

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 672 245**

51 Int. Cl.:

**H01J 37/32** (2006.01)

**H01L 31/18** (2006.01)

**C23C 14/04** (2006.01)

**C23C 16/509** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **31.08.2015** **E 15306338 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **18.04.2018** **EP 3136419**

54 Título: **Aparato generador de plasma y procedimiento de fabricación de dispositivos con patrones usando procesamiento de plasma resuelto espacialmente**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**13.06.2018**

73 Titular/es:

**TOTAL S.A. (33.3%)**  
**2, Place Jean Millier, La Défense 6**  
**92400 Courbevoie, FR;**  
**ÉCOLE POLYTECHNIQUE (33.3%) y**  
**CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE (33.3%)**

72 Inventor/es:

**JOHNSON, ERIK;**  
**BRUNEAU, BASTIEN;**  
**ROCA I CABARROCAS, PERE y**  
**BULKIN, PAVEL**

74 Agente/Representante:

**LINAGE GONZÁLEZ, Rafael**

**ES 2 672 245 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**

Aparato generador de plasma y procedimiento de fabricación de dispositivos con patrones usando procesamiento de plasma resuelto espacialmente

5

**CAMPO TÉCNICO DE LA INVENCION**

La invención se refiere a un aparato y a un procedimiento para generar y manipular plasma utilizado para la deposición y/o grabado de materiales.

10

Más precisamente, la invención se refiere a un aparato y a un procedimiento para producir dispositivos que incorporan una película delgada con patrones producida por deposición de plasma y/o grabado con plasma a un coste moderado en comparación con las etapas convencionales de enmascaramiento, fotolitografía o procesamiento por láser.

15

La invención también se refiere a la fabricación de celdas solares de alta eficacia a costes de fabricación reducidos. La invención se refiere, en particular, a la fabricación de celdas solares de contacto posterior interdigital (IBC).

**INFORMACIÓN DE ANTECEDENTES Y TÉCNICA ANTERIOR**

20

Numerosos documentos describen dispositivos y procedimientos para la fabricación de dispositivos que incorporan una película delgada con patrones y, en particular, dispositivos de celdas solares.

25

Las etapas de deposición y/o grabado de película delgada se pueden realizar mediante diferentes técnicas y, en particular, mediante deposición química de vapor mejorada por plasma (PECVD) en general a bajas temperaturas (menos de 300 °C).

30

En microelectrónica, la etapa de estampación se basa generalmente en la fotolitografía para generar películas delgadas con patrones con dimensiones críticas submicrométricas (CD) y con relaciones de aspecto muy elevadas. Sin embargo, la fotolitografía requiere materiales adicionales, etapas de procesamiento y herramientas costosas, tal como un escalador y, por lo tanto, induce grandes costes de fabricación. Se pueden usar técnicas de resolución mucho más inferior, pero también implican múltiples etapas de enmascaramiento y grabado.

35

La ablación con láser también se puede usar para formar orificios en una pila de película delgada sin implicar el enmascaramiento. Sin embargo, el procesamiento láser también es costoso.

40

Las celdas solares de silicio cristalino industrial (c-Si) de alta eficiencia utilizan contactos localizados para reducir el área superficial en contacto con el metal o para reducir el sombreado de las cuadrículas metálicas.

45

Las células c-Si industriales más eficientes utilizan una configuración de contacto posterior interdigital (IBC), pero es un diseño caro de implementar, que implica más etapas de proceso: ablación láser para formar aperturas dieléctricas para contactos puntuales o litografía para formar los contactos IBC. Sin embargo, los diseños IBC y los contactos puntuales se usan actualmente en la industria, como se describe por R. Swanson et al. (Proceeding of the 33rd IEEE PVSC, San Diego, CA, EE. UU., 2008).

50

Otro diseño industrial de alta eficiencia (tecnología HIT) utiliza una fina capa de silicio hidrogenado intrínseco amorfo (a-Si:H), depositado por PECVD, como la capa pasivante. La pasivación HIT se realiza ventajosamente a baja temperatura (menos de aproximadamente 250 °C) reduciendo así el presupuesto térmico del proceso, y dando como resultado propiedades de pasivación muy buenas para la superficie de la oblea.

55

Panasonic (Masuko et al, IEEE Journal of Photovoltaics 4 (2014) 1433-1435) ha demostrado recientemente un diseño de celda solar IBC usando pasivación HIT de área grande. Sin embargo, el uso de una fina capa intrínseca de pasivación a-Si:H en una configuración IBC implica una etapa de estampado posterior para las capas dopadas, utilizando fotolitografía, reduciendo así la rentabilidad de la pasivación HIT a baja temperatura.

60

Uno de los desafíos en la implementación de una operación de enmascaramiento en la superficie prístina de una oblea de silicio (con óxido eliminado) es la alta sensibilidad de esta superficie al daño y la contaminación. El documento WO-A1-2010/021539 describe un dispositivo para generar una descarga de plasma, adecuado para el estampado directo sin máscara de un sustrato.

**SUMARIO DE LA INVENCION**

65

Por lo tanto, un objeto de la invención es proporcionar un aparato y un procedimiento para formar dispositivos que tengan una estructura con patrones, tal como una superficie con patrones o capas con patrones, especialmente para aplicaciones de celdas solares de alta eficiencia o dispositivos semiconductores o dispositivos optoelectrónicos, a un coste de fabricación reducida y preferiblemente a baja temperatura.

Un objeto adicional de la invención es proporcionar un aparato y un procedimiento alternativos para formar contactos interdigitados en celdas solares IBC y/o para formar aperturas dieléctricas para contactos puntuales en celdas solares.

5 Un objeto adicional de la invención es proporcionar un procedimiento y un aparato completamente integrados que permitan tanto la pasivación como el estampado superficial en una única etapa de flujo de procesamiento y/o en una única cámara de herramientas de procesamiento, para evitar daños superficiales, contaminación, y evitar costes de capital relacionados con herramientas adicionales.

10 Los objetos anteriores se logran según la invención proporcionando un aparato generador de plasma para fabricar dispositivos que tengan una capa o superficie con patrones, como se define en la reivindicación 1. El aparato generador de plasma comprende una cámara de reactor de plasma, un conjunto de alimentación de gas para introducir un gas de entrada en la cámara de reactor de plasma a una presión elegida, un primer conjunto de electrodos y un segundo conjunto de electrodos colocados en la cámara de reactor de plasma, estando el primer conjunto de electrodos espaciados del segundo conjunto de electrodos por un volumen entre electrodos y un suministro de alimentación eléctrica para generar una diferencia de tensión  $V(t)$  variable en el tiempo o constante entre el primer conjunto de electrodos y el segundo conjunto de electrodos.

15 Según la invención, el primer conjunto de electrodos comprende una pluralidad de protuberancias y una pluralidad de rebajes, estando el segundo conjunto de electrodos configurado para recibir un sustrato que tiene una superficie orientada hacia la pluralidad de protuberancias y la pluralidad de rebajes, estando las protuberancias y rebajes dimensionados y configurados a distancias respectivas de la superficie del sustrato para generar una pluralidad de zonas de plasma aisladas espacialmente situadas selectivamente entre dicha superficie del sustrato y dicha pluralidad de rebajes o entre dicha superficie del sustrato y dicha pluralidad de protuberancias a la presión elegida del gas de entrada.

20 Por lo tanto, el aparato generador de plasma permite realizar un procesamiento de plasma sobre la superficie del sustrato en áreas que definen un patrón que está aproximadamente delimitado por las protuberancias y rebajes, para formar un patrón sobre la superficie del sustrato.

25 La invención permite la deposición espacialmente selectiva de la capa o capas con patrones usando deposición de vapor químico potenciada por plasma, sin tocar la superficie del sustrato. Dependiendo de las condiciones del plasma, y en particular de la composición química del gas de entrada, la invención también permite el grabado selectivo espacial de la superficie del sustrato, formando así una superficie con patrones con aberturas, utilizando grabado con vapor químico mejorado con plasma sin tocar la superficie del sustrato. En otras palabras, la invención logra una operación de enmascaramiento sin aplicar una máscara sobre la superficie del sustrato.

30 La presente descripción se basa en dar forma al primer conjunto de electrodos alimentado, usando así las dimensiones geométricas del primer conjunto de electrodos, así como los efectos de sombreado para limitar lateralmente la ignición del plasma a volúmenes bien definidos. Esto permite que se implemente una operación de enmascaramiento aproximado. Además, se pueden implementar múltiples patrones cambiando la configuración del electrodo en tiempo real. Además, se puede realizar una deposición uniforme sin máscara, o un proceso de grabado en la misma cámara de reactor de plasma alejando el electrodo de la superficie del sustrato, de manera que la ignición del plasma no se limite lateralmente por las protuberancias y rebajes, sino que se extienda sobre el volumen entre electrodos.

35 Según un régimen de operación particular, para una determinada diferencia de tensión aplicada óptima  $V(t)$ , que puede ser un potencial de CC constante o una diferencia de tensión variable en el tiempo idealmente con componentes de frecuencia en el intervalo de radiofrecuencia (500 kHz a 100 MHz), los rebajes están dimensionados para colocarse a una segunda distancia de la superficie del sustrato de modo que, para la diferencia de tensión aplicada  $V(t)$ , un producto de la presión elegida y la segunda distancia esté comprendido entre un primer umbral de ignición de plasma y un segundo umbral de extinción de plasma (asegurando así la ignición local de plasma entre los rebajes y la superficie del sustrato), y las protuberancias están dimensionadas para colocarse a una primera distancia de la superficie del sustrato de modo que, para la diferencia de tensión aplicada  $V(t)$ , otro producto de la presión elegida y la primera distancia es menor que el primer umbral de ignición de plasma (asegurando así que no haya ignición de plasma entre las protuberancias y la superficie del sustrato), de tal forma que el aparato generador de plasma genera zonas de plasma espacialmente aisladas entre la superficie del sustrato y los rebajes sin generar plasma localmente entre la superficie del sustrato y las protuberancias.

40 Según un aspecto particular de la invención, para una determinada diferencia de tensión aplicada óptima  $V(t)$ , que puede ser un potencial de CC constante o un variable en el tiempo idealmente con componentes de frecuencia en el intervalo de radiofrecuencia (500 kHz a 100 MHz), las protuberancias están dimensionadas para colocarse a una primera distancia de la superficie del sustrato de forma que, para la diferencia de tensión aplicada  $V(t)$ , el producto de la presión y la primera distancia esté comprendida entre un primer umbral de ignición de plasma y un segundo umbral de extinción de plasma (asegurando así la ignición local de plasma entre las protuberancias y la superficie

del sustrato), y los rebajes están dimensionados para colocarse a una segunda distancia de la superficie del sustrato de modo que, para la diferencia de tensión aplicada  $V(t)$ , otro producto de la presión elegida y la segunda distancia es mayor que un segundo umbral de extinción de plasma (lo que garantiza que no haya ignición de plasma localmente entre los rebajes y la superficie del sustrato), de tal forma que el aparato generador de plasma genere zonas de plasma espacialmente aisladas entre la superficie del sustrato y las protuberancias sin generar plasma localmente entre la superficie del sustrato y los rebajes.

De acuerdo con todavía otro régimen de operación, el primer conjunto de electrodos comprende una pluralidad de protuberancias de perfil rectangular colocadas a una primera distancia de la superficie del sustrato y una pluralidad de rebajes de perfil rectangular que tienen fondos a una segunda distancia de la superficie del sustrato.

De acuerdo con una realización particular de la invención, el primer conjunto de electrodos comprende al menos una primera y una segunda parte, siendo la primera parte móvil con respecto a la segunda parte entre una primera posición y una segunda posición, de manera que, en la primera posición, dicho primer conjunto de electrodos forma una pluralidad de protuberancias y una pluralidad de rebajes, y, en la segunda posición, el primer conjunto de electrodos forma una superficie plana que se orienta hacia la superficie del sustrato.

Según otra realización de la invención, la pluralidad de rebajes comprende una pluralidad de cavidades, estando cada cavidad conectada al volumen entre electrodos por un canal, estando las cavidades dimensionadas de tal forma que el aparato genere plasma dentro de dichas cavidades a la presión elegida, y estando los canales dimensionados de manera que el plasma generado en las cavidades se difunda hacia el volumen entre electrodos.

Según un aspecto particular de esta realización, la pluralidad de rebajes o un subconjunto de la pluralidad de rebajes está conectada a una cavidad común, estando la cavidad común conectada al menos a una entrada de gas y al menos a una salida de gas, para garantizar condiciones óptimas de flujo de gas.

Según aspectos particulares de esta realización, dicha cavidad tiene un perfil cuadrado, rectangular, esférico o cónico y/o los canales tienen una forma de sección transversal elegido entre una forma rectangular, trapezoidal, cónica o cilíndrica, o una forma elegida para generar un patrón con perfil espacial determinado en la superficie del sustrato. Opcionalmente, estando los canales interconectados a una cavidad común, los canales de los canales interconectados tienen respectivas entradas de gas y/o salidas de gas con formas determinadas para formar características con patrones con una forma de perfil determinada.

Según una realización particular, el primer conjunto de electrodos comprende al menos un primer y un segundo subconjunto de rebajes, estando el primer subconjunto de rebajes aislado eléctricamente del segundo subconjunto de rebajes, y el primer conjunto de electrodos comprende un primer y un segundo subelectrodos, conectando el primer, respectivamente el segundo, subelectrodo eléctricamente el primer, respectivamente el segundo, subconjunto de rebajes, y el suministro de alimentación eléctrica está configurado para generar una primera, respectivamente una segunda, diferencia de tensión entre el primer, respectivamente el segundo, subelectrodos y el segundo conjunto de electrodos.

Según un aspecto particular, el primer conjunto de electrodos comprende al menos un primer y un segundo subconjuntos de rebajes, y el conjunto de alimentación de gas comprende una primera y una segunda líneas de gas de entrada, estando la primera, respectivamente la segunda, línea de gas en comunicación de fluido con el primer, respectivamente el segundo, subconjunto de rebajes, para inyectar un primer, respectivamente un segundo, gas de entrada en el primer, respectivamente el segundo, subconjunto de rebajes.

Según un aspecto particular y ventajoso de la invención, la pluralidad de protuberancias y la pluralidad de rebajes se disponen en una matriz periódica unidimensional o bidimensional.

Según otro aspecto particular y ventajoso de la invención, el primer conjunto de electrodos y/o el segundo conjunto de electrodos están montados en una fase de traslación o rotación.

Según otra realización de la invención, el aparato generador de plasma comprende una fuente eléctrica configurada para generar una diferencia de tensión a aplicar entre el primer y segundo electrodo, en el que la diferencia de tensión es constante en el tiempo, o comprende una única frecuencia base en el intervalo entre 500 kHz y 100 MHz o comprende una pluralidad de armónicos de una frecuencia base en el intervalo entre 500 kHz y 100 MHz, y en el que las respectivas amplitudes y fases de la pluralidad de armónicos se seleccionan para generar una diferencia de tensión que tiene una forma de onda con una asimetría de amplitud (por ejemplo, que se asemeja a una serie de picos o valles) o con una asimetría de pendiente (por ejemplo, que se asemeja a una forma de onda de tensión de diente de sierra).

La invención también se refiere a un procedimiento de fabricación de dispositivos con patrones que usa el procesamiento de plasma resuelto espacialmente, como se define en la reivindicación 13, que comprende las etapas de:

- Colocar un sustrato en una cámara de reactor de plasma de un aparato generador de plasma, estando el sustrato en contacto con un segundo conjunto de electrodos y que tiene una superficie orientada hacia un primer conjunto de electrodos que comprende pluralidad de protuberancias y una pluralidad de rebajes;
- 5      – Inyectar un gas de entrada o mezcla de gas en la cámara de reactor de plasma a una presión elegida;
- Configurar el primer conjunto de electrodos de modo que las protuberancias estén a una primera distancia y los rebajes estén a una segunda distancia de la superficie del sustrato,
- 10     – Aplicar una diferencia de tensión de CC o de radiofrecuencia entre el primer conjunto de electrodos y el segundo conjunto de electrodos, estando las protuberancias y rebajes dimensionados y configurados a distancias respectivas desde la superficie del sustrato para generar una pluralidad de zonas de plasma aisladas espacialmente localizadas selectivamente entre la superficie del sustrato y la pluralidad de rebajes o entre la superficie del sustrato y la pluralidad de protuberancias a la presión elegida del gas de entrada,
- 15     para formar por deposición o grabado un patrón sobre la superficie del sustrato.

De acuerdo con un aspecto particular y ventajoso, el procedimiento de fabricación de dispositivos con patrones comprende además una etapa de mover el primer conjunto de electrodos con relación al segundo conjunto de electrodos para modificar la primera distancia, y/o respectivamente la segunda distancia, de modo que el producto de la presión elegida y la primera distancia, y respectivamente el producto de la presión elegida y la segunda distancia, están comprendidos ambos entre un primer umbral de ignición de plasma y un segundo umbral de extinción de plasma, para generar una zona de plasma espacialmente uniforme que se extiende sobre el volumen entre electrodos.

25 Según otro aspecto particular y ventajoso, el procedimiento de fabricación de dispositivos con patrones comprende además las etapas de:

- aislar eléctricamente un primer subconjunto de rebajes de un segundo subconjunto de rebajes del primer conjunto de electrodos; y
- 30     – aplicar una primera, respectivamente una segunda, diferencia de tensión entre el segundo conjunto de electrodos y el primer, respectivamente el segundo, subconjunto de rebajes.

Según otro aspecto particular y ventajoso, el procedimiento de fabricación de dispositivos con patrones comprende además las etapas de:

- Conectar de forma fluida una primera, respectivamente una segunda, línea de gas a un primer, respectivamente un segundo, subconjunto de rebajes del primer conjunto de electrodos; y
- 40     – Inyectar un primer, respectivamente un segundo, gas de entrada en el primer, respectivamente, el segundo, subconjunto de rebajes, y/o
- Proporcionar una primera, respectivamente una segunda, salida de flujo de gas conectada al primer, respectivamente el segundo, subconjunto de rebajes, para evitar la mezcla de la composición de gas y lograr diferentes procesos de deposición/ataque en el primer y segundo subconjunto de rebajes.
- 45

La invención se aplica en particular a la fabricación de dispositivos de celdas solares fotovoltaicas en un aparato generador de plasma y/o utilizando un procedimiento de fabricación de dispositivos con patrones como el descrito en el presente documento.

## 50 **BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS**

Esta descripción se proporciona solo con fines ilustrativos no limitativos y se comprenderá mejor cuando se haga referencia a los dibujos adjuntos en los que:

- 55     - La Figura 1 representa esquemáticamente una sección transversal de un aparato de procesamiento de plasma de acuerdo con una primera realización, en un primer régimen operativo;
- 60     - la Figura 2 representa esquemáticamente una sección transversal de la primera realización de un aparato de procesamiento de plasma, en otro régimen operativo;
- la Figura 3 representa esquemáticamente una curva de tensión de ruptura para un aparato de procesamiento de plasma en función del producto de la presión del gas de entrada por separación del electrodo, comúnmente denominada curva de Paschen;

- las Figuras 4A-4B representan esquemáticamente una sección transversal de una variante de la primera realización de un aparato de procesamiento de plasma, con un electrodo de dos partes;
- 5 - las Figuras 5A-5C representan esquemáticamente un ejemplo de diferentes etapas para la fabricación de dispositivos con patrones que usan plasma resuelto espacialmente de acuerdo con una realización de la invención;
- 10 - la Figura 6 ilustra esquemáticamente electrodos interdigitados obtenidos del proceso ejemplar de la Figura 5;
- las Figuras 7A-7B ilustran ejemplos de formación de contactos puntuales usando procesamiento de plasma resuelto espacialmente de acuerdo con diversas realizaciones de la invención;
- 15 - la Figura 8 representa esquemáticamente una sección transversal de una segunda realización de un aparato de procesamiento de plasma;
- la Figura 9 representa esquemáticamente una sección transversal de una variante de diseño de electrodo según la segunda realización de un aparato de procesamiento de plasma;
- 20 - la Figura 10 representa esquemáticamente una sección transversal de diversas cavidades según la segunda realización de un aparato de procesamiento de plasma;
- la Figura 11 representa esquemáticamente en sección transversal aún otra variante de configuración de inyección de gas en la que los canales están conectados a una cavidad común;
- 25 - la Figura 12 representa esquemáticamente en sección transversal otra variante de configuración de electrodos de acuerdo con una realización de la invención;
- la Figura 13 representa esquemáticamente en sección transversal aún otra variante de configuración de inyección de gas según otra realización de la invención;
- 30 - la Figura 14 representa esquemáticamente en sección transversal aún otra variante de la diferencia de tensión aplicada de diversas formas de onda configuradas para ajustar la proximidad del área de plasma con relación a la superficie de la muestra.

#### DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL EJEMPLO O EJEMPLOS

40 La presente descripción se refiere a una técnica para realizar el enmascaramiento sin contacto de un proceso de plasma, tal como deposición PECVD o grabado, restringiendo espacialmente, y más precisamente lateralmente, el área de ignición de plasma.

45 En una realización, esto se logra a través de un diseño de electrodo alimentado para un sistema PECVD de radiofrecuencia, que funciona en un primer régimen, generalmente a baja presión (<10 Torr (<1333 Pa)), en el que la ignición del plasma cerca de la protuberancia del primer conjunto de electrodos se vea inhibida por la distancia entre el primer conjunto de electrodos y el sustrato que es menor que el ancho de la vaina del plasma utilizado para la deposición.

50 En diversas realizaciones, los canales u orificios en el electrodo determinan dónde se enciende el plasma en el primer régimen operativo, donde una pequeña distancia evita la ignición del plasma a baja presión.

55 En otro régimen operativo, generalmente a alta presión (>10 Torr (>1333 Pa)), la ignición del plasma del primer conjunto de electrodos se permite cerca de la protuberancia y se inhibe cerca de los rebajes por la distancia entre el primer conjunto de electrodos y el sustrato que es demasiado grande para sostener un plasma en los rebajes, en las condiciones de presión y tensión elegidas usadas para el plasma.

60 La ignición espacialmente selectiva del plasma permite depositar o grabar películas delgadas en áreas predeterminadas sin entrar en contacto con la superficie, logrando así un enmascaramiento sin contacto. Las dimensiones críticas y los tamaños de rasgo de las capas con patrones obtenidas mediante esta técnica se encuentran en el rango submilimétrico (de uno a varios cientos de micrómetros) y son consistentes con los requeridos para la fabricación de celdas solares de contactos posteriores interdigitales (IBC) o aperturas de contacto puntual para celdas solares.

#### Dispositivo

65

La Figura 1 representa esquemáticamente una sección transversal de un aparato de procesamiento de plasma de acuerdo con una primera realización de la invención, y que funciona en un primer régimen. Generalmente, el aparato de procesamiento de plasma comprende una cámara de vacío en conexión de fluido con una línea de gas presurizado para inyectar un gas de entrada y un sistema de bombeo de vacío para evacuar el gas de salida. La cámara de vacío encierra un soporte de sustrato y un sistema de electrodos para alimentar el plasma en el interior de la cámara de reacción.

Más específicamente, se considera el caso representativo de un reactor de plasma acoplado capacitivamente de radiofrecuencia (RF) que comprende un primer conjunto de electrodos 1 y un segundo conjunto de electrodos 2. Una fuente de alimentación de RF 6 está conectada eléctricamente al primer y segundo conjuntos de electrodos 1, 2, para aplicar una diferencia de tensión de RF entre el primer y segundo conjuntos de electrodos. En este ejemplo, el segundo conjunto de electrodos 2 está conectado eléctricamente a tierra, de manera que el primer conjunto de electrodos 1 sea el electrodo alimentado.

Se coloca un sustrato 5 en el segundo conjunto de electrodos 2 de manera que una superficie 51 del sustrato 5 esté orientado hacia el primer conjunto de electrodos 1. Por ejemplo, el sustrato es un semiconductor tal como silicio monocristalino o policristalino o un sustrato de vidrio. Como alternativa, el sustrato 5 puede comprender una pila de película delgada que forma la superficie 51. La superficie 51 del sustrato 5 puede ser plana o puede ser una superficie con patrones.

En el ejemplo de la figura 1, el segundo conjunto de electrodos 2 es plano, como en un reactor de plasma acoplado capacitivamente convencional. Por el contrario, en esta primera realización, el primer conjunto de electrodos 1 comprende una pluralidad de rebajes 12 separados entre sí o rodeados por las protuberancias 11. En el ejemplo de la Figura 1, las protuberancias 11 y los rebajes 12 tienen una forma rectangular, con una anchura  $W1$ , respectivamente  $W2$  a lo largo de un eje X paralelo a la superficie del sustrato. Las protuberancias 11 están a una primera distancia  $D1$  de la superficie 51 del sustrato, y los rebajes 12 están a una segunda distancia  $D2$  de la superficie 51 del sustrato. El sistema de inyección de gas (no representado en la Figura 1) está configurado de manera que el gas de entrada llene el volumen entre electrodos entre el primer y el segundo conjunto de electrodos y, por lo tanto, llene los rebajes 12.

Más precisamente, en un primer régimen ilustrado en la Figura 1, la primera distancia  $D1$  se ajusta de manera que, a la tensión aplicada y a la presión elegida  $P$  del gas de entrada en la cámara del reactor de plasma, la primera distancia  $D1$  sea inferior a la de un primer valor umbral correspondiente a un umbral de ignición de plasma. Este primer régimen generalmente funciona a baja presión ( $<10$  Torr ( $<1333$  Pa)). Como ejemplo de las condiciones operativas del primer régimen, el gas de entrada es una mezcla de al menos un gas precursor de deposición (tal como  $\text{SiH}_4$ ) o un gas de grabado (tal como  $\text{SF}_6$ ) y posiblemente un segundo gas tampón (tal como  $\text{H}_2$ ) a una presión entre 0,1 y 10 Torr (entre 13 y 1333 Pa), el ancho  $W1$  está entre 0,75 mm y 2 mm, la primera distancia  $D1$  está configurada entre 0,1 y 1,0 mm, de manera que esta primera distancia  $D1$  es demasiado pequeña para la ignición de plasma entre las protuberancias 11 y la superficie 51 de la muestra 5 para la tensión de RF aplicada elegida, con una amplitud entre 200 V y 800 V.

Sin embargo, en este primer régimen, los rebajes 12 están dimensionados de manera que la segunda distancia  $D2$  está por encima del primer valor umbral correspondiente a un umbral de ignición de plasma. Por lo tanto, varios plasmas localizados 22 se encienden dentro de los rebajes 12 y se extienden por delante de los rebajes 12 hasta la superficie 51 del sustrato 5. Sin embargo, las protuberancias 11 proporcionan un efecto de enfriamiento que evita que las zonas de plasma localizadas 22 se fusionen en un plasma extendido. Por lo tanto, las áreas de plasma localizadas 22 permanecen confinadas en espacios espacialmente aislados entre los rebajes 12 y la superficie 51 del sustrato 5. Como ejemplo del primer régimen, la anchura  $W2$  de los rebajes 12 está entre 0,1 mm y 5 mm, la segunda distancia  $D2$  se configura a al menos 2 mm, siendo la anchura  $W1$  de las protuberancias 11 al menos de 0,1 mm.

Este primer régimen permite, por ejemplo, la deposición local de una capa con patrones 32 por PECVD, estando la dimensión lateral de la capa delgada con patrones 32 a lo largo del eje X determinada principalmente por las anchuras  $W1$  de las protuberancias 11 y por las anchuras  $W2$  de los rebajes 12.

Los rebajes 12 pueden tener una geometría unidimensional y extenderse a lo largo del eje Y con un perfil similar, para generar patrones que se extienden longitudinalmente sobre la superficie de la muestra a lo largo del eje Y.

Como alternativa, los rebajes 12 pueden tener una geometría bidimensional y, por ejemplo, tener un perfil similar al ilustrado en la Figura 1 a lo largo del eje Y, para generar patrones limitados en ambas direcciones X e Y en la superficie 51 de la muestra 5.

Por supuesto, también se contemplan geometrías más complejas de protuberancias 11 y rebajes 12 sin apartarse del marco de la presente descripción.

La proporción relativa de la capa con patrones de las áreas depositadas 32 frente a las áreas no depositadas en el ejemplo de la Figura 1 será consistente con una aplicación de dejar un área para depositar otra capa entre la capa con patrones 32, por ejemplo, para la creación de contactos interdigitados.

5 Mediante el aumento de la anchura W2 de los rebajes 12 y disminuyendo relativamente la anchura W1 de las protuberancias 11, así como estableciendo estos rebajes en dos dimensiones, se permite depositar películas continuas con pequeños orificios. Si tales películas se forman a partir de un material dieléctrico, tal configuración podría usarse para implementar, por ejemplo, contactos puntuales.

10 La Figura 2 representa esquemáticamente una sección transversal de la primera realización del aparato de procesamiento de plasma que opera en un segundo régimen. Los mismos números de referencia se refieren a los mismos elementos que se representan en la Figura 1. En este segundo régimen, la primera distancia D1 se ajusta de manera que, para una diferencia de tensión aplicada dada y a una presión elegida P del gas de entrada en la cámara del reactor de plasma, generalmente a una presión relativamente alta (>10 Torr (>1333 Pa)), la primera  
 15 distancia D1 es más alta que un primer valor de umbral correspondiente a un umbral de ignición de plasma. Por lo tanto, en el segundo régimen, los plasmas localizados 21 se encienden entre las protuberancias 11 y la superficie 51 del sustrato 5. Al mismo tiempo, los rebajes 12 están situados a una segunda distancia D2 que está por encima de un segundo valor umbral correspondiente a un umbral de extinción de plasma. Los rebajes 12 están dimensionados de manera que un efecto de enfriamiento evite que las zonas de plasma localizadas 21 se extiendan en los rebajes.  
 20 Por lo tanto, las áreas de plasma localizadas 21 permanecen confinadas en espacios espacialmente aislados entre las protuberancias 11 y la superficie 51 del sustrato 5.

Como ejemplo del segundo régimen, la mezcla de gases de entrada está compuesta como mínimo por un gas precursor de deposición (tal como SiH<sub>4</sub>) o un gas de grabado (tal como SF<sub>6</sub>), y posiblemente un gas tampón (tal como He) a una presión de entre 10 y 100 Torr (entre 1,3 x 10<sup>3</sup> y 1,3 x 10<sup>4</sup> Pa), la tensión aplicada está entre 100 V y 1 kV, la primera distancia D1 está configurada entre 0,1 y 1 mm, de manera que esta primera distancia D1 es suficientemente alta para la ignición por plasma entre las protuberancias 11 y la superficie 51 de la muestra 5, y la segunda distancia D2 se ajusta de 2 a 10 mm, de modo que la segunda distancia D2 es demasiado alta para la ignición del plasma en los rebajes 12.  
 25

30 En el segundo régimen, cuando la presión combinada con una gran distancia limita la ignición (generalmente alta presión), las protuberancias 11 de la superficie del electrodo determinan el patrón 31 que se deposita, dando como resultado una imagen complementaria o negativa de la capa de patrón positivo 32 depositada en el primer régimen, con el mismo primer conjunto de electrodos.  
 35

La Figura 3 ayuda a explicar los diferentes regímenes operativos expuestos en la invención. La Figura 3 representa esquemáticamente una curva de tensión de ruptura Vb de un aparato de procesamiento de plasma en función del producto de presión de gas de entrada P y la separación de electrodo D para un reactor de plasma de RF acoplado capacitivamente o un reactor de plasma de CC directamente acoplado, comúnmente denominada curva de Paschen.  
 40 La tensión de ruptura Vb se define como la tensión mínima a aplicar entre los electrodos para la ignición del plasma en función de la presión P, para una distancia entre electrodos D dada o en función de la distancia entre electrodos D, para una presión dada P.

45 Para el procesamiento de plasmas, el intervalo de presión P generalmente está comprendido entre unos pocos miliTorr y varias decenas de Torr (entre algunos Pa y varios miles de Pa), o menos de 100 Torr (menos de 1,3 x 10<sup>4</sup> Pa). Se considera una amplitud de tensión de RF Va aplicada al primer conjunto de electrodos 1, esta amplitud de tensión de RF Va es mayor que el valor mínimo de la curva de tensión de ruptura. La intersección de esta tensión aplicada Va con la curva de tensión de ruptura define un primer valor umbral T1 y un segundo umbral T2.

50 En primer lugar, se considera el área del gráfico donde el producto PxD de presión P por la distancia entre electrodos D está por debajo del primer valor umbral T1: en estas condiciones, no hay ignición de plasma. O, en otras palabras, para una presión P elegida y una amplitud de tensión de RF elegida Va, si la separación de electrodos D está por debajo de una primera distancia umbral, no hay ignición de plasma ya que la tensión aplicada Va es menor que la curva de tensión de ruptura Vb. A continuación, se considera el área del gráfico donde el producto PxD está por encima del primer valor umbral T1 y por debajo del segundo valor umbral T2: en estas condiciones, hay ignición de plasma ya que la tensión aplicada Va a los electrodos es más superior a la curva de tensión de ruptura Vb. O, en otras palabras, para una presión P elegida y una tensión aplicada elegida Va, si la separación de electrodos D es mayor que la primera distancia umbral y por debajo de una segunda distancia umbral, se produce la ignición de plasma. Finalmente, se considera el área del gráfico donde el producto PxD está por encima del segundo valor umbral T2: en estas condiciones, no hay plasma ya que la tensión aplicada Va es menor que la curva de tensión de ruptura Vb. O, en otras palabras, para una presión P elegida y una tensión aplicada elegida Va, si la separación de electrodos D es mayor que la segunda distancia umbral, no hay ignición de plasma.  
 55  
 60

65 El primer régimen operativo del aparato generador de plasma según la primera realización de la invención, como se ilustra en la Figura 1, corresponde a las condiciones en las que la primera distancia D1 es más pequeña que una primera distancia umbral T1/P determinada en la Figura 3 por una presión dada P y una tensión aplicada Va, y

cuando la segunda distancia D2 está entre una primera y una segunda distancias umbral  $[T1/P; T2/P]$ , para la misma presión P y la tensión aplicada Va.

5 Por el contrario, el segundo régimen operativo del aparato generador de plasma según la primera realización de la invención, como se ilustra en la Figura 2, corresponde a las condiciones en las que la primera distancia D1 está entre la primera y la segunda distancias umbral, y donde la segunda la distancia D2 es mayor que la segunda distancia umbral, como se determina en la Figura 3. O bien, para las distancias dadas D1 y D2, la presión P aumenta de manera que el producto  $PxD1$  esté comprendido entre T1 y T2, y el producto  $PxD2$  sea mayor que T2.

10 Adicionalmente, en un tercer régimen, cuando tanto la primera como la segunda distancia D1 y D2 aumentan y/o cuando aumenta la presión P, de manera que ambos productos  $PxD1$  y  $PxD2$  están situados entre el primer umbral T1 y el segundo umbral T2, el plasma se enciende sobre todo el primer conjunto de electrodos, de manera que las áreas de plasma 22 dentro de los rebajes 12 se fusionan con las áreas de plasma 21 orientadas hacia las protuberancias, formando así una sola área de plasma extendida.

15 Como alternativa, o de forma complementaria al cambio de distancia entre el primer conjunto de electrodos 1 y la superficie del sustrato, los expertos en la técnica reconocerán que los tres regímenes diferentes descritos anteriormente pueden obtenerse controlando la presión de entrada P y/o la tensión aplicada Va. Sin embargo, esta técnica está limitada por los límites de las condiciones del proceso necesarios para lograr las etapas deseados, en particular la pasivación de una superficie o la deposición de capas dopadas de alta calidad.

20 Sin embargo, en aras de la claridad de la presente descripción, se asume que la tensión aplicada Va y la presión P del gas de entrada se mantienen constantes, y que la distancia entre el primer conjunto de electrodos 1 y la superficie del sustrato se controla para operar en el régimen apropiado.

25 Debe observarse que, hasta ahora, los aparatos de procesamiento de plasma se operan generalmente en las condiciones en que se forma una sola área de plasma entre el primer conjunto de electrodos y la superficie del sustrato, ya que la uniformidad de procesamiento suele ser un requisito importante, ya sea para la deposición o para el grabado. Incluso en sistemas generadores de plasma de tipo cátodo hueco previos, se forma una sola área de plasma debajo de la pluralidad de huecos dentro del cátodo, asegurando el procesamiento uniforme de un sustrato de área grande. Por el contrario, la presente descripción aprovecha una pluralidad de áreas plasmáticas localizadas y aisladas 21, o 22, para realizar un tratamiento de plasma localizado en la superficie 51 del sustrato 5, para permitir la deposición o grabado de película delgada espacialmente resuelta y, por lo tanto, la deposición de patrones. Por analogía con la fotolitografía, esta técnica de procesamiento de plasma se puede denominar litografía con plasma ya que permite depositar películas delgadas con patrones con determinadas dimensiones críticas (CD) y relaciones de aspecto (AR).

30 Una gran ventaja de la técnica de litografía con plasma es permitir la deposición directa de una película delgada con patrones, sin usar una máscara, evitando así las múltiples etapas de procesamiento asociadas con la litografía, incluida la fotolitografía, y evitando cualquier efecto perjudicial del contacto de una máscara con la superficie del sustrato.

35 Por lo tanto, la litografía con plasma como se describe en el presente documento permite una reducción drástica en los costes de procesamiento para la fabricación de capas o dispositivos con patrones.

40 En términos de rendimiento, la litografía con plasma permite formar patrones con dimensiones críticas submilimétricas, hasta aproximadamente cien micrómetros a lo largo de un eje X y/o Y. Estas dimensiones críticas son adecuadas para los requisitos actuales en la fabricación de celdas solares industriales.

45 El primer conjunto de electrodos se puede formar a partir de una sola parte conductora. Por ejemplo, los rebajes 12 se mecanizan como orificios o ranuras en una placa metálica a granel.

50 Como alternativa, el primer conjunto de electrodos 1 comprende un conjunto de partes unidas entre sí. En una variante alternativa, el primer conjunto de electrodos 1 comprende varias partes, siendo al menos una de las partes móvil con respecto a la(s) otra(s).

55 Como ejemplo, la Figura 4 representa esquemáticamente una sección transversal de una variante de la primera realización de un aparato de procesamiento de plasma, con el primer conjunto de electrodos 1 en dos partes. Más precisamente, el primer conjunto de electrodos 1 comprende una primera parte 111 y una segunda parte 121. Preferiblemente, la primera parte 111 y la segunda parte 121 tienen formas complementarias, tales como un peine, por ejemplo. En la Figura 4A, la primera parte 111 y la segunda parte 121 están ajustadas de manera que el primer conjunto de electrodos 1 forma una superficie plana a una distancia D de la superficie 51 del sustrato 5. La presión P, la distancia D y la tensión aplicada se ajustan para generar un plasma 20 entre el primer conjunto de electrodos 1 y la superficie 51 del sustrato 5. Esta primera configuración permite, por ejemplo, la deposición de una capa 30 que tiene un espesor uniforme (o sin patrones) sobre la superficie 51 del sustrato 5. Por ejemplo, esta configuración puede usarse para depositar una capa de pasivación de silicio hidrogenado amorfo intrínseco (i) a-Si:H. Como una

opción, al cambiar el gas de entrada, esta primera configuración de la Figura 4A también se puede usar para limpiar o eliminar una capa de óxido de la superficie 51 del sustrato 5 antes de la deposición de la capa i 30.

En una segunda posición, ilustrada en la Figura 4B, la segunda parte 121 se traslada a lo largo del eje Z en la dirección de la superficie de muestra 51, mientras que la primera parte 111 permanece fija, para formar los rebajes 12 y las protuberancias 11. En el ejemplo ilustrado en la Figura 4B, la segunda parte se dibuja cerca de la superficie del sustrato 51 de manera que las protuberancias 11 estén a una distancia D1 de la superficie del sustrato 51 y de manera que los fondos de los rebajes 12 estén a una distancia D2 de la superficie del sustrato 51. En la segunda posición, el aparato generador de plasma funciona en condiciones de presión y tensión de manera que las áreas locales de plasma 22 se encienden entre la superficie 51 del sustrato 5 y los rebajes 12 y las protuberancias 11 proporcionan un efecto de sombreado que evita la ignición del plasma entre las protuberancias 11 y la superficie 51 del sustrato 5, de forma similar a la descrita en relación con la Figura 1. Como alternativa, el aparato generador de plasma con un primer conjunto de electrodos de dos partes puede funcionar en condiciones de presión y tensión similares a las descritas en relación con la Figura 2.

Las capas depositadas con patrones pueden tener un espesor de 5 nanómetros a varios cientos de nanómetros, con dimensiones críticas de menos de un milímetro.

### **Proceso**

Ahora se describirán las Figuras 5A-5C, un ejemplo de proceso integrado que usa un aparato generador de plasma según la primera realización de la invención.

En la Figura 5A, el aparato generador de plasma opera en el tercer régimen, estando el primer conjunto de electrodos 1 a una distancia y ajustándose la presión P, de manera que ambos productos PxD1 y PxD2 estén situados entre el primer umbral T1 y el segundo umbral T2, y el plasma 30 se enciende en todo el volumen entre el primer conjunto de electrodos y la superficie de sustrato 51. Esta etapa se usa, por ejemplo, para depositar una capa de pasivación de silicio hidrogenado amorfo intrínseco (capa i) o para la eliminación de una capa de óxido nativa.

En la Figura 5B, el aparato generador de plasma opera en el primer régimen, colocándose el primer conjunto de electrodos 1 a una distancia D1 y/o ajustándose la presión P, de manera que el producto PxD1 es inferior al primer umbral T1 y el producto PxD2 está entre el primer umbral T1 y el segundo umbral T2. Por ejemplo, el primer conjunto de electrodos 1 se dibuja cerca de la superficie del sustrato 51, de manera que áreas de plasma localizadas 22 se encienden entre los rebajes 12 y la superficie 51 del sustrato 5, mientras que las protuberancias 11 impiden la ignición de plasma local entre las protuberancias 11 y la superficie 51 del sustrato 5. Esta segunda etapa puede usarse para depositar una capa con patrones dopada en n 32 usando la mezcla de gas de entrada apropiada, tal como una mezcla de H<sub>2</sub>, SiH<sub>4</sub>, y PH<sub>3</sub>.

En la Figura 5C, el primer conjunto de electrodos 1 gira y/o se traslada una distancia X1 con respecto a la superficie de muestra 51, para alinear los rebajes 12 entre la capa con patrones 32 depositada en la etapa anterior. El gas de entrada se cambia a fin de depositar otra capa con patrones, idealmente en este ejemplo una capa dopada en p, de una mezcla gaseosa compuesta por H<sub>2</sub>, SiH<sub>4</sub>, y B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>. Por ejemplo, el movimiento del primer conjunto de electrodos 1 es de aproximadamente 0,5-2 mm con precisión submilimétrica. El aparato generador de plasma funciona de nuevo en el primer régimen, estando el primer conjunto de electrodos 1 a una distancia y ajustándose la presión P, de manera que el producto PxD1 sea más bajo que el primer umbral T1 y el producto PxD2 esté entre el primer umbral T1 y el segundo umbral T2, de manera que las áreas de plasma localizadas 23 se enciendan entre los rebajes 12 y la superficie 51 del sustrato 5, mientras que las protuberancias 11 impiden la ignición local del plasma entre las protuberancias 11 y la superficie 51 del sustrato 5. Esta segunda etapa puede usarse para depositar una capa con patrones dopada en p 33. De forma equivalente, la rotación o la traslación puede implementarse mediante el segundo conjunto de electrodos o simplemente el sustrato, lo que sea más adecuado para la implementación práctica del movimiento relativo.

Las etapas ilustradas en las Figuras 5A-5C se pueden repetir con tantas partes móviles y etapas como se desee. El patrón de n capas y el patrón de p capas pueden ser idénticos o no. El flujo del proceso de la Figura 5 permite la deposición de la capa pasivante y de las capas con patrones con dos niveles diferentes de dopaje. Este proceso encuentra aplicación, por ejemplo, para la fabricación de celdas solares IBC, en un solo flujo de proceso, y en una única cámara de reactor, a expensas de un movimiento relativo entre el primer conjunto de electrodos 1 y la superficie de sustrato 51.

El primer conjunto de electrodos y las condiciones de procesamiento permiten la deposición de múltiples capas con patrones y/o sin patrón en etapas de proceso secuenciales.

La Figura 6 muestra una vista superior de un dispositivo con patrones ejemplar tal como se obtiene mediante un proceso y un aparato generador de plasma como se ha descrito anteriormente. El dispositivo con patrones comprende una capa i pasivante uniforme 30, una capa con patrones dopada en n 32 y una capa con patrones dopada en p 33. La capa de pasivación 30 cubre toda la superficie del sustrato 5.

La Figura 7A muestra otro dispositivo con patrones ejemplar obtenido mediante la aplicación de grabado de plasma resuelto espacialmente para formar las aberturas 320 en una capa dieléctrica 32 sobre la superficie 51 de una muestra 5. Esta estructura con patrones se puede realizar en dos etapas: etapa 1 - depósito uniforme de una capa dieléctrica, y etapa 2 - grabado de plasma resuelto espacialmente. Opcionalmente, estas dos etapas se realizan en un mismo flujo de proceso y/o en una cámara de reactor única.

La Figura 7B muestra el diseño de electrodo con alimentación ejemplar que comprende las protuberancias 310 requeridas para lograr el patrón (mostrado en la Figura 7A) de las aberturas 320 en la superficie 51 de una muestra 5. Esta estructura con patrones ilustrada en la Figura 7A se puede realizar en una sola etapa usando el diseño de electrodo representado en la Figura 7B.

La Figura 8 representa esquemáticamente una sección transversal de un aparato de procesamiento de plasma según una segunda realización de la invención. El primer conjunto de electrodos 1 comprende una pluralidad de protuberancias 11, y una pluralidad de cavidades 15, estando cada cavidad 15 conectada al volumen entre electrodos por un canal 16. Los salientes 11 se colocan a una distancia D1 para evitar la ignición local del plasma entre la superficie 51 del sustrato 5 y las protuberancias 11. Las cavidades están dimensionadas de manera que su volumen permita la ignición de las áreas de plasma locales 25 dentro de cada cavidad 15. El canal 16 generalmente tiene una dimensión lateral más pequeña que la cavidad 15. La longitud y el ancho del canal están dimensionados para permitir la difusión del plasma 25 entre la cavidad 15 y la superficie 51 de la muestra 5. Por lo tanto, esta segunda realización permite la deposición de la capa con patrones 35 que tiene aproximadamente las dimensiones transversales de los canales 16.

Por supuesto, la segunda realización también se puede usar para grabado local de plasma, por ejemplo, para producir aberturas en una capa dieléctrica.

Las cavidades 15 pueden tener una configuración unidimensional o bidimensional.

Por ejemplo, las cavidades 15 y los canales 16 tienen una geometría unidimensional que se extiende longitudinalmente a lo largo del eje Y, para generar patrones que se extienden longitudinalmente sobre la superficie de la muestra a lo largo del eje Y. En otro ejemplo, las cavidades 15 y los canales 16 tienen una geometría bidimensional y, por ejemplo, tienen un perfil similar al ilustrado en la Figura 8 a lo largo del eje Y, para generar patrones limitados en ambas direcciones X e Y en la superficie 51 de la muestra 5. Un primer conjunto de electrodos puede comprender una combinación de cavidades y canales unidimensionales y bidimensionales, dependiendo de la aplicación.

Las cavidades 15 y los canales 16 ilustrados en la Figura 8 tienen un perfil cuadrado o rectangular.

En comparación con la primera realización, la segunda realización permite la formación de patrones con un tamaño de rasgo más pequeño, por ejemplo, patrones que tienen dimensiones críticas inferiores al doble del ancho de la vaina del plasma.

La Figura 9 representa una sección transversal de diferentes cavidades 15 que tienen una forma esférica (geometría 2D) o cilíndrica (geometría 1D) y canales que tienen una forma cilíndrica (geometría 2D) o de rendija (geometría 1D).

Un primer conjunto de electrodos como se ilustra en la Figura 9 se usa para depositar una capa con patrones de Si:H, en una mezcla de hidrógeno y gas silano ( $H_2/SiH_4 = 100:2,5$ ), a una presión P de 1060 mTorr (141 Pa), con una potencia de 50 vatios. El ancho de las capas con patrones obtenidas es de aproximadamente 300 micrómetros.

Las cavidades 15 pueden conformarse adicionalmente para optimizar el perfil de la película depositada, o la uniformidad del flujo en el área que se está procesando.

La Figura 10 ilustra diferentes perfiles de cavidad considerados para controlar la forma de las dimensiones críticas o los bordes del patrón formado. La cavidad 151 tiene un perfil cuadrado o rectangular y está conectada por un canal 161 al volumen entre electrodos. La cavidad 152 tiene un perfil esférico o cilíndrico y está conectada por un canal 162. La cavidad 153 tiene un perfil cónico y está conectada por un canal 163. La cavidad cónica 153 puede tener un fondo plano, cóncavo o convexo para controlar las dimensiones críticas del patrón.

La Figura 11 representa una variante del primer diseño de electrodo en el que los huecos en el extremo de cada canal 12 están conectados de manera fluida a una cavidad común 19. La cavidad 19 está conectada de manera fluida a una entrada de gas 40 y a una o varias salidas de gas 43. Esta cavidad común 19 permite una mejor distribución del gas de entrada entre los canales 12. Esta configuración también permite conectar un canal de salida de gas secundario 43 para evitar la dispersión de características con patrones debido al arrastre de gas. Las dimensiones de la cavidad común 19 y los canales 12 se eligen de manera que el plasma 22 se encienda solo cerca o dentro de los canales 12. Opcionalmente, los canales 12 se pueden conformar para optimizar el perfil de las áreas con patrones procesadas 32 sobre la superficie 51 de la muestra.

Las Figuras 12 y 13 representan esquemáticamente variantes de la configuración de electrodos, en sección transversal.

5 En la Figura 12, el primer conjunto de electrodos comprende un primer subconjunto de cavidades 17 y un segundo subconjunto de cavidades 18. Cada cavidad 17, 18 está conectada de forma fluida por un canal 16 al volumen entre electrodos. Cada cavidad 17 del primer subconjunto comprende un primer subelectrodo 47. Respectivamente, cada cavidad 18 del segundo subconjunto de cavidades comprende un segundo subelectrodo 48. Por ejemplo, en un régimen operativo específico ilustrado en la Figura 11, los primeros subelectrodos 47 están conectados eléctricamente a una línea de tierra 61, mientras que los segundos subelectrodos 48 están conectados eléctricamente por una línea 62 al generador de RF 6. El generador de RF 6 también está conectado eléctricamente al segundo conjunto de electrodos 2. Los primeros subelectrodos 47 están aislados eléctricamente de los segundos subelectrodos 48. Los segundos subelectrodos 48 del primer conjunto de electrodos 1 tienen el mismo potencial eléctrico que el segundo conjunto de electrodos 2, no se produce plasma en el segundo subconjunto de cavidades 18. Por el contrario, debido a la diferencia de potencial eléctrico entre los primeros subelectrodos 47 del primer conjunto de electrodos 1 y el segundo conjunto de electrodos 2, el plasma se enciende en el primer subconjunto de cavidades 17. Por lo tanto, el generador de RF 6 activa selectivamente el primer subconjunto de cavidades 17 sin alimentar el segundo subconjunto de cavidades 18. Como ejemplo, esta configuración permite depositar capas con patrones 37 en la parte superior de una capa i 30, formándose las capas con patrones 37 selectivamente delante de los canales 16 conectados al primer subconjunto de cavidades 17. Esta configuración requiere que el sistema funcione en un régimen en el que los plasmas no se encienden dentro de las cavidades 18.

Las conexiones eléctricas se pueden modificar ventajosamente según las necesidades, de manera que el generador de RF 6 alimenta selectivamente el segundo subconjunto de cavidades 18 sin alimentar el primer subconjunto de cavidades 17. Como alternativa, el aparato generador de plasma de la Figura 12 puede configurarse de manera que el generador de RF 6 alimente simultáneamente el primer subconjunto de cavidades 17 y el segundo subconjunto de cavidades 18. Más generalmente, el aparato generador de plasma de la Figura 12 puede configurarse de manera que el generador de RF 6 aplique una primera diferencia de tensión a los primeros subelectrodos 47 y una segunda diferencia de tensión a los segundos subelectrodos 48, para controlar los patrones formados.

La configuración eléctrica del primer conjunto de electrodos como se ilustra en la Figura 12 se puede modificar en tiempo real durante un flujo de proceso.

La Figura 13 muestra otra configuración del primer conjunto de electrodos que comprende un primer subconjunto de cavidades 13 y un segundo subconjunto de cavidades 14. El conjunto de alimentación de gas comprende dos líneas de gas de entrada independientes. Una primera línea de entrada de gas 41 inyecta un primer gas de entrada en el primer subconjunto de cavidades 13. Respectivamente, una segunda línea de gas de entrada 42 inyecta un segundo gas de entrada en el segundo subconjunto de cavidades 14. El generador de RF 6 está conectado al primer conjunto de electrodos 1 y se alimenta simultáneamente alimentado por el primer y segundo subconjunto de cavidades 13, 14.

La configuración de la Figura 13 permite que el generador de RF 6 encienda ambas áreas de plasma 23 en base al primer gas de entrada en el primer subconjunto de cavidades 13, y simultáneamente las segundas áreas de plasma 24 basadas en el segundo gas de entrada en el segundo subconjunto de cavidades 14. Esta configuración permite la deposición simultánea de un primer patrón 33 frente al primer subconjunto de cavidades 13 y un segundo patrón 34 frente al segundo subconjunto de cavidades 14. Por ejemplo, se inyectan diferentes gases dopantes 41, 42 en zonas de plasma alternas 23, 24, lo que permite la deposición simultánea de capas con patrones dopadas en p 33 y dopadas en n 34. Ventajosamente, la inyección de gas se realiza a través del primer conjunto de electrodos y en los volúmenes donde se ha producido la ignición de plasma, y la salida de gas de cada subconjunto de cavidades se realiza a través de un orificio adicional en el borde del electrodo, minimizando el flujo de gas a través de los canales. Como alternativa, se puede inyectar un gas de enfriamiento en las cavidades 14 para evitar la ignición en estas cavidades 14, mientras se permite la ignición y la deposición en las demás cavidades 13.

Las variantes de la primera configuración de electrodos descrita en relación con las Figuras 12 y 13 permiten un flujo de proceso similar al descrito en relación con las Figuras 5A-5C, pero sin requerir ningún movimiento mecánico dentro de la cámara del reactor de plasma.

Los expertos en la técnica reconocerán que también se contemplan configuraciones que combinan control eléctrico selectivo e inyección selectiva de gas en/para subconjuntos de cavidades o rebajes sin apartarse del marco de la presente descripción.

Una variante adicional sobre el uso del aparato generador de plasma implica la selección de la forma de onda de diferencia de tensión a aplicar. Se puede usar una tensión variable sinusoidal compuesta por una sola frecuencia entre 500 kHz y 100 MHz. Como alternativa, se considera el uso simultáneo de frecuencias múltiples. En una variante particularmente ventajosa, se considera la aplicación de armónicos múltiples de una frecuencia base (en el intervalo de 500 kHz a 100 MHz). Dependiendo de la fase respectiva entre los armónicos y su respectiva amplitud,

dichas formas de onda pueden aparecer como una serie de picos, valles o como formas de onda en diente de sierra. Por ejemplo, la Figura 14 muestra un primer conjunto de electrodos 1 que comprende una pluralidad de rebajes 12. Los rebajes 12 tienen la misma forma, dimensiones y están colocados a la misma distancia de la superficie 51 del sustrato 5. La Figura 14 representa esquemáticamente la posición de las áreas de plasma 220, 221, 222 correspondientes a diferentes formas de onda de tensión, siendo idénticos los demás parámetros del plasma (gas de entrada, presión). El uso de formas de onda en diente de sierra es de considerable interés para los diseños de electrodos descritos en la presente descripción, ya que tales formas de onda permiten controlar la distribución espacial de la región más intensa del plasma, como se muestra en la Figura 14. Más precisamente, se observa que la primera área de plasma 220 generada usando una primera tensión de forma de onda en diente de sierra está situada en el fondo del rebaje 12 lejos de la superficie de muestra, mientras que el área de plasma 221 generada usando una segunda tensión de forma de onda en diente de sierra se centra dentro del rebaje 12, y la tercera área de plasma 222 generada usando una tercera tensión de forma de onda en diente de sierra está situada en la abertura del rebaje 12 cerca de la superficie de muestra. A medida que los precursores abandonan el plasma, el efecto de sombreado de las paredes del canal tiene un impacto variable sobre la extensión de las áreas procesadas dependiendo de la proximidad de la zona de plasma 220, respectivamente 221, 222 con respecto a la superficie de sustrato. El uso de tales formas de onda en diente de sierra combinadas con todas las variantes de las geometrías de los electrodos, por lo tanto, se puede utilizar para controlar adicionalmente el perfil de la deposición/grabado en la superficie.

La principal aplicación del aparato y proceso generador de plasma descrito en el presente documento es la formación de contactos posteriores interdigitados o aberturas dieléctricas para la fabricación de celdas solares de silicio cristalino de alta eficiencia.

La invención permite la implementación de elementos de alto rendimiento, ya utilizados en la industria, con un proceso mucho más sencillo y económico. No debe esperarse ninguna pérdida de rendimiento con el proceso y el aparato de litografía con plasma. La invención puede implementarse fácilmente en herramientas existentes solo a expensas de cambiar uno de los electrodos de un aparato de procesamiento de plasma.

La presente descripción permite la formación de los contactos IBC en una sola etapa de proceso, a baja temperatura, y con la posibilidad de usar una capa de pasivación de a-Si:H delgada intrínseca en la misma cámara de reacción de plasma. El procedimiento y el aparato permiten el uso de la configuración IBC combinada con una etapa de pasivación HIT, sin añadir ninguna etapa procesamiento adicional en el flujo de proceso de fabricación de la celda. El procedimiento ofrece la ventaja de ser sin contacto, lo que resuelve un problema importante, ya que la superficie de la oblea limpia (con óxido eliminado) es muy sensible al daño y la contaminación.

Se puede utilizar con este procedimiento cualquier etapa de procesamiento de plasma que requiera la activación de especies por plasma. Por lo tanto, la técnica es igualmente útil para procesos tales como, pero sin limitación, deposición, grabado, limpieza, densificación y funcionalización.

La invención encuentra una aplicación más adecuada en la deposición de contactos interdigitados en contacto posterior interdigitado (IBC) y para aberturas dieléctricas en celdas solares para contactos puntuales.

La litografía con plasma como se describe en el presente documento también se aplica a la fabricación de otros dispositivos fotovoltaicos, fotodetectores y sensores. La invención se define por las reivindicaciones.

**REIVINDICACIONES**

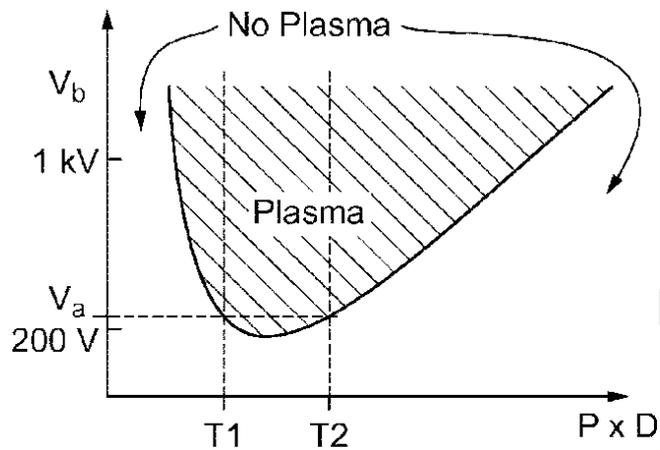
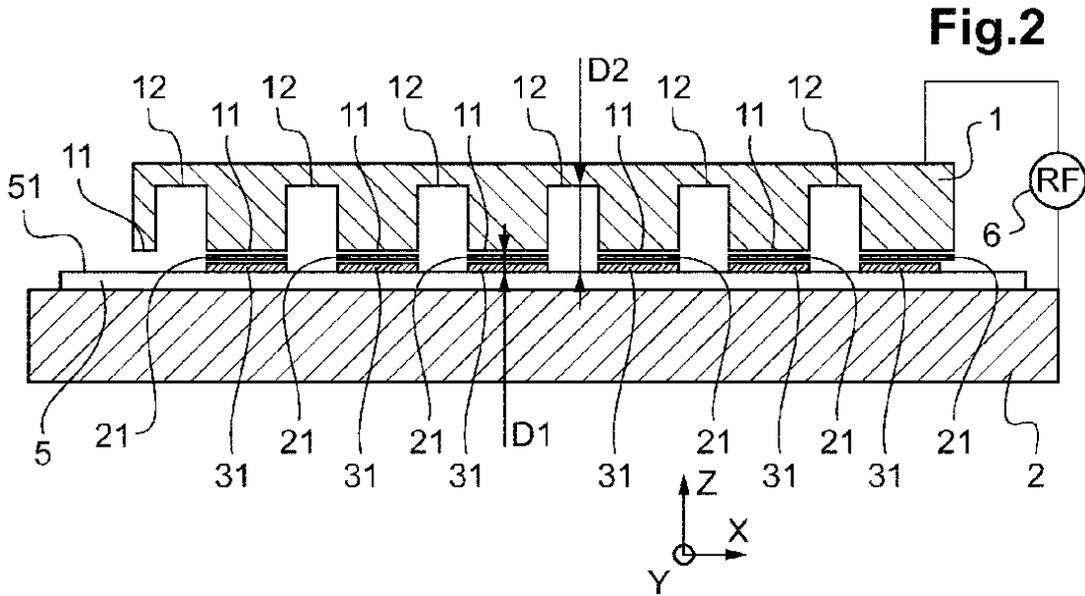
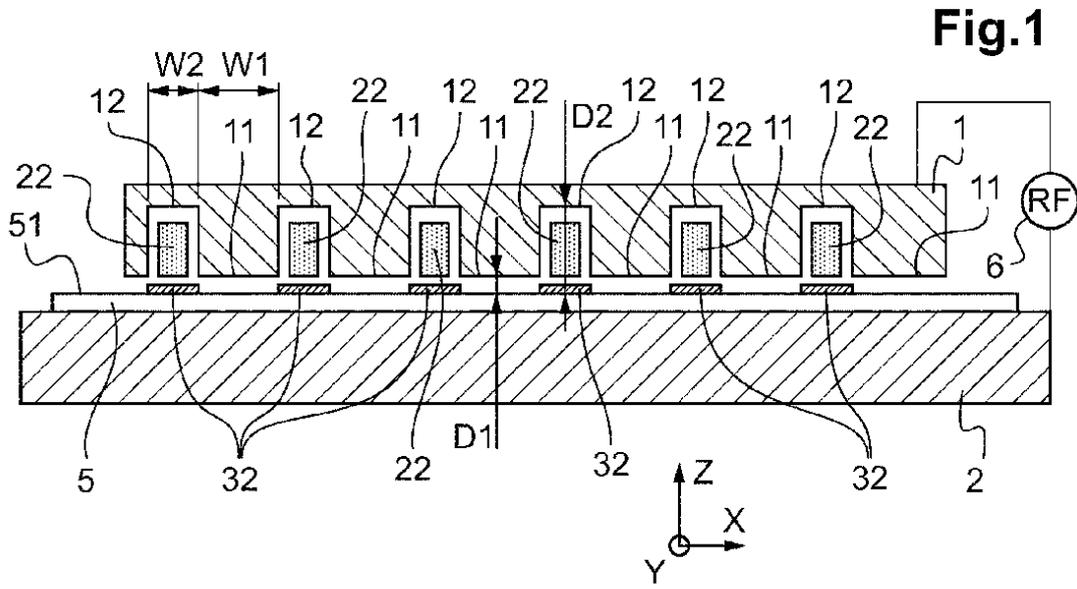
1. Aparato generador de plasma para fabricar dispositivos con patrones que comprende:
- 5 - una cámara de reactor de plasma;
- un conjunto de alimentación de gas para introducir un gas de entrada en la cámara del reactor de plasma a una presión elegida (P);
- 10 - un primer conjunto de electrodos (1) y un segundo conjunto de electrodos (2) colocados en la cámara de reactor de plasma, estando el primer conjunto de electrodos (1) dispuesto para separarse del segundo conjunto de electrodos (2) por un volumen entre electrodos, y
- 15 - una fuente de alimentación eléctrica (6) para generar una diferencia de tensión entre el primer conjunto de electrodos (1) y el segundo conjunto de electrodos (2);
- en el que
- 20 - el primer conjunto de electrodos (1) comprende una pluralidad de protuberancias (11) y una pluralidad de rebajes (12, 13, 14, 15, 16, 17,18),
- el segundo conjunto de electrodos (2) está configurado para recibir un sustrato (5) que tiene una superficie (51) enfrentada a la pluralidad de protuberancias (11) y la pluralidad de rebajes (12, 13, 14, 15, 16, 17, 18);
- 25 **caracterizado por que:**
- las protuberancias (11) y los rebajes (12, 13, 14, 15, 16, 17, 18) están dimensionados y dispuestos para establecerse a distancias respectivas (D1, D2) desde la superficie (51) del sustrato (5) a fin de generar una pluralidad de zonas de plasma aisladas espacialmente (21, 22) situadas selectivamente entre dicha superficie del sustrato (5) y dicha pluralidad de rebajes (12, 13, 14, 15, 16, 17, 18) o entre dicha superficie del sustrato (5) y dicha pluralidad de protuberancias (11) a la presión elegida (P) del gas de entrada.
- 30
2. Aparato generador de plasma según la reivindicación 1, en el que los rebajes (12) están dimensionados y colocados a una segunda distancia (D2) de la superficie (51) del sustrato (5) de tal forma que para la diferencia de tensión aplicada V(t), un producto de la presión elegida y la segunda distancia está comprendida entre un primer umbral de ignición de plasma (T1) y un segundo umbral de extinción de plasma (T2), y en el que las protuberancias (11) están dimensionadas y colocadas a una primera distancia (D1) de la superficie (51) del sustrato (5) de tal forma que para la diferencia de tensión aplicada V(t), otro producto de la presión elegida (P) y la primera distancia (D1) es menor que el primer umbral de ignición de plasma (T1), de manera que el aparato generador de plasma genera zonas de plasma espacialmente aisladas (22) entre la superficie del sustrato (5) y los rebajes (12) sin generar plasma localmente entre la superficie del sustrato (5) y las protuberancias (11).
- 35
3. Aparato generador de plasma según la reivindicación 1, en el que las protuberancias (11) están dimensionadas y colocadas a una primera distancia (D1) de la superficie (51) del sustrato (5) de tal forma que para la diferencia de tensión aplicada V(t), un producto de la presión (P) y la primera distancia (D1), está comprendida entre un primer umbral de ignición de plasma (T1) y un segundo umbral de extinción de plasma (T2) y en el que los rebajes (12) están dimensionados y colocados a una segunda distancia (D2) desde la superficie (51) del sustrato (5) de tal forma que para la diferencia de tensión aplicada V(t), un producto de la presión elegida (P) y la segunda distancia (D2) es mayor que el segundo umbral de extinción del plasma (T2), de manera que el aparato generador de plasma genera zonas de plasma espacialmente aisladas (21) entre la superficie del sustrato (5) y las protuberancias (11) sin generar plasma localmente entre la superficie del sustrato (5) y los rebajes (12).
- 40
- 45
4. Aparato generador de plasma según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que el primer conjunto de electrodos (1) comprende al menos una primera y una segunda parte (111, 121), siendo la primera parte (111) móvil con respecto a la segunda parte (121) entre una primera posición y una segunda posición, de manera que, en la primera posición, dicho primer conjunto de electrodos (1) forma una pluralidad de protuberancias (11) y una pluralidad de rebajes (12), y, en la segunda posición, el primer conjunto de electrodos (1) forma una superficie plana que se orienta hacia la superficie del sustrato (5).
- 50
- 55
5. Aparato generador de plasma según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que la pluralidad de rebajes (12, 13, 14, 15, 16, 17, 18) comprende una pluralidad de cavidades (15, 151, 152, 153) estando cada cavidad (15, 151, 152, 153) conectada al volumen entre electrodos por un canal (16, 161, 162, 163), estando las cavidades (15, 151, 152, 153) dimensionadas de manera que el aparato genere plasma (25) dentro de dichas cavidades (15, 151, 152, 153) a la presión elegida (P), y estando los canales (16, 161,
- 60
- 65

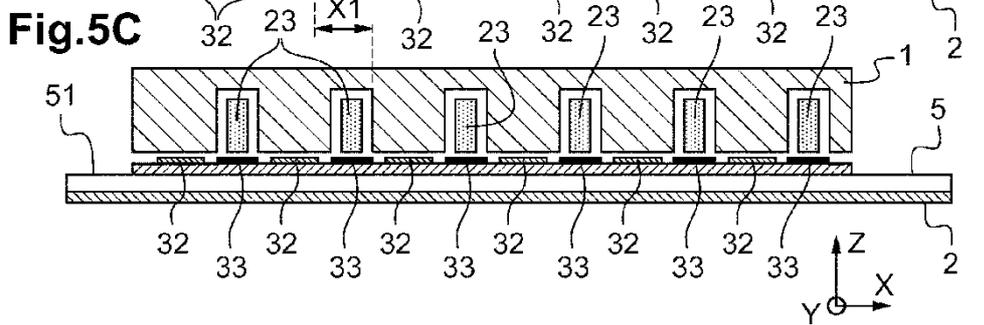
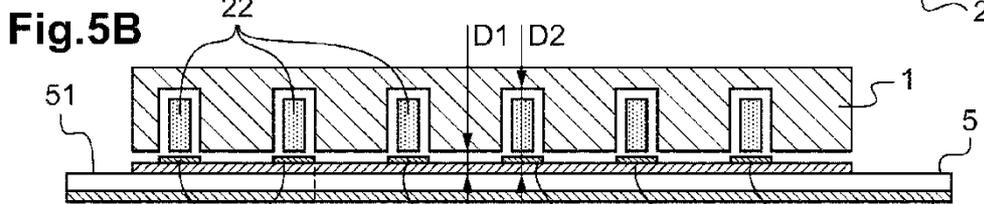
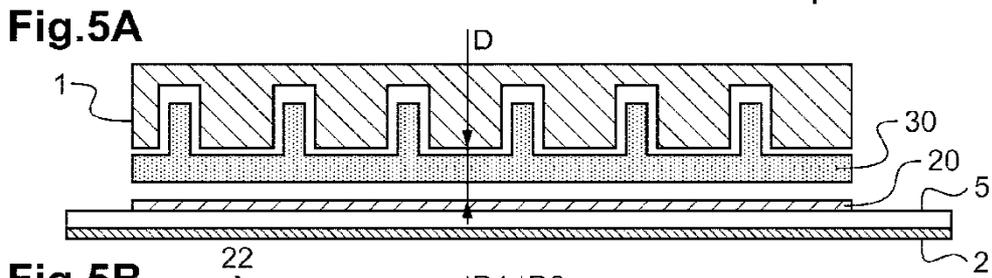
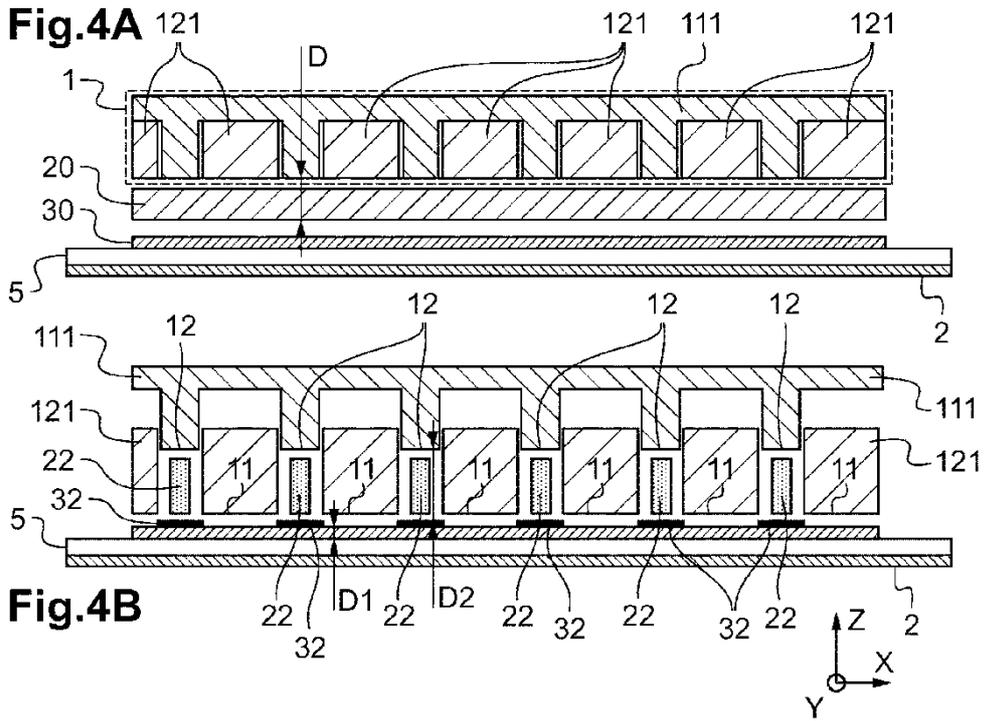
162, 163) dimensionados de manera que el plasma (25) generado en las cavidades (15, 151, 152, 153) se difunda hacia el volumen entre electrodos.

- 5 **6.** Aparato generador de plasma según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que la pluralidad de rebajes (12, 13, 14, 15, 16, 17, 18) comprende una pluralidad de canales (12) conectados a una cavidad común (19), estando la cavidad común (19) conectada al menos a una entrada de gas (40) y al menos a una salida de gas (43).
- 10 **7.** Aparato generador de plasma según la reivindicación 5 o 6, en el que dicha cavidad (15, 19, 151, 152, 153) tiene un perfil cuadrado, rectangular, esférico o cónico y/o en el que los canales (12, 16) tienen una forma de sección transversal elegido entre una forma rectangular, trapezoidal, cónica o cilíndrica, o una forma elegida para generar un patrón con perfil espacial determinado en la superficie (51) del sustrato (5).
- 15 **8.** Aparato generador de plasma según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en el que el primer conjunto de electrodos (1) comprende al menos un primer y un segundo subconjunto de rebajes (17, 18), estando el primer subconjunto de rebajes (17) aislado eléctricamente del segundo subconjunto de rebajes (18), y comprendiendo el primer conjunto de electrodos (1) un primer y un segundo subelectrodos (47, 48), conectando el primer, respectivamente el segundo, subelectrodo (47, 48) eléctricamente el primer, respectivamente el segundo, subconjunto de rebajes (17, 18), y en el que el suministro de alimentación eléctrica (6) está configurado para generar una primera, respectivamente una segunda, diferencia de tensión entre el primer, respectivamente el segundo, subelectrodos (47, 78) y el segundo conjunto de electrodos (2).
- 20 **9.** Aparato generador de plasma según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en el que el primer conjunto de electrodos (1) comprende al menos un primer y un segundo subconjuntos de rebajes (13, 14), y en el que el conjunto de alimentación de gas comprende una primera y una segunda línea de gas de entrada (41, 42), estando la primera, respectivamente la segunda, línea de gas (41, 42) en comunicación de fluido con el primer, respectivamente el segundo, subconjunto de rebajes (13, 14), para inyectar un primer, respectivamente un segundo, gas de entrada en el primer, respectivamente el segundo, subconjunto de rebajes (13, 14).
- 25 **10.** Aparato generador de plasma según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, en el que dicha pluralidad de protuberancias (11) y dicha pluralidad de rebajes (12, 13, 14, 15, 16, 17, 18) se disponen en una matriz periódica unidimensional o bidimensional.
- 30 **11.** Aparato generador de plasma según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, en el que dicho primer conjunto de electrodos (1) y/o dicho segundo conjunto de electrodos (2) están montados en una fase de traslación o rotación.
- 35 **12.** Aparato generador de plasma según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11, en el que el suministro de alimentación eléctrica (6) está configurado para generar una diferencia de tensión a aplicar entre el primer y segundo electrodos, en el que la diferencia de tensión es constante en el tiempo, o en el que la diferencia de tensión es variable en el tiempo y comprende una única frecuencia base en el intervalo entre 500 kHz y 100 MHz o comprende una pluralidad de armónicos de una frecuencia base en el intervalo entre 40 500 kHz y 100 MHz, y en el que las respectivas amplitudes y fases de la pluralidad de armónicos se seleccionan para generar una diferencia de tensión que tiene una forma de onda con una asimetría de amplitud y/o con una asimetría de pendiente.
- 45 **13.** Procedimiento de fabricación de dispositivos con patrones que utiliza procesamiento de plasma resuelto espacialmente que comprende las etapas de:
- 50
- Colocar un sustrato (5) en una cámara de reactor de plasma de un aparato generador de plasma, estando el sustrato (5) en contacto con un segundo conjunto de electrodos (2) y que tiene una superficie (51) orientada hacia un primer conjunto de electrodos (1) que comprende pluralidad de protuberancias (11) y una pluralidad de rebajes (12, 13, 14, 15, 16, 17, 18);
  - Inyectar un gas de entrada o mezcla de gas en la cámara de reactor de plasma a una presión elegida (P);
  - configurar el primer conjunto de electrodos (1) de modo que las protuberancias (11) estén a una primera distancia (D1) y los rebajes (12) estén a una segunda distancia (D2) de la superficie (51) del sustrato (5),
  - aplicar una diferencia de tensión entre el primer conjunto de electrodos (1) y el segundo conjunto de electrodos (2), estando las protuberancias (11) y los rebajes (12, 13, 14, 15, 16, 17, 18) dimensionados y configurados a distancias respectivas (D1, D2) de la superficie (51) del sustrato (5) para generar una pluralidad de zonas de plasma aisladas espacialmente (21, 22) localizadas selectivamente entre la
- 55
- 60
- 65

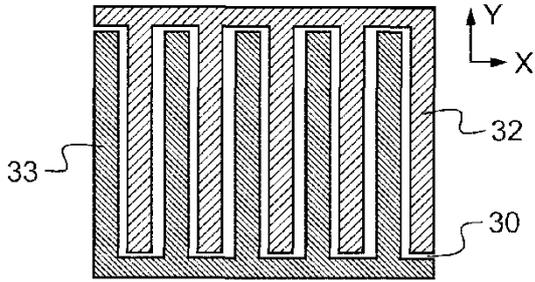
superficie (51) del sustrato (5) y la pluralidad de rebajes (12) o entre la superficie (51) del sustrato (5) y la pluralidad de protuberancias (11), para formar un patrón sobre la superficie del sustrato (5).

- 5      **14.** Procedimiento de fabricación de dispositivos con patrones según la reivindicación 13 que comprende además una etapa de:
- aislar eléctricamente un primer subconjunto de rebajes (17) de un segundo subconjunto de rebajes (18) del primer conjunto de electrodos (1); y
- 10      - aplicar una primera, respectivamente una segunda, diferencia de tensión entre el segundo conjunto de electrodos (2) y el primer, respectivamente el segundo, subconjunto de rebajes (17, 18).
- 15      **15.** Procedimiento de fabricación de dispositivos con patrones según la reivindicación 13 o 14, que comprende además las etapas de:
- Conectar de forma fluida una primera, respectivamente una segunda, línea de gas (41, 42) a un primer, respectivamente un segundo, subconjunto de rebajes (13, 14) del primer conjunto de electrodos (1); y
- 20      - inyectar un primer, respectivamente un segundo, gas de entrada en el primer, respectivamente, el segundo, subconjunto de rebajes (13, 14).

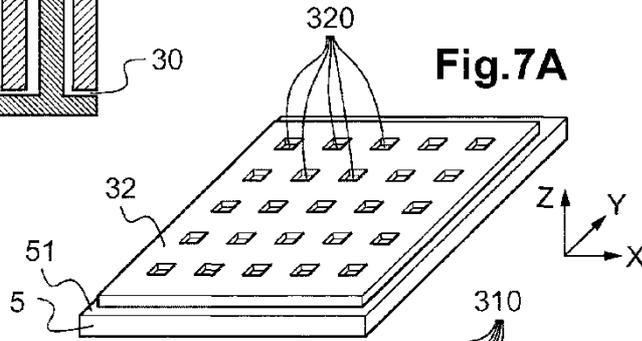




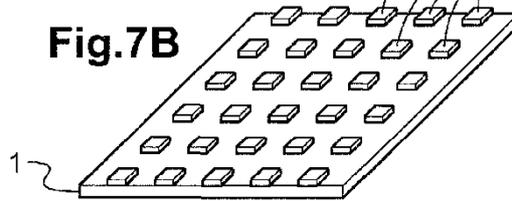
**Fig.6**



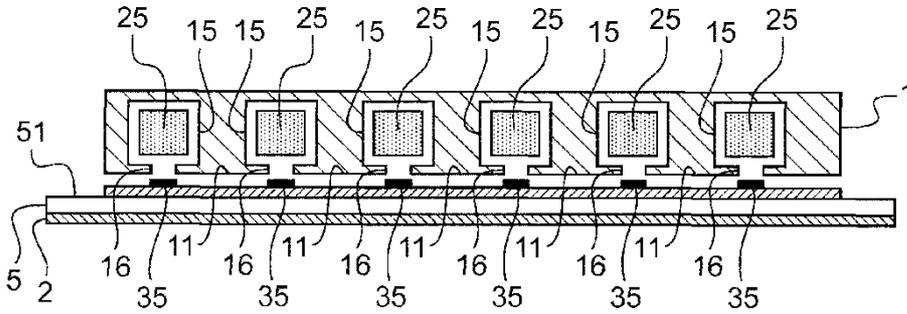
**Fig.7A**



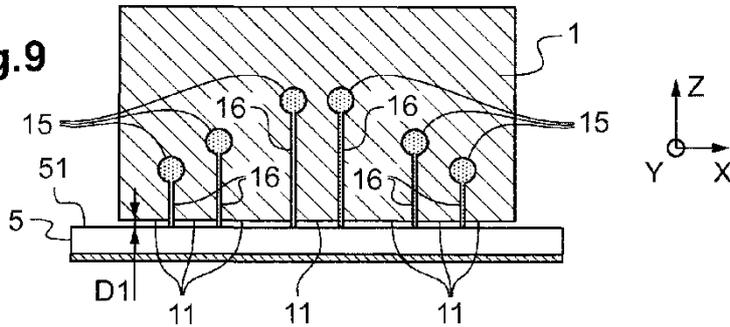
**Fig.7B**



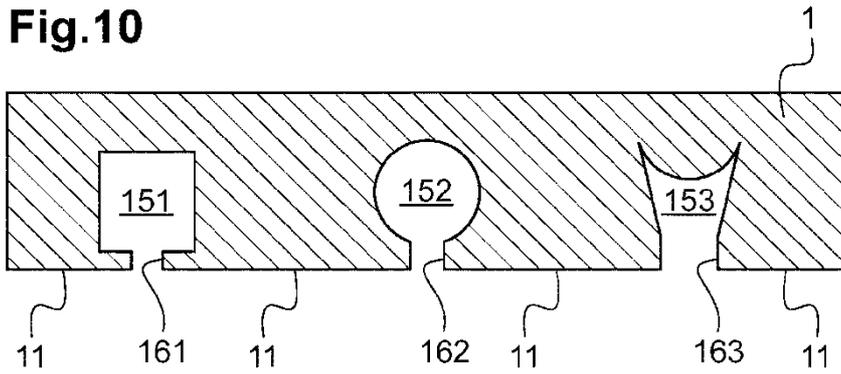
**Fig.8**



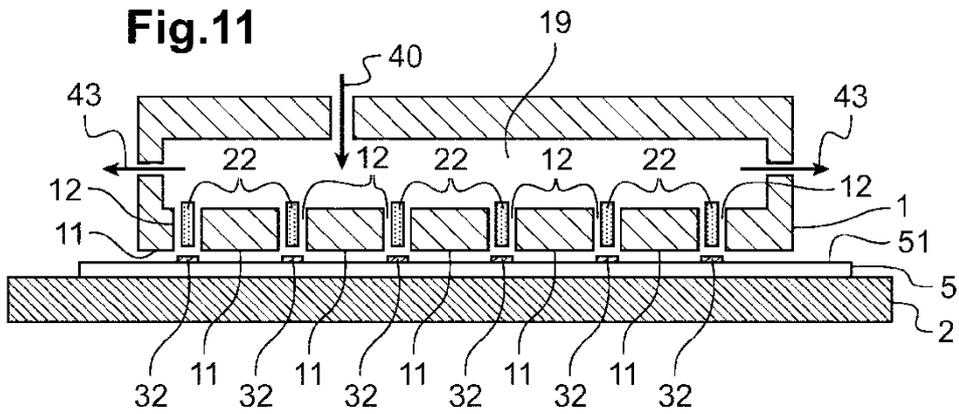
**Fig.9**



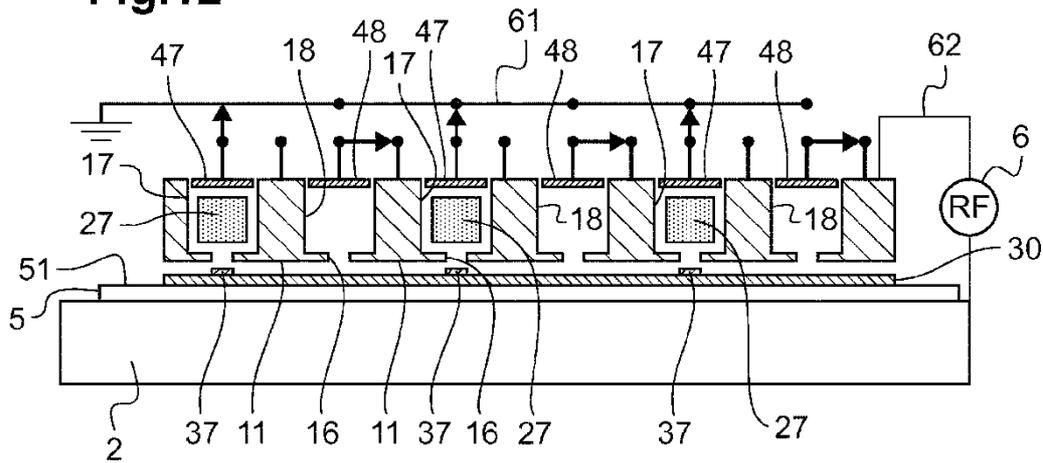
**Fig.10**



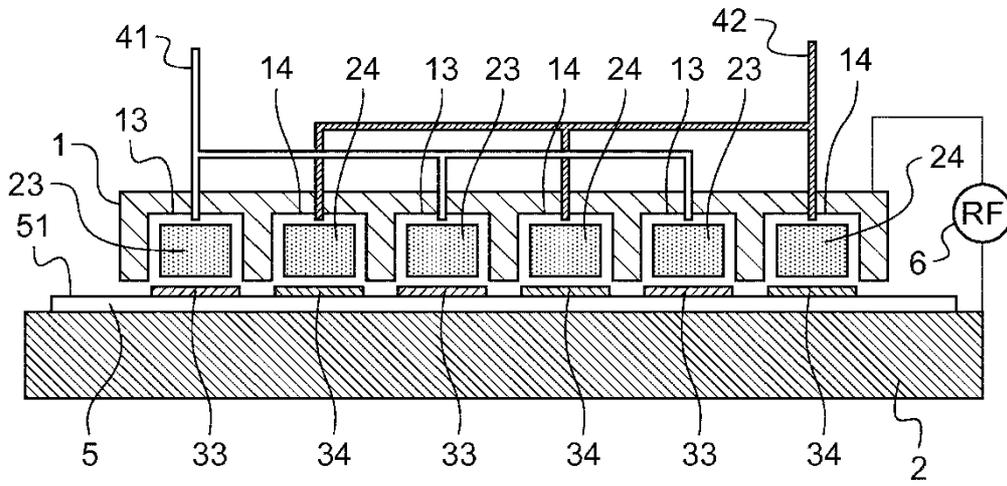
**Fig.11**



**Fig.12**



**Fig.13**



**Fig.14**

