el material fundido, un dopante de contracomensación seleccionado del grupo que consiste en: aluminio, galio e Indio.

14. El procedimiento de la reivindicación 12, que comprende además la etapa de proporcionar en el material fundido, un dopante de contracomensación seleccionado del grupo que consiste en: arsénico, antimonio y bismuto.



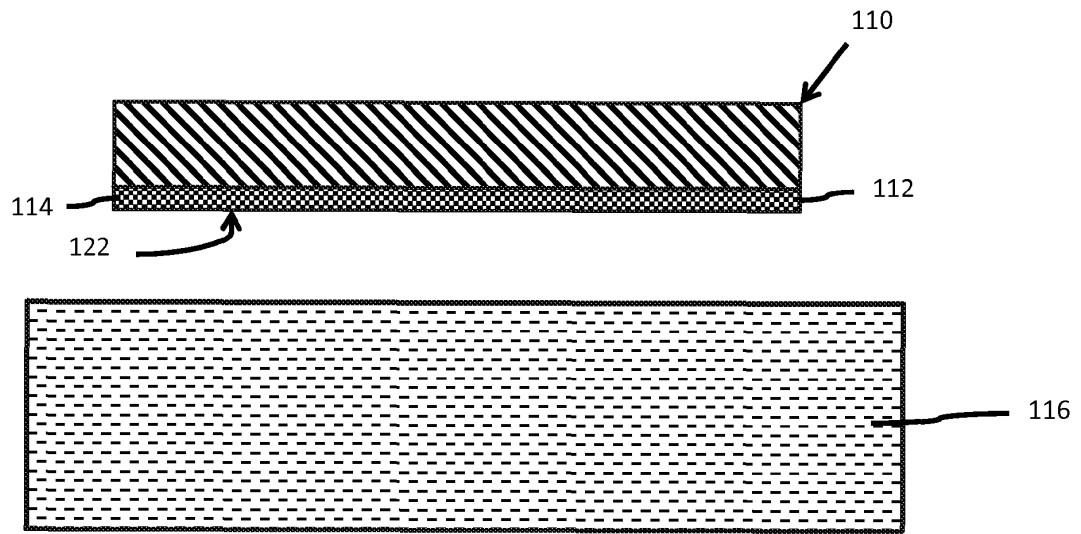


Fig. 1A

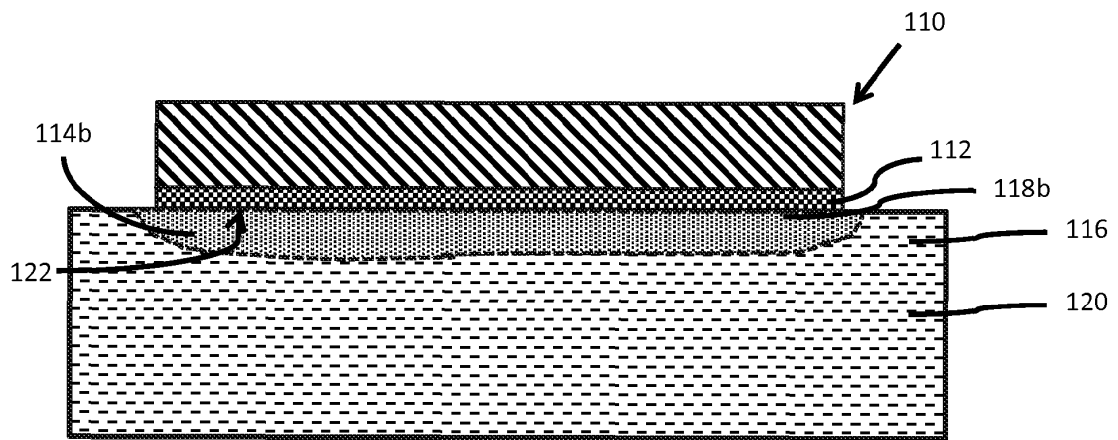


Fig. 1B

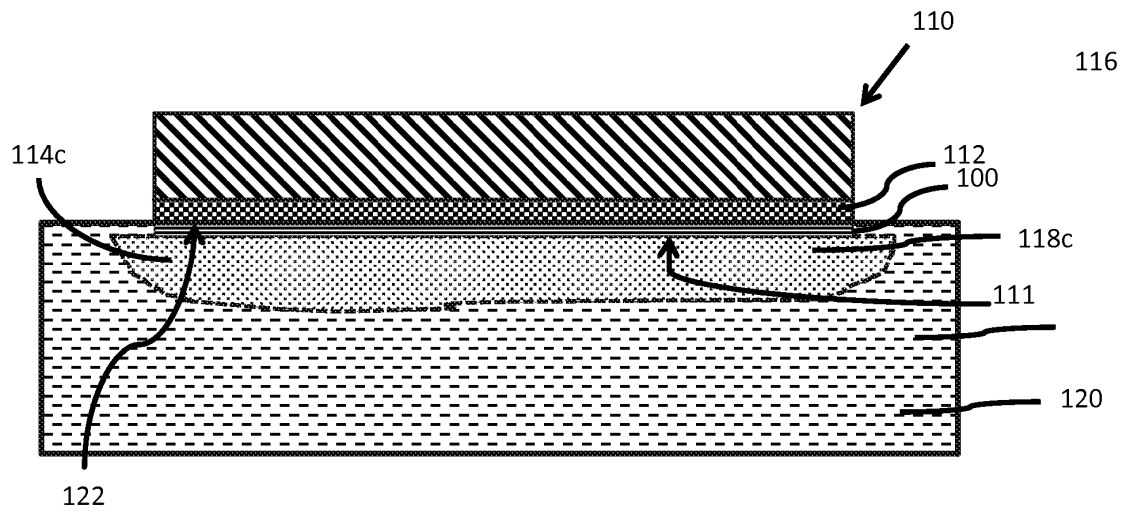


Fig. 1C

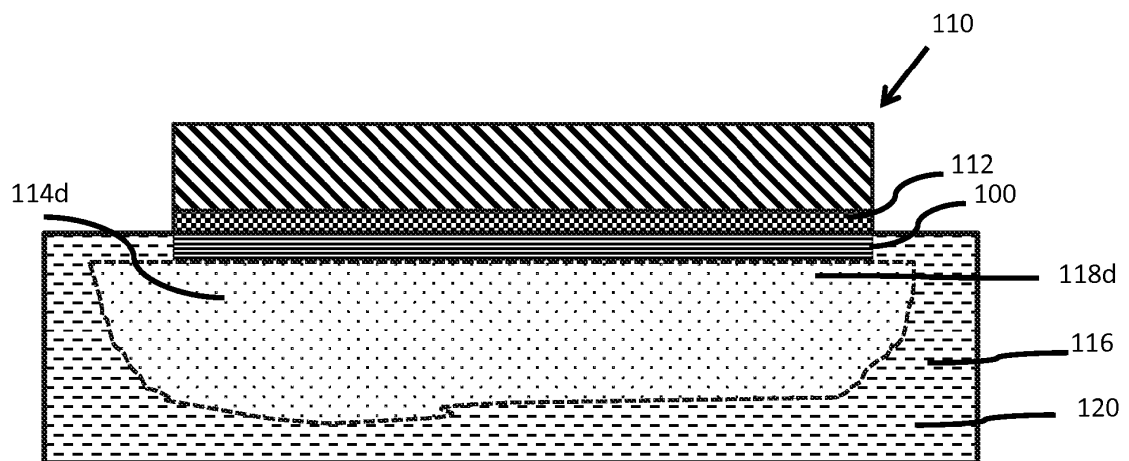


Fig. 1D

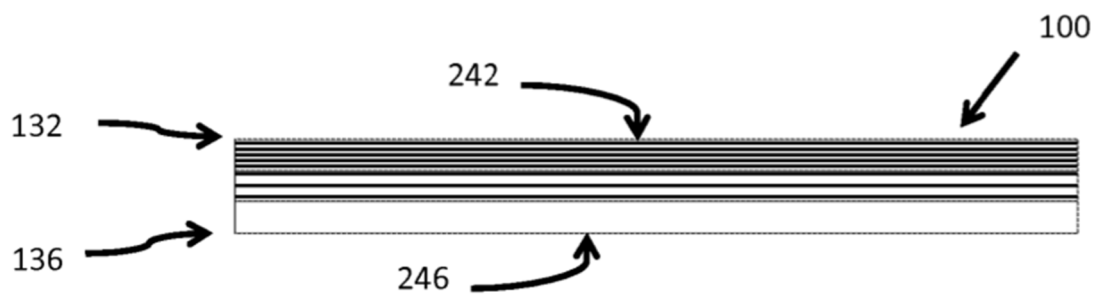


Fig. 2A

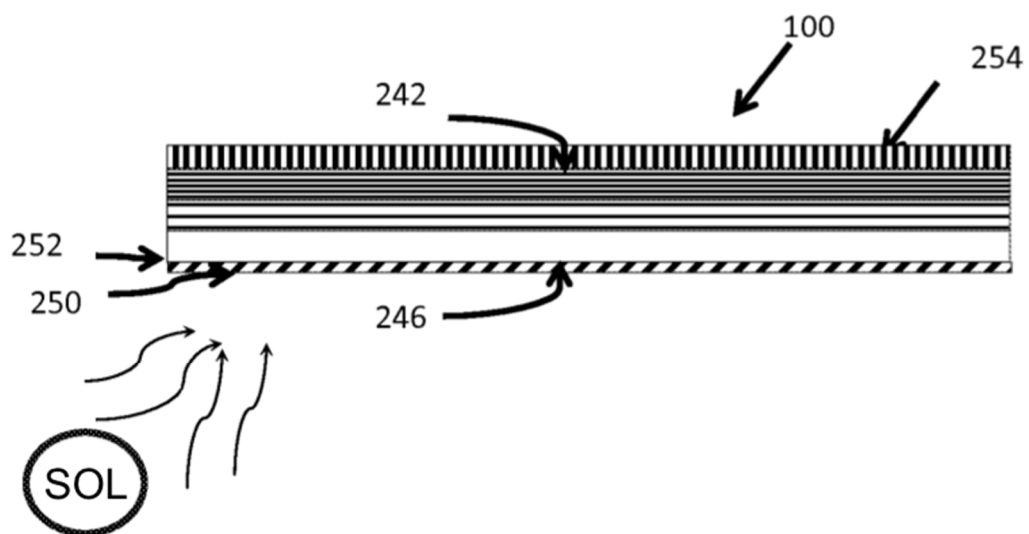


Fig. 2B

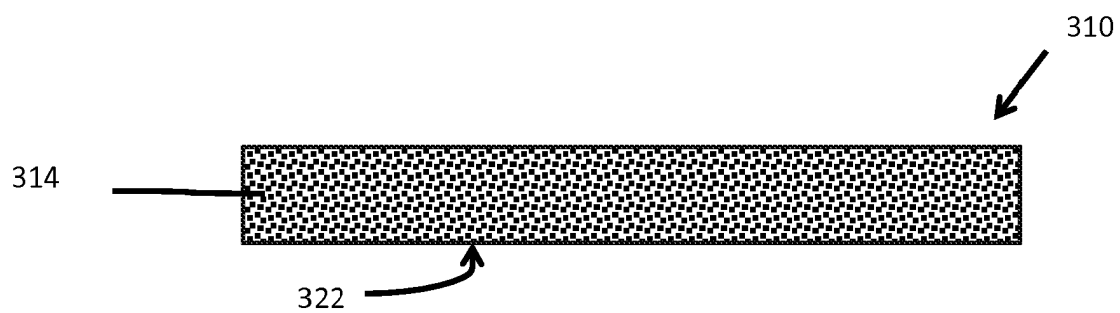


Fig. 3

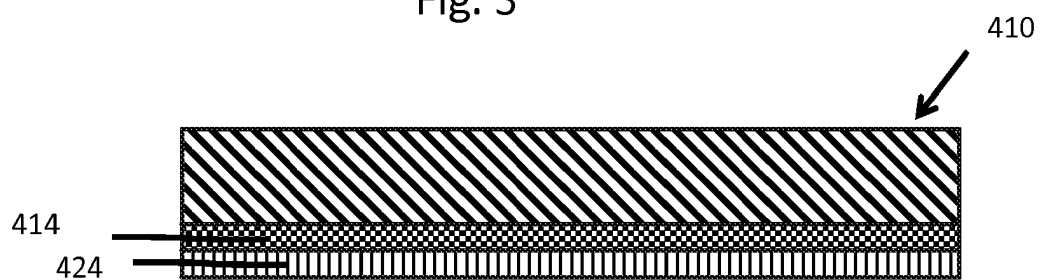


Fig. 4

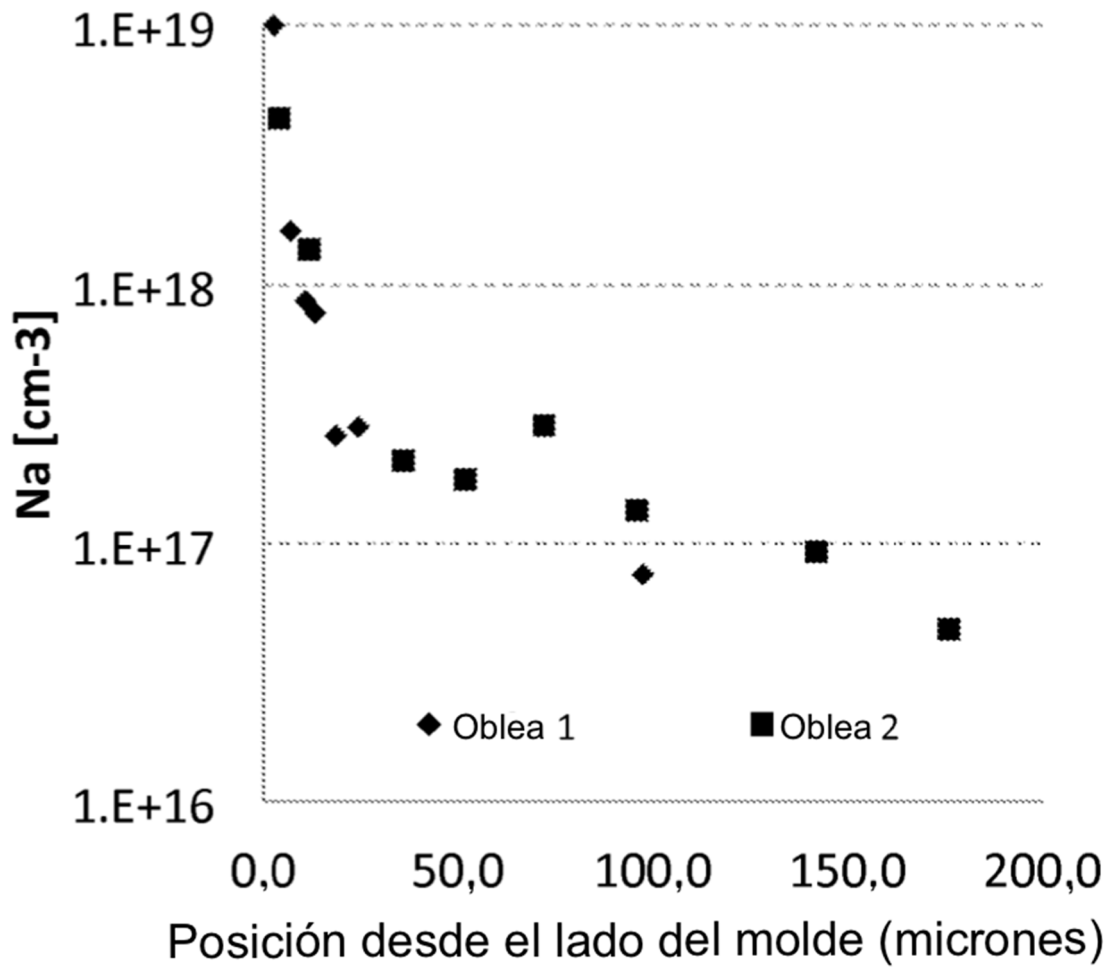


Fig. 5

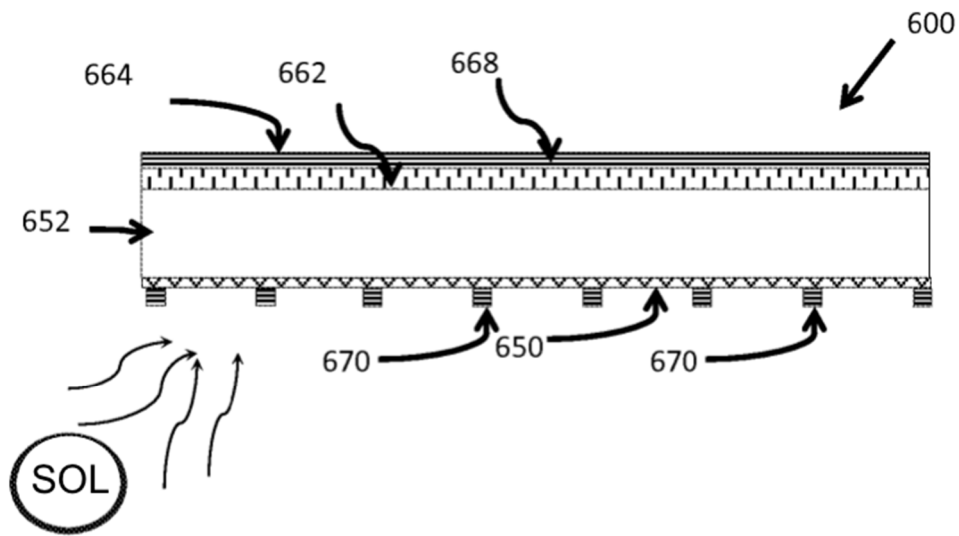


Fig. 6A  
(TÉCNICA ANTERIOR)

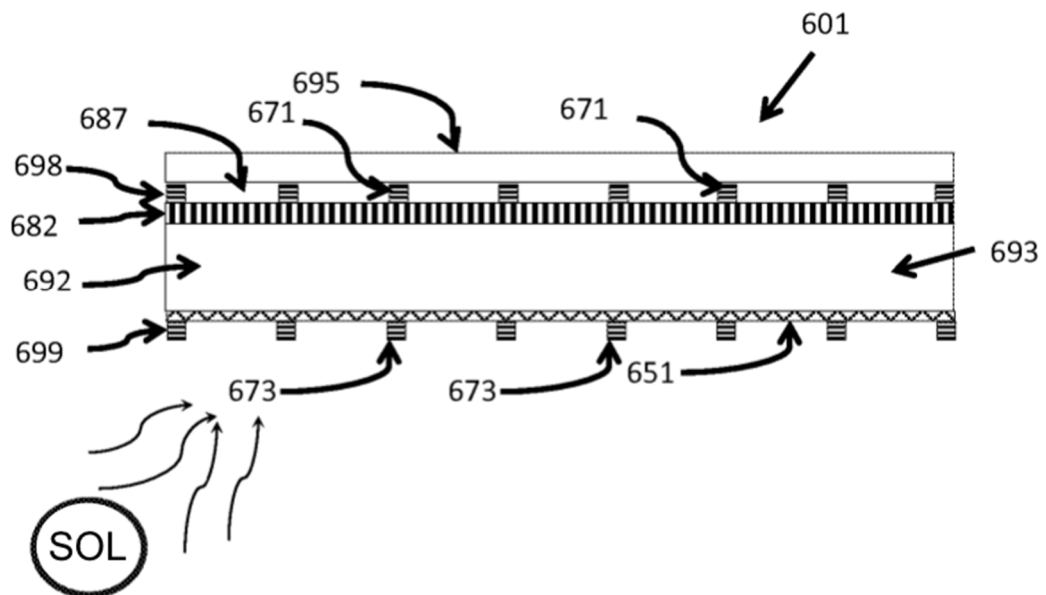


Fig. 6B

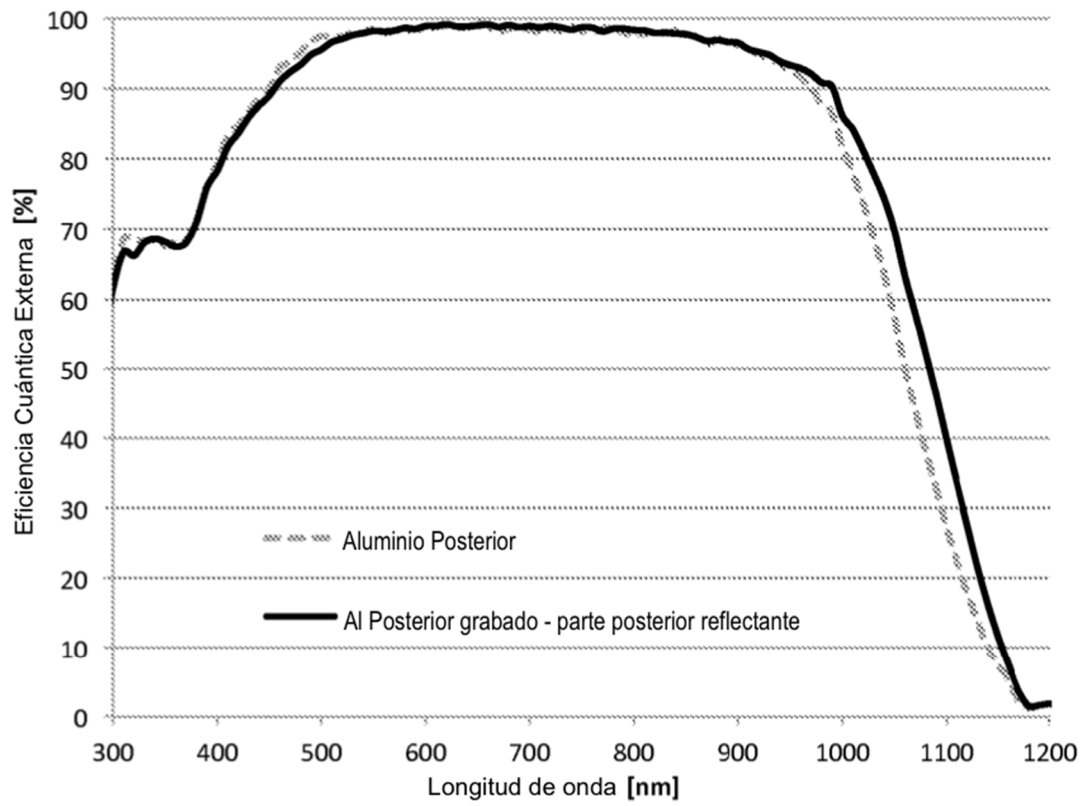


Fig. 7

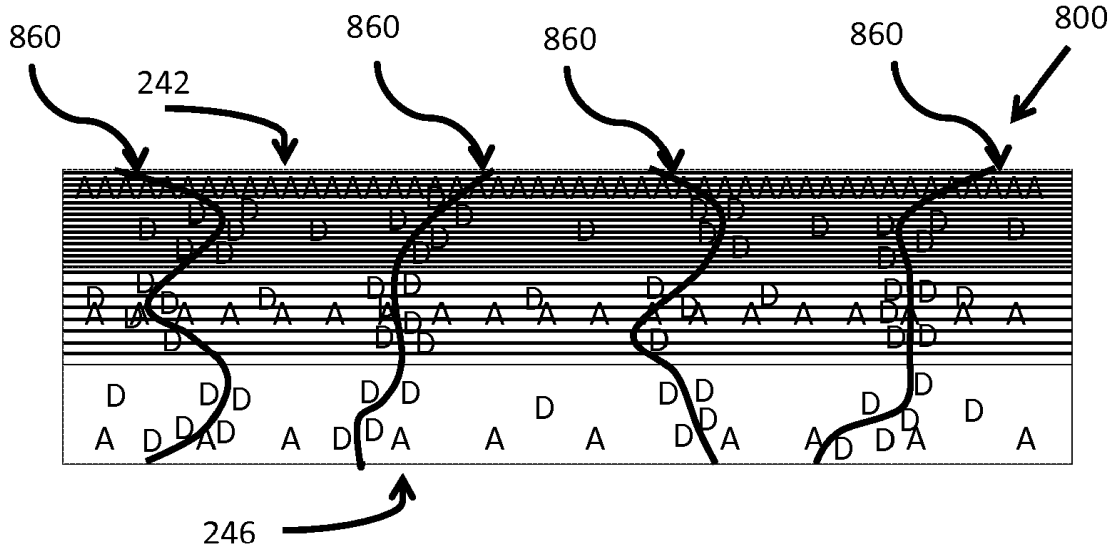


Fig. 8A

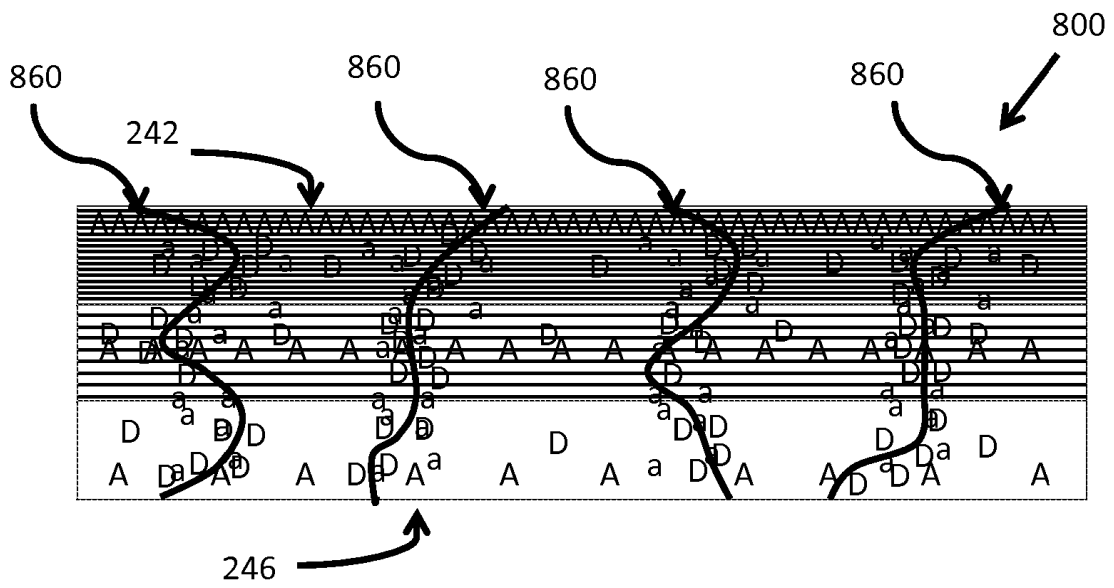


Fig. 8B