

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 804 175**

51 Int. Cl.:

B01D 67/00 (2006.01)

B82Y 30/00 (2011.01)

C25F 7/00 (2006.01)

B01D 71/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **24.02.2016 PCT/IB2016/051017**

87 Fecha y número de publicación internacional: **01.09.2016 WO16135656**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **24.02.2016 E 16754845 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.04.2020 EP 3261753**

54 Título: **Localizar fabricación de nanoporo sobre una membrana por iluminación láser durante descomposición controlada**

30 Prioridad:

24.02.2015 US 201562120054 P

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

04.02.2021

73 Titular/es:

**THE UNIVERSITY OF OTTAWA (100.0%)
3042-800 King Edward
Ottawa, Ontario K1N 6N5, CA**

72 Inventor/es:

**BUSTAMANTE, JOSE;
BRIGGS, KYLE y
TABARD-COSSA, VINCENT**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 804 175 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

Localizar fabricación de nanoporo sobre una membrana por iluminación láser durante descomposición controlada

Campo

La presente descripción está relacionada con la fabricación de un nanoporo sobre una membrana.

5 **Antecedentes**

Una técnica de nanofabricación puede incluir una descomposición controlada (CBD, del inglés *controlled breakdown*) de una membrana delgada de estado sólido para formar nanoporos en la membrana a nanoescala. La técnica emplea un campo eléctrico alto (p. ej., ~ 1 V/nm) que se aplica a través de la membrana, mientras se sumerge en una solución de electrolito. La presencia de una corriente de tunelización a través de la membrana inducida por el campo eléctrico alto lleva a la formación de defectos localmente conductivos en puntos calientes sobre la membrana, y provoca una descomposición cuando existe un camino conectado de tales defectos a través de la membrana. El subproducto de la reacción de descomposición es retirado fácilmente por el fluido, y la formación de un nanoporo individual es indicada por un aumento repentino en el nivel de corriente medido a través de la membrana, o la aparición de una corriente iónica a bajos valores de intensidad de campo eléctrico (p. ej., $\sim 0,01$ V/nm, en los que el resto de la membrana es aislante).

Usando la técnica basada en CBD, se pueden hacer nanoporos de tan solo 1 nm de diámetro, y se pueden agrandar aún más usando campos eléctricos moderados con precisión subnanómetro. El campo se puede aplicar continuamente o pulsado entre valores alto y bajo durante la fabricación. Detalles adicionales en relación con la técnica CBD también se pueden encontrar en el documento de Kwok, H.; Briggs, K.; y Tabard-Cossa, V.; "Nanopore Fabrication by Controlled Dielectric Breakdown" - PLoS ONE 9(3): e92880 (2014) y en la solicitud de patente de EE. UU. n.º 14/399.071 titulada "Fabrication of Nanopores using High Electric Fields" que se incorpora en su totalidad en esta memoria por referencia. Detalles en relación con agrandar los nanoporos se pueden encontrar en el documento de Beamish, E.; Kwok, H.; Tabard-Cossa, V.; y Godin, M.; "Precise control of the size and noise of solid-state nanopores using high electric fields" - Nanotechnology 23, 405301, 7 páginas (2012), y en la solicitud de patente de EE. UU. 14/399.091 titulada "Method for controlling the size of solid-state nanopores" que se incorpora en la presente memoria por referencia.

El proceso de fabricación usando la técnica CBD puede ser estocástico, tanto desde el punto de vista del tiempo de descomposición como de la ubicación del nanoporo sobre la membrana. Por ejemplo, únicamente se forma un nanoporo siempre que el campo eléctrico termine suficientemente rápido tras la fabricación de poro y la ubicación del nanoporo sobre la membrana puede ser aleatoria. Para algunas aplicaciones, tales como las que implican nanoelectrodos que miden corriente de tunelado transversal, pueden ser importantes nanoestructuras sobre la superficie de membrana que controlan la captura y/o el paso de biomoléculas, o para experimentos que implican detección óptica, localización precisa del nanoporo. Así, la técnica CBD puede ser difícil de implementar.

El documento WO 2013/167955 A1 describe un método para fabricar un nanoporo en una membrana. El método incluye: aplicar un potencial eléctrico a través de la membrana, donde el valor del potencial eléctrico se selecciona para inducir un campo eléctrico que provoca una fuga de corriente a través de la membrana; monitorizar flujo de corriente a través de la membrana mientras se está aplicando el potencial eléctrico; detectar un aumento brusco en la fuga de corriente a través de la membrana; y retirar el potencial eléctrico a través de la membrana en respuesta a detectar el aumento brusco en la fuga de corriente.

El documento WO 2014/153047 A1 atañe a control optoelectrónico de nanoporos de estado sólido y aplicaciones del mismo. Se describen métodos para controlar la velocidad de translocación de biopolímeros a través de nanoporos de estado sólido y métodos para desbloquear poros taponados al iluminar nanoporos.

Esta sección proporciona información de antecedentes relacionada con la presente descripción que no es necesariamente la técnica anterior.

45 **Compendio**

La presente invención permite un método para fabricar un nanoporo en una membrana como se presenta en la reivindicación 1 y un aparato para llevar a cabo el método de la reivindicación 1 presentado en la reivindicación 13. En las reivindicaciones dependientes se presentan realizaciones beneficiosas. Esta sección proporciona un compendio general de la descripción, y no es una descripción profunda de su alcance completo o todos sus rasgos. En un ejemplo, un método puede incluir: controlar una rigidez dieléctrica de la membrana en una ubicación particular sobre la membrana mientras se aplica uno de un potencial eléctrico o una corriente eléctrica a la membrana; monitorizar una propiedad eléctrica a través de la membrana mientras uno del potencial eléctrico o la corriente eléctrica está siendo aplicado a través de la membrana; detectar un cambio brusco en la propiedad eléctrica a través de la membrana mientras uno del potencial eléctrico o la corriente eléctrica está siendo aplicado a través de la membrana; y retirar el potencial eléctrico o la corriente eléctrica de la membrana en respuesta a detectar el cambio brusco en la propiedad eléctrica.

En un ejemplo, controlar la rigidez dieléctrica de la membrana puede comprender además dirigir un haz láser sobre la ubicación particular sobre la membrana.

En otro ejemplo, el método puede incluir además retirar el haz láser de la ubicación particular sobre la membrana en respuesta a detectar el cambio brusco en la propiedad eléctrica a través de la membrana.

- 5 En incluso otro ejemplo, el uno del potencial eléctrico o la corriente eléctrica se puede aplicar después de que el haz láser es dirigido sobre la ubicación particular sobre la membrana.

En un ejemplo, el haz láser puede ser dirigido sobre la ubicación particular sobre la membrana después de aplicar el uno del potencial eléctrico o la corriente eléctrica.

- 10 En otro ejemplo, el método puede incluir además dirigir el haz láser sobre una segunda ubicación sobre la membrana, formando de ese modo un segundo nanoporo sobre la membrana, donde la segunda ubicación difiere de la ubicación particular.

En incluso otro ejemplo, con un potencial eléctrico aplicado a la membrana, la propiedad eléctrica que es monitorizada puede ser una fuga de corriente, y la detección del cambio brusco en la propiedad eléctrica puede incluir además detectar un aumento brusco en la fuga de corriente a través de la membrana.

- 15 En un ejemplo, para detectar el aumento brusco en la fuga de corriente, el método puede incluir además determinar una tasa de cambio de la fuga de corriente y comparar la tasa de cambio con un umbral. El potencial eléctrico puede ser retirado cuando la tasa de cambio de la fuga de corriente es mayor que el umbral, deteniendo de ese modo la fabricación de un nanoporo.

- 20 En otro ejemplo, para detectar el aumento brusco en la fuga de corriente, el método puede incluir además comparar un valor de la fuga de corriente con un umbral. El potencial eléctrico puede ser retirado cuando el valor de la fuga de corriente es mayor que el umbral, deteniendo de ese modo la fabricación de un nanoporo.

En incluso otro ejemplo, con una corriente eléctrica aplicada a la membrana, la propiedad eléctrica que es monitorizada puede ser una tensión a través de la membrana, y la detección del cambio brusco en la propiedad eléctrica puede incluir además detectar una disminución brusca en la tensión a través de la membrana.

- 25 En un ejemplo, el método puede incluir además: disponer la membrana entre dos depósitos rellenos con un fluido que contiene iones, de manera que la membrana separa los dos depósitos e impide que el fluido pase entre los dos depósitos; colocar un electrodo en cada uno de los dos depósitos; y generar el uno del potencial eléctrico o la corriente eléctrica usando los electrodos.

- 30 En otro ejemplo, el método puede incluir además: disponer la membrana entre dos depósitos rellenos con un fluido que contiene iones, de manera que la membrana separa los dos depósitos e impide que el fluido pase entre los dos depósitos; colocar un electrodo en contacto directo con la membrana; y el uno del potencial eléctrico o la corriente eléctrica usando los electrodos.

- 35 En un aspecto de la presente descripción, la presente descripción se dirige generalmente a un método para fabricar un nanoporo en una ubicación particular en una membrana, donde el método incluye: dirigir un haz láser desde una fuente de luz sobre una superficie de la membrana en la ubicación particular sobre la membrana, donde la membrana comprende al menos un material dieléctrico; aplicar uno de un potencial eléctrico o una corriente eléctrica a la membrana; medir una propiedad eléctrica a través de la membrana mientras el uno del potencial eléctrico o la corriente eléctrica está siendo aplicado a la membrana y el haz láser está siendo dirigido en la ubicación particular, donde la propiedad eléctrica incluye al menos una de tensión o fuga de corriente; comparar el valor de la propiedad eléctrica medida con un umbral; y retirar el uno del potencial eléctrico o la corriente eléctrica a la membrana y retirar el haz láser desde la ubicación particular sobre la membrana en respuesta al valor de la propiedad eléctrica medida que supera el umbral.

En un aspecto de la presente descripción, el método puede incluir además seleccionar una longitud de onda para el haz láser sobre la base de la composición de material de la membrana.

- 45 En un aspecto de la presente descripción, la propiedad eléctrica puede incluir la fuga de corriente a través de la membrana cuando se aplica un potencial eléctrico a la membrana, y comparar el valor de la propiedad eléctrica medida puede comprender además determinar una tasa de cambio de la fuga de corriente y comparar la tasa de cambio, como el valor, al umbral. El potencial eléctrico y el haz láser pueden ser retirados cuando la tasa de cambio de la fuga de corriente es mayor que el umbral, deteniendo de ese modo la fabricación de un nanoporo.

- 50 En otro aspecto de la presente descripción, la propiedad eléctrica puede incluir la fuga de corriente a través de la membrana cuando se aplica un potencial eléctrico a la membrana, y el potencial eléctrico y el haz láser pueden ser retirados cuando el valor de la fuga de corriente es mayor que el umbral, deteniendo de ese modo la fabricación del nanoporo.

En incluso otro aspecto de la presente descripción, la propiedad eléctrica puede incluir la tensión a través de la membrana cuando se aplica una corriente eléctrica a la membrana, y la corriente eléctrica y el haz láser se retiran cuando el valor de la tensión es menor que el umbral, deteniendo de ese modo la fabricación del nanoporo.

5 En un aspecto de la presente descripción, para formar una pluralidad de los nanoporos en ubicaciones predeterminadas sobre la membrana, en cada una de la ubicaciones predeterminadas, el haz láser puede ser dirigido sobre la superficie de la membrana en la ubicación predeterminada sobre la membrana, el uno del potencial eléctrico o la corriente eléctrica se puede aplicar a la membrana, la propiedad eléctrica a través de la membrana puede ser medida mientras el uno del potencial eléctrico o la corriente eléctrica está siendo aplicado a la membrana y el haz láser está siendo dirigido en la ubicación predeterminada, la propiedad eléctrica medida puede ser comparada con el
10 umbral, y el uno del potencial eléctrico o la corriente eléctrica y el haz láser puede ser retirado en respuesta a que el valor de la propiedad eléctrica medida supera el umbral.

En otro aspecto de la presente descripción, para dirigir el haz láser, el método puede incluir además controlar una alineación posicional entre la membrana y el haz láser al controlar una dirección óptica del haz láser, y activar la fuente de luz para emitir el haz láser hacia la superficie de la membrana en la ubicación particular sobre la membrana.

15 En incluso otro aspecto de la presente descripción, para dirigir el haz láser, el método puede incluir además controlar una alineación posicional entre la membrana y el haz láser al ajustar una posición de la membrana con respecto a la fuente de luz, y activar la fuente de luz para emitir el haz láser hacia la superficie de la membrana en la ubicación particular sobre la membrana.

20 En un aspecto de la presente descripción, la presente descripción se dirige generalmente hacia un aparato para fabricar un nanoporo en una membrana que comprende al menos un material dieléctrico. El aparato incluye un dispositivo fluídico, un dispositivo óptico, un sensor y un controlador. El dispositivo fluídico incluye dos depósitos, al menos dos electrodos, y un soporte. Los depósitos contienen fluido que contiene iones, y la membrana separa los dos depósitos e impide que el fluido pase entre los dos depósitos. Los electrodos se conectan eléctricamente a una fuente de alimentación y pueden funcionar para aplicar uno de un potencial eléctrico o una corriente eléctrica a la membrana.
25 El soporte se configura para sostener la membrana que está sumergida en el fluido desde los dos depósitos e incluye una ventana que proporciona acceso óptico a la membrana.

El dispositivo óptico puede funcionar para emitir un haz láser enfocado que pasa a través de la ventana del soporte y es dirigido hacia una ubicación particular sobre la membrana. El haz láser enfocado ilumina la ubicación particular de la membrana conforme el uno del potencial eléctrico o la corriente eléctrica está siendo aplicado a la membrana por
30 los electrodos.

El sensor se acopla eléctricamente a uno de los electrodos y puede funcionar para medir una propiedad eléctrica a través de la membrana. La propiedad eléctrica puede incluir al menos una de tensión y fuga de corriente.

35 El controlador forma una interfaz con el sensor y detecta un cambio brusco en la propiedad eléctrica medida. En respuesta a detectar el cambio brusco en la propiedad eléctrica medida, el controlador retira el uno del potencial eléctrico o la corriente eléctrica aplicado a la membrana y retira el haz láser enfocado desde la ubicación particular sobre la membrana.

En otro ejemplo, el dispositivo óptico puede ser un microscopio óptico invertido.

En incluso otro ejemplo, un electrodo de los al menos dos electrodos se puede disponer en cada uno de los dos depósitos.

40 En un ejemplo, los al menos dos electrodos pueden estar en contacto directo con la membrana.

En otro aspecto de la presente descripción, los electrodos pueden aplicar una corriente eléctrica a la membrana, el sensor puede medir una tensión a través de la membrana, como propiedad eléctrica, y el controlador puede comparar la tensión medida con un umbral y retirar la corriente eléctrica a la membrana y el haz láser enfocado desde la ubicación particular sobre la membrana en respuesta a que la tensión sea menor que el umbral.

45 En incluso otro aspecto de la presente descripción, los electrodos pueden aplicar un potencial eléctrico a la membrana, el sensor puede medir una fuga de corriente a través de la membrana, como propiedad eléctrica, y el controlador puede comparar la fuga de corriente medida con un umbral. El controlador puede retirar el potencial eléctrico a la membrana y el haz láser enfocado desde la ubicación particular sobre la membrana en respuesta a que la fuga de corriente medida sea mayor que el umbral.

50 En un ejemplo, un método para aumentar el tamaño de un nanoporo en una membrana puede comprender al menos un material dieléctrico, donde el método puede incluir: dirigir un haz láser sobre el nanoporo en la membrana mientras uno de un potencial eléctrico o una corriente eléctrica se aplica a la membrana; medir una fuga de corriente a través de la membrana; determinar un aumento en el tamaño del nanoporo sobre la base de la fuga de corriente medida; y retirar el uno del potencial eléctrico o la corriente eléctrica a la membrana en respuesta a detectar un aumento en el
55 tamaño del nanoporo.

En un ejemplo, la membrana puede comprender una pluralidad de nanoporos y el haz láser es dirigido sobre un primer nanoporo.

En otro ejemplo, el método puede incluir además dirigir el haz láser sobre un segundo nanoporo.

- 5 Áreas adicionales de aplicabilidad resultarán evidentes a partir de la descripción que se proporciona en esta memoria. La descripción y los ejemplos específicos en este compendio están pensados a modo de ilustración únicamente y no están pensados para limitar el alcance de la presente descripción.

Dibujos

Los dibujos descritos en esta memoria son únicamente para fines ilustrativos de realizaciones seleccionadas y no todas posibles implementaciones, y no se pretende que limiten el alcance de la presente descripción.

- 10 la figura 1 es un diagrama que representa un ejemplo de configuración para fabricar un nanoporo usando una técnica de descomposición controlada mejorada por láser de la presente descripción;

la figura 2 se una vista expandida de un dispositivo fluídico en la configuración de la figura 1;

la figura 3 es un diagrama de flujo que representa un método para fabricar un nanoporo usando la técnica de descomposición controlada mejorada por láser;

- 15 la figura 4 es una tabla que enumera múltiples materiales de membrana y la longitud de onda asociada para que un haz de luz sea iluminado sobre la membrana

las figuras 5A y 5B son imágenes digitales que representan un tamaño de punto de un haz de luz;

la figura 6 es una gráfica que representa los efectos en una fuga de corriente a través de una membrana de SiN; y

- 20 las figuras 7A a 7F son imágenes ópticas que representan fabricación de nanoporo usando la técnica de descomposición controlada mejorada por láser.

Números de referencia correspondientes indican piezas correspondientes por las diversas vistas de los dibujos.

Descripción detallada

- 25 La presente descripción describe un método y/o un aparato para fabricar nanoporos en una ubicación predeterminada usando una técnica de descomposición controlada mejorada por láser (LECBD, del inglés *laser-enhanced controlled breakdown*). La técnica de LECBD controla una rigidez dieléctrica del material de membrana para mejorar significativamente la probabilidad de fabricar un nanoporo en una ubicación precisa sobre la membrana. Usando LECBD, un haz de luz enfocado (p. ej., un haz láser) se dirige hacia la membrana, y la ilumina, en una ubicación particular. Con la ubicación particular iluminada, se aplica un potencial eléctrico a través de la membrana. El haz enfocado aumenta la conductividad en la ubicación particular. La mayor conductividad tiene como resultado fuga de corriente localmente mejorada y favorece fuertemente la formación de nanoporo en la parte iluminada de la membrana.

Ahora se describirá la presente descripción más totalmente con referencia a los dibujos adjuntos.

- 35 Las figuras 1 y 2 representan un ejemplo de un aparato de fabricación de nanoporo para fabricar un nanoporo usando LECBD. El aparato de fabricación de nanoporo 100 incluye un dispositivo fluídico 102, un dispositivo de haz de enfoque 104 (es decir, un dispositivo óptico), y un controlador 106. El dispositivo fluídico 102 y/o el aparato entero se pueden disponer en una jaula de Faraday con conexión a tierra 107 para aislar el ruido eléctrico. La configuración, usada para demostrar la localización de la fabricación de nanoporo por LECBD, se diseña para realizar mediciones simultáneas ópticas y eléctricas de paso de biomoléculas a través del nanoporo; aunque se pueden construir realizaciones más simples para implementar LECBD.

- 40 Como se ilustra en la figura 2, el dispositivo fluídico 102 incluye una celda fluídica 110 y una pareja de electrodos 112 acoplados eléctricamente a un circuito amplificador de corriente (CAC) 114. La celda fluídica 110 sostiene una membrana 116 dispuesta en un chip de silicio 118 y proporciona acceso óptico a la membrana 116 para el dispositivo de haz de enfoque 104.

- 45 En algunas implementaciones, la membrana 116 comprende un material dieléctrico tal como nitruro de silicio (SiN). Las membranas son preferiblemente delgadas con un grosor de 10 nm o 30 nm; aunque esta descripción contempla membranas que tienen diferentes grosores. Membranas que comprenden otros materiales dieléctricos, tales como otros óxidos y nitruros, que se usan comúnmente como materiales de compuerta para transistores, también caen dentro del alcance de esta descripción. De manera semejante, membranas atómicamente delgadas pueden comprender otros materiales tales como grafeno, nitruro de boro y similares. También se contempla que las membranas puedan comprender múltiples capas de materiales, incluidos materiales dieléctricos y/o materiales conductivos.

50

- La celda fluidica 110 incluye depósitos 120 y un soporte 122. Los depósitos 120 se rellenan con un fluido que contiene iones (es decir, solución de electrolito). Desde los depósitos 120 se proporciona fluido a la membrana 116 por medio de entubación 124 de politetrafluoretileno (PTFE). Los electrodos 112 se insertan en los respectivos depósitos 120 y se vinculan eléctricamente a la membrana 116 a través de la solución de electrolito que fluye desde los depósitos 120 a través de la entubación de PTFE 124. El flujo de la solución de electrolito desde los depósitos 120 puede ser controlado al conectar una bomba de jeringa (no se muestra) a un miembro de conector de aguja 126 proporcionado con los depósitos 120.
- El dispositivo fluidoico 102 puede incluir diversas combinaciones adecuadas de electrodos y solución de electrolito. Por ejemplo, el dispositivo fluidoico 102 puede tener soluciones salinas con base de cloruro con electrodos de Ag/AgCl o soluciones de sulfato de cobre con electrodos de cobre. El fluido también podría ser un solvente no acuoso, tal como 1M LiCl en etanol. El fluido puede ser el mismo en ambos depósitos 120 y no tiene por qué poseer una acción de grabado químico activo contra el material de membrana. También se conciben otros tipos de fluidos y medios de posicionar membrana entre los dos depósitos, tales como encapsulación micro- y nanofluidica.
- El soporte 122 aloja la membrana 116 y sumerge la membrana 116 con fluido desde los depósitos 120. El soporte 122 se puede hacer de aluminio u otro material adecuado. El soporte 122 también incluye una ventana 128 para proporcionar un acceso óptico al dispositivo de haz de enfoque 104. Más particularmente, dentro de la ventana se dispone una ubicación particular de la membrana 116 en la que se va a formar un nanoporo 128 para recibir un haz de enfoque del dispositivo de haz de enfoque 104.
- El dispositivo fluidoico 102 se posiciona sobre una platina 140 sobre el dispositivo de haz de enfoque 104. La platina 140 puede ser una platina fija o una platina movible. El dispositivo de haz de enfoque 104 puede ser un microscopio óptico invertido e incluye una fuente de luz 142, un microscopio 144 y una cámara 146. La fuente de luz 142 puede ser operable por el controlador 106 para activar y desactivar la fuente de luz 142 y/o controlar un miembro obturador (no se muestra) que bloquea la luz emitida por el dispositivo de haz de enfoque 104. En un ejemplo de realización, la fuente de luz 142 puede ser un diodo láser que emite un haz láser en una longitud de onda deseada. La fuente de luz 142 puede incluir otras fuentes adecuadas, tales como una lámpara de mercurio, y no se limita a los ejemplos proporcionados en esta memoria.
- La luz generada por la fuente de luz 142 es dirigida a través del microscopio 144 donde es enfocada al ajustar una distancia entre dos lentes (no se muestra) y es dirigida hacia la membrana 116. Específicamente, un objetivo 148 del microscopio 144 se alinea con la ventana 128 del dispositivo fluidoico 102. El haz de luz es dirigido a una ubicación particular de la membrana 116 en la que se va a formar el nanoporo. Por ejemplo, el controlador 106 puede controlar el dispositivo de haz de enfoque 104 para ajustar la dirección del haz de luz para que el haz de luz se alinee con la ubicación particular a lo largo de la membrana 116. Como otro ejemplo, si la platina 140 es movible, el controlador 106 también puede ajustar la posición de la membrana 116 con respecto al haz de luz al controlar la platina 140. También se conciben otros métodos para alinear el haz de luz con la membrana en la ubicación particular, tales como controlar tanto el dispositivo de haz de enfoque como la posición de la membrana, y por lo tanto, la presente descripción no se debe limitar a los ejemplos proporcionados en esta memoria.
- El haz de luz emitido desde el microscopio 144 ilumina la ubicación particular de la membrana 116 y puede iluminar fluoroforos (p. ej. ADN teñido con YOYO, o tintes sensibles a Ca^{2+}). La emisión es filtrada por un cubo de filtro específico dentro del microscopio 144 (p. ej. FITC) y es recogida por la cámara 146.
- Con el haz de luz iluminando la membrana 116 en la ubicación particular, el controlador 106 puede controlar el circuito amplificador de corriente 114 y hacer que el circuito 114 aplique un potencial eléctrico a los electrodos 112. En un ejemplo de realización, el controlador 106 puede ser implementado por un circuito de adquisición de datos (DAQ, del inglés *data acquisition*) 150 acoplado a un ordenador personal 152 u otro tipo de dispositivo informático.
- El circuito amplificador de corriente 114 puede ser un simple circuito amplificador de operación para leer y controlar tensión y corriente. Los amplificadores operacionales pueden ser alimentados por, por ejemplo, una fuente de tensión de ± 20 voltios. En funcionamiento, el circuito 114 toma una orden de tensión (p. ej., entre ± 10 voltios) del controlador 106, amplifica la orden de tensión a, por ejemplo, ± 20 voltios, y establece el potencial a través de la membrana 116 por medio de los electrodos 112. El potencial aplicado también puede ser medido por el circuito amplificador de corriente 114. Por ejemplo, el flujo de corriente entre los dos electrodos 112 se mide en uno o ambos los electrodos 112 con sensibilidad pA. Más específicamente, la corriente se mide con una topología de amplificador de transimpedancia. La señal de corriente medida es digitalizada por el circuito de adquisición de datos 150 y alimentada continuamente al ordenador 152. De esta manera, la corriente es monitorizada en tiempo real por el controlador 106 (p. ej., a una frecuencia de 10 Hz). Otras disposiciones de circuito para aplicar un potencial y medir una corriente se encuentran dentro del alcance de esta descripción.
- El controlador 106 monitoriza la corriente entre los electrodos 112 y determina cuando la corriente alcanza un umbral de corriente. En el ejemplo de realización, el umbral de corriente se establece para coincidir con el aumento repentino en la corriente para establecer el tamaño mínimo del nanoporo en un orden de 1 nm. En otras realizaciones, el tamaño del nanoporo se puede establecer más grande si se continúa aplicando un potencial a través de la membrana. Esto es, el tamaño del nanoporo continúa aumentando conforme la corriente monitorizada continúa aumentando. En lugar

de establecer el umbral de corriente para que coincida con el aumento repentino en la fuga de corriente, el valor del umbral de corriente se puede establecer a diferentes valores para lograr un nanoporo de diversos tamaños.

En el ejemplo de realización la formación del nanoporo se monitoriza al aplicar una tensión fija y monitorizar la corriente. Como alternativa, el aparato de fabricación de nanoporo 100 se puede configurar para aplicar un nivel fijo de corriente y monitorizar la tensión a través de la membrana 116. Por ejemplo, con una corriente fija aplicada a la membrana 116, el controlador 106 puede monitorizar la tensión a través de la membrana para detectar una disminución brusca en la tensión provocada cuando se forma un nanoporo. Esta disminución brusca en la tensión autolimita la ampliación del poro recientemente formado. El controlador 106 puede comparar la tensión detectada con un umbral de tensión que coincide con la disminución repentina en la tensión para establecer el tamaño mínimo del nanoporo. Por consiguiente, en un ejemplo de realización, el circuito amplificador de corriente puede funcionar como sensor para medir una propiedad eléctrica, tal como corriente y/o tensión. El controlador puede recibir una señal eléctrica del circuito amplificador de corriente indicativa de la propiedad eléctrica medida a través de la membrana para monitorizar la propiedad eléctrica.

Con referencia a la figura 3, se proporciona un ejemplo de método para formar un nanoporo en una ubicación particular usando LECBD. El método controla la rigidez dieléctrica de la membrana para formar un nanoporo en una ubicación particular de la membrana. Para controlar la rigidez dieléctrica, la membrana 116 y el dispositivo de haz de enfoque 104 se alinean, en 200, de manera que un haz de luz emitido por el dispositivo de haz de enfoque 104 ilumina una ubicación particular de la membrana 116. El dispositivo de haz de enfoque 104 emite el haz de luz para iluminar la ubicación particular de la membrana 116, en 202.

Con la membrana 116 iluminada en la ubicación particular, el método, en 204, aplica una tensión a través de la membrana 116 para generar un campo eléctrico suficientemente alto para inducir una fuga de corriente a través de la membrana 116. El flujo de corriente a través de la membrana es monitorizado, en 206, mientras se está aplicando el campo eléctrico y se está iluminando la membrana 116. El potencial eléctrico se selecciona para inducir un campo eléctrico en la membrana, de manera que el campo eléctrico tenga un valor mayor que una décima de la rigidez dieléctrica de la membrana o campo eléctrico que tiene un valor mayor de 0,1 voltio por nanómetro.

La creación de un único nanoporo (es decir, canal fluido que abarca la membrana) es indicada por un aumento irreversible brusco en la fuga de corriente. Para detectar la creación del nanoporo, se compara la corriente monitorizada con un umbral predeterminado, en 208. Cuando la corriente monitorizada supera el umbral, la tensión aplicada a la membrana 116 y la iluminación de la membrana 116 en la ubicación particular se terminan en 210. Si bien se hace referencia a la formación de un nanoporo, las técnicas descritas en esta memoria son aplicables más generalmente a orificios de diversos tamaños.

En el ejemplo de realización, se aplica un potencial eléctrico a la membrana y se monitoriza una fuga de corriente, como propiedad eléctrica de la membrana. Como alternativa, se puede aplicar una corriente eléctrica a la membrana y se puede monitorizar un nivel de tensión, como propiedad eléctrica de la membrana. Adicionalmente, en el ejemplo de realización, el haz láser se alinea con la membrana antes de aplicar el potencial eléctrico/corriente eléctrica. Como alternativa, el potencial eléctrico/corriente eléctrica se puede aplicar a la membrana antes de dirigir el haz láser e iluminar una ubicación particular sobre la membrana.

En algunas realizaciones, el potencial eléctrico se retira de la membrana 116 antes del aumento brusco en la fuga de corriente (es decir, antes de la formación de poro). Por ejemplo, el potencial eléctrico se retira después de que la corriente monitorizada supera un umbral predefinido o después de una cantidad de tiempo especificada pero antes del aumento brusco en la fuga de corriente. De esta manera, el poro puede ser taladrado o formado parcialmente en la membrana. Entonces se puede usar el mismo o diferente proceso en un momento subsiguiente para completar la formación de poro.

Iluminar un área seleccionada de la membrana con un haz enfocado (p. ej., haz láser) genera parejas electrón-orificio, que aumenta eficazmente la conductividad en la región iluminada. La longitud de onda particular de la luz usada se puede afinar para maximizar la fotoconductividad en un material particular. Por ejemplo, la figura 4 ilustra una tabla de longitudes de onda óptimas para diversos materiales para excitar directamente electrones por encima de la banda prohibida. Cabe señalar que también se puede usar una fuente de láser con menos energía que la banda prohibida, puesto que mientras no tenga suficiente energía para excitar un electrón directamente a través de la banda prohibida, todavía podría promover un electrón a una trampa dentro de la banda prohibida y de la trampa a la banda de conducción. Esto es, la generación de pareja electrón-orificio podría ocurrir en múltiples etapas. El aumento de conductividad tiene como resultado fuga de corriente mejorada localmente y favorece fuertemente la formación de nanoporo en la parte iluminada por láser de la membrana durante el proceso CBD.

A modo de explicación adicional, en un proceso conocido como fotoconductividad, absorción de radiación electromagnética, tal como la de luz láser, por un material excita electrones a través de su banda prohibida, generando de ese modo parejas electrón-orificio. El aumento del número de electrones libres y orificios de electrón altera las propiedades eléctricas del material; aumentando localmente de manera eficaz su conductividad y creando un camino preferido para la fuga de corriente. Una fuga de corriente mejorada a través de la región iluminada por láser aumenta localmente la tasa a la que la corriente genera defectos sobre la membrana; proporcionando condiciones sumamente

favorables para formación de nanoporo en el punto láser sobre la membrana. Así, se puede generar un nanoporo en una ubicación particular sobre la membrana al usar el haz enfocado de un láser para iluminar la ubicación particular donde se desea el poro. También cabe señalar que la iluminación de una membrana dieléctrica puede inducir cambios metaestables en la densidad de trampas o en la carga de las trampas nativas, lo que lleva a un aumento de fotoconductividad.

En general, la precisión con la que se localiza el nanoporo sobre la membrana depende de cuán concentradamente se enfoca el haz láser; hasta a un punto limitado por difracción a grosso modo en el intervalo de ~500-nm dependiendo de las ópticas de enfoque y la longitud de onda de la luz usada. Sin embargo, como un haz láser gaussiano tiene su intensidad máxima en el centro, el nanoporo se puede ubicar con precisión de límite subdifracción, puesto que el efecto fotoconductividad es el más fuerte en el mismo centro del haz donde la intensidad es máxima.

Bajo un campo eléctrico alto, puede existir una tasa D local de defectos generados por unidad de área por unidad de tiempo en la membrana, que es responsable para el CBD. La tasa local es directamente proporcional a la densidad de fuga de corriente que pasa la membrana, como se proporciona en la expresión (1), donde $p(\vec{r})$ es la densidad de fuga de corriente local.

$$D(\vec{r}, t) = \alpha p(\vec{r}) \dots (1)$$

Puesto que se pueden formar nanoporos en cualquier parte con igual probabilidad en ausencia de iluminación láser, se puede suponer que existe una densidad de corriente de fondo para una tensión dada, como se proporciona en la expresión (2).

$$D_0 = \alpha \rho_0 \dots (2)$$

Una vez se enciende el láser y la energía fotónica es mayor que la banda prohibida de la membrana, se excitarán electrones y se generará fotocorriente con densidad de fotocorriente proporcional a la intensidad de láser local $I(\vec{r})$. La tasa de generación de defectos se puede proporcionar así en la siguiente expresión (3). La tasa de generación de defectos por unidad de área dentro del punto iluminado por láser será entonces mayor que la tasa de generación de defectos de fondo por un factor proporcionado en la expresión (4).

$$D(\vec{r}) = \alpha [\rho_0 + \beta I(\vec{r})] = D_0 + \alpha \beta I(\vec{r}) \dots (3)$$

$$\frac{D(\vec{r})}{D_0} = 1 + \frac{\beta I(\vec{r})}{\rho_0} \dots (4)$$

Obsérvese que aunque no se señala explícitamente, todas las cantidades anteriores depende del tiempo ya que la corriente provoca daño acumulativo al material. Con un perfil láser gaussiano con cintura de haz w_0 , la tasa de formación de defectos se mejora entonces en un factor proporcionado en la expresión (5), donde r se mide desde el centro de la haz.

$$\frac{D(\vec{r})}{D_0} = 1 + \frac{\beta}{\rho_0} I_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{w_0^2}\right) \dots (5)$$

La descomposición ocurre una vez existe una densidad crítica de defectos en cualquier punto en la membrana. Puesto que α , β y ρ_0 son parámetros de material que son independientes de la intensidad de láser, siempre es posible asegurar, con intensidad de láser suficientemente alta, que la probabilidad de ese punto existente dentro del punto láser es mayor que la probabilidad de que se forme en otra parte sobre la membrana. Además, como la tasa de generación de densidad de defecto depende con sensibilidad de la distancia desde el centro del punto láser, en principio es posible localizar la formación de nanoporo con precisión subdifracción.

Para una intensidad de láser dada la fotocorriente debe volverse finalmente independiente de la tensión o la intensidad de campo eléctrico durante la fabricación (es decir, saturar) conforme aumenta la tensión (campo eléctrico), mientras que la densidad de fuga de corriente de fondo continuará aumentando, por lo que se necesitan intensidades más altas para tener un efecto significativo en la posición de formación de nanoporo para tensiones más altas (o campos eléctricos más altos). Además, puesto que ρ_0 es una función creciente de la tensión aplicada, se espera que usar menores tensiones (o campos eléctricos) tenga como resultado aumento de fiabilidad de localización.

Como ejemplo, las figuras 5A y 5B son imágenes digitales que representan tamaño reducido de punto láser para mejorar la resolución de formación de poro localizada. En particular, usando el aparato descrito anteriormente, un haz láser de 488 nm se enfoca utilizando la distancia entre dos lentes en el microscopio de manera que la región de iluminación se reduce, formando de ese modo un punto limitado por difracción. Imágenes digitales obtenidas por microscopía óptica revelan la reducción eficaz en el tamaño de punto del haz láser enfocado. La figura 5A es una imagen con intensidades que van de 0 a 1000 a.u. y la figura 5B es la misma imagen con intensidad ajustada a intervalo de 0 a 20 a.u. para permitir visualización de la membrana de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$. La potencia de láser era de 0,1 mW cuando se tomaron las imágenes.

Con referencia a la figura 6, el efecto de iluminación de membrana en la fuga (tunelización) de corriente a través de la membrana de SiN es drástico. El lado izquierdo de la gráfica muestra la respuesta de corriente de la membrana de SiN a cuatro impulsos de tensión de magnitud creciente (1 V, 2 V, 3 V, 4 V). El lado derecho de la gráfica muestra la respuesta de corriente de la misma membrana a los mismos impulsos de tensión durante iluminación con el haz láser enfocado a 30 mW.

La tensión aplicada a través de una membrana y su fuga de respuesta de corriente es trazada inicialmente sin iluminación láser. Los mismos impulsos de tensión se repiten entonces con iluminación láser simultánea de una región de $\sim 1 \mu\text{m}$ de diámetro en la membrana de SiN. A tensiones aplicadas más altas (p. ej., $> 2 \text{ V}$), la fuga de corriente aumenta significativamente durante la iluminación láser. El notable aumento en los valores de corriente medidos producidos por iluminación láser dibuja una unión entre formación de poro localizada y el efecto fotoconductor de un haz láser durante descomposición controlada, y muestra que la contribución dominante a la fuga de corriente procede de la área iluminada por láser. También demuestra que la densidad de fuga de corriente se mejora localmente mucho en el punto láser, puesto que la corriente de fondo sin el láser también incluye contribuciones del chip de soporte, donde no se pueden formar nanoporos. A fin de que un área limitada por difracción contribuya tan fuertemente a la corriente total, la densidad de corriente local debe ser aumentada drásticamente por iluminación láser.

A pesar de la hecho de que luz láser dispersada ilumina casi la área entero de $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ de la membrana de SiN, el perfil gaussiano de la intensidad de haz resultante en el punto de mayor de intensidad de luz (órdenes de magnitud más altos) en el centro de haz, maximizando la mejora de fotoconductividad. Como se muestra en las figuras 7A-7F, cuando se aplica una tensión a través de la membrana durante LECBD, se maximiza la fuga de corriente en este punto iluminado por láser, seguido por formación de un nanoporo en la misma ubicación precisa. Las figuras 7A y 7D son imágenes ópticas obtenidas por microscopio de campo ancho usando lámparas halógenas. Las figuras 7B y 7C son imágenes ópticas obtenidas por un microscopio de campo ancho usando un láser de 488 nm. Las figuras 7E y 7F son imágenes ópticas obtenidas por un microscopio de fluorescencia.

La figura 7A representa la membrana de SiN nativa sumergida en 1M KCl antes de la formación de poro. La figura 7B representa la misma membrana iluminada por un punto de haz láser de 488 nm enfocado a un punto en cierto modo grande ($\sim 10 \mu\text{m}$). La figura 7C representa los efectos de un diafragma usado para limitar iluminación láser a la membrana de SiN. La figura 7D representa la membrana tras la formación de poro por LECBD a alta potencia de láser ($\sim 30 \text{ mW}$). Obsérvese que rasgos sobre la membrana se observan tras el procedimiento de fabricación 7D con respecto a la figura 7A. El ADN etiquetado con tinte fluorescente YOYO-1 tapona el nanoporo, revelando su ubicación bajo iluminación láser (todos los otros puntos brillantes han confirmado moverse a lo largo del tiempo y se ha observado captura de ADN en el emplazamiento de nanoporo). En la figura 7F, la imagen de microscopio óptico del nanoporo en la figura 7D se superpone con la imagen de fluorescencia de la ubicación de poro de la figura 7E para demostrar claramente la correlación entre los rasgos de membrana observados tras la CBD mejorada por láser y localización de poro confirmada.

En la demostración representada en las figuras 7A-7F, se usó una intensidad de láser de 30 mW, que creó rasgos sobre la membrana tras la fabricación de nanoporo. La fabricación de nanoporo por LECBD también se realizó con menor potencia láser (p. ej. 2 mW), que no generó rasgos observables sobre la membrana tras la fabricación por LECBD. La ubicación del nanoporo se certifica al observar ópticamente la captura y translocación de ADN lambda tintado con tintes fluorescentes YOYO-1, y se confirma que corresponde con el centro del punto iluminado por láser durante la fabricación de nanoporo por LECBD.

La técnica de descomposición controlada mejorada por láser de la presente descripción se puede usar para localizar la formación de un nanoporo sobre una membrana por CBD. Como se ha descrito anteriormente, un haz láser enfocado que golpea una membrana, que se sumerge en solución de electrolito y se expone a un campo eléctrico alto, induce aumento de fuga de corriente localizada y mejora las tasas de formación de defectos en la membrana en el punto láser. El haz láser aumenta enormemente la probabilidad de fabricación de nanoporo en esa posición sobre la membrana. La probabilidad por unidad de área de fabricar un nanoporo en el centro del punto láser que golpea la membrana aumenta con el aumento de intensidad de láser. Menores valores de los campos eléctricos altos usados para la fabricación se espera que tengan como resultado un aumento de fiabilidad de localización bajo iluminación láser apropiada, puesto que la fotocorriente en la membrana será la contribución prevalente a la fuga de corriente global.

En condiciones de campo eléctrico bajo (p. ej. $< 0,5 \text{ V/nm}$ para membranas de SiN, o $< 5 \text{ V}$ para una membrana de SiN de 10 nm en 1M KCl neutro), se puede fabricar una distribución de nanoporos al controlar la posición del haz enfocado sobre la superficie de membrana. Mover el haz enfocado alejándolo de la posición una vez ha ocurrido la primera descomposición termina la fabricación de nanoporo y el crecimiento en esa posición, mientras se desencadena la fabricación de un segundo nanoporo en la nueva posición de haz láser. Este proceso se puede repetir hasta obtener el tamaño de distribución deseado. Los términos "campo eléctrico alto" y "campos eléctricos bajos" son dependientes del material. Generalmente, un "campo bajo" puede referirse a campos de menos de una décima de la rigidez dieléctrica, y un "campo alto" puede referirse a campos que son del orden de la rigidez dieléctrica del material.

Como ejemplo, tras formar un nanoporo en una primera ubicación, el dispositivo de haz de enfoque deja de iluminar la primera ubicación al apagar la fuente de luz y/o bloquear el haz de luz por medio del miembro obturador. El

5 dispositivo de haz de enfoque y la membrana se alinean entonces de manera que la luz emitida por el dispositivo de haz ilumina una segunda ubicación. La posición del dispositivo de haz de enfoque y la membrana se pueden ajustar de diversas maneras adecuadas que incluyen, pero sin limitación a esto, ajustar una posición de la platina móvil en la que se posiciona la membrana y/o ajustar una dirección óptica del haz de luz por medio del microscopio. Con la segunda posición alineada con el dispositivo de haz de foco, la segunda posición es iluminada con el haz enfocado y se aplica la tensión a través de la membrana. La formación del segundo nanoporo en la segunda ubicación es monitorizada sobre la base de la corriente a través de la membrana, como se ha tratado anteriormente. Por consiguiente, en la membrana se pueden formar múltiples nanoporos en ubicaciones predeterminadas.

10 Bajo el mismo principio, iluminar un nanoporo dado en una distribución también se puede usar para aumentar el nanoporo dado a un tamaño deseado mientras no se afecta al tamaño de los otros nanoporos en la distribución. Por ejemplo, una membrana que tiene múltiples nanoporos puede ser iluminada en la ubicación que tiene el nanoporo dado. Conforme se aplica potencial eléctrico a través de la membrana, el tamaño del nanoporo dado puede aumentar mientras los otros nanoporos permanecen sin cambiar.

15 La fabricación de nanoporo por LECBD también puede verse influenciada por el cambio en la densidad de carga de superficie de la superficie de membrana cuando está bajo iluminación al modular la tasa de transferencia de carga en la interfaz electrolito/membrana y así, la magnitud de la fuga de corriente.

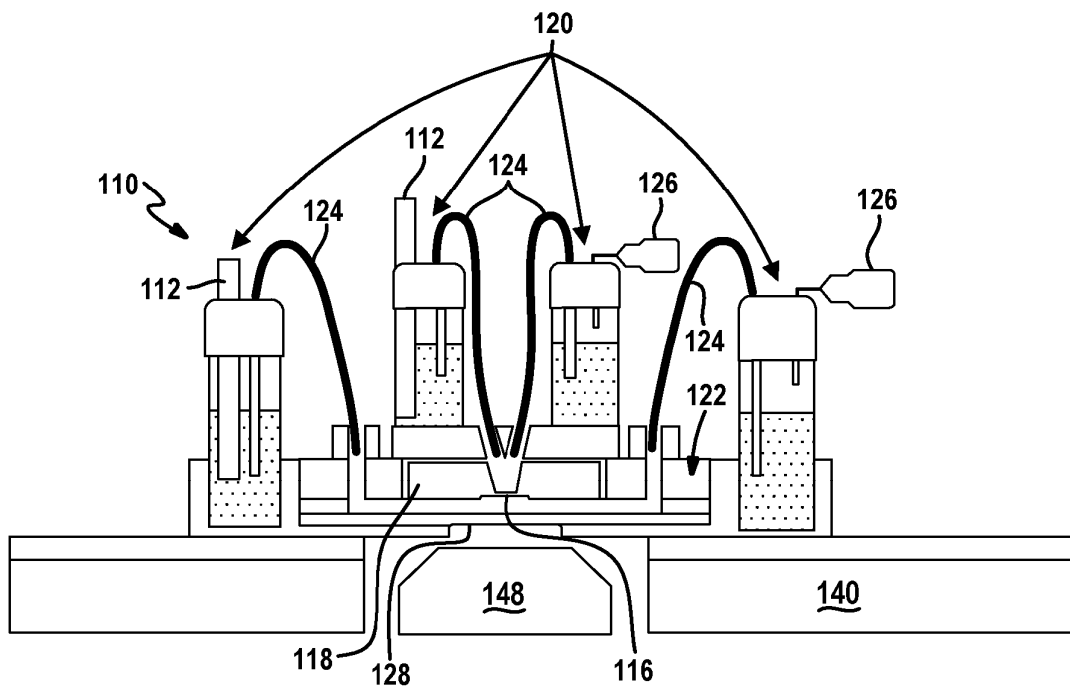
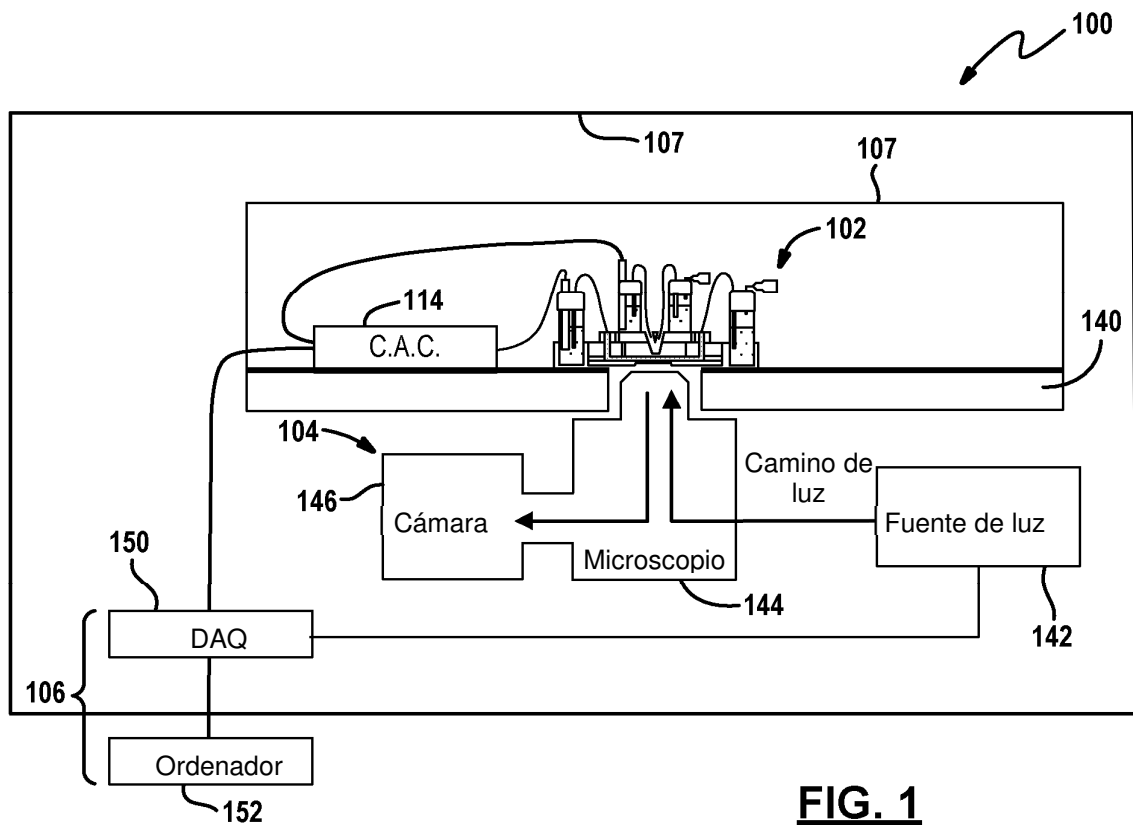
20 La fabricación de nanoporo por LECBD puede además verse influenciada por el calentamiento local de la membrana por el haz enfocado que afecta a la rigidez dieléctrica del material de membrana. Se podría usar la afinación de la tasa de repetición de un láser pulsado para inducir calentamiento local o por el contrario evitar calentamiento sobre la membrana.

REIVINDICACIONES

1. Un método para fabricar un nanoporo en una ubicación particular en una membrana (116), el método comprende:
 - 5 - dirigir un haz láser desde una fuente de luz (142) sobre una superficie de la membrana (116) en la ubicación particular sobre la membrana (116), en donde la membrana (116) comprende al menos un material dieléctrico;
 - aplicar uno de un potencial eléctrico o una corriente eléctrica a la membrana (116);
 - medir una propiedad eléctrica a través de la membrana (116) mientras el uno del potencial eléctrico o la corriente eléctrica está siendo aplicado a la membrana (116) y el haz láser está siendo dirigido en la ubicación particular, en donde la propiedad eléctrica incluye al menos una de tensión o fuga de corriente;
 - 10 - comparar el valor de la propiedad eléctrica medida con un umbral; y
 - retirar el uno del potencial eléctrico o la corriente eléctrica a la membrana (116) y retirar el haz láser de la ubicación particular sobre la membrana (116) en respuesta al valor de la propiedad eléctrica medida que supera el umbral.
2. El método de la reivindicación 1 comprende además seleccionar una longitud de onda para el haz láser sobre la base de la composición de material de la membrana (116).
3. El método de la reivindicación 1 en donde el uno del potencial eléctrico o la corriente eléctrica se aplica después de que el haz láser es dirigido sobre la ubicación particular sobre la membrana (116).
4. El método de la reivindicación 1 en donde el haz láser es dirigido sobre la ubicación particular sobre la membrana (116) después de aplicar el uno del potencial eléctrico o la corriente eléctrica.
- 20 5. El método de la reivindicación 1 en donde la propiedad eléctrica incluye la fuga de corriente a través de la membrana (116) cuando se aplica un potencial eléctrico a la membrana (116), y comparar el valor de la propiedad eléctrica medida comprende además determinar una tasa de cambio de la fuga de corriente y comparar la tasa de cambio, como valor, al umbral, y el potencial eléctrico y el haz láser se retiran cuando la tasa de cambio de la fuga de corriente es mayor que el umbral, deteniendo de ese modo la fabricación de un nanoporo.
- 25 6. El método de la reivindicación 1 en donde la propiedad eléctrica incluye la fuga de corriente a través de la membrana (116) cuando se aplica un potencial eléctrico a la membrana (116), y el potencial eléctrico y el haz láser se retiran cuando el valor de la fuga de corriente es mayor que el umbral, deteniendo de ese modo la fabricación del nanoporo.
- 30 7. El método de la reivindicación 1 en donde la propiedad eléctrica incluye la tensión a través de la membrana (116) cuando se aplica una corriente eléctrica a la membrana (116), y la corriente eléctrica y el haz láser se retiran cuando el valor de la tensión es menor que el umbral, deteniendo de ese modo la fabricación del nanoporo.
8. El método de la reivindicación 1 comprende además:
 - disponer la membrana (116) entre dos depósitos (120) rellenos con un fluido que contiene iones, de manera que la membrana separa los dos depósitos (120) e impide que el fluido pase entre los dos depósitos (120);
 - 35 - colocar un electrodo (112) en cada uno de los dos depósitos (120); y
 - generar el uno del potencial eléctrico o la corriente eléctrica usando los electrodos (112).
9. El método de la reivindicación 1 comprende además:
 - disponer la membrana (116) entre dos depósitos (120) rellenos con un fluido que contiene iones, de manera que la membrana (116) separa los dos depósitos e impide que el fluido pase entre los dos depósitos;
 - 40 - colocar un electrodo (112) en contacto directo con la membrana (116); y
 - generar el uno del potencial eléctrico o la corriente eléctrica usando los electrodos (112).
10. El método de la reivindicación 1 en donde, para formar una pluralidad de los nanoporos en ubicaciones predeterminadas sobre la membrana (116), en cada una de la ubicaciones predeterminadas, el haz láser es dirigido sobre la superficie de la membrana (116) en la ubicación predeterminada sobre la membrana (116), el uno del potencial eléctrico o la corriente eléctrica se aplica a la membrana (116), la propiedad eléctrica a través de la membrana (116) se mide mientras el uno del potencial eléctrico o la corriente eléctrica está siendo aplicado a la membrana (116) y el haz láser está siendo dirigido en la ubicación predeterminada, la propiedad eléctrica medida se compara con un umbral, y el uno del potencial eléctrico o la corriente eléctrica y el haz láser se retiran en respuesta al valor de la

propiedad eléctrica medida que supera el umbral.

11. El método de la reivindicación 1 en donde la dirección del haz láser comprende además:
- controlar una alineación posicional entre la membrana (116) y el haz láser al controlar una dirección óptica del haz láser, y
- 5 - activar la fuente de luz (142) para emitir el haz láser hacia la superficie de la membrana (116) en la ubicación particular sobre la membrana (116).
12. El método de la reivindicación 1 en donde la dirección del haz láser comprende además:
- controlar una alineación posicional entre la membrana (116) y el haz láser al ajustar una posición de la membrana (116) con respecto a la fuente de luz (142); y
- 10 - activar la fuente de luz (142) para emitir el haz láser hacia la superficie de la membrana (116) en la ubicación particular sobre la membrana (116).
13. Un aparato (100) para fabricar un nanoporo en una membrana (116) que comprende al menos un material dieléctrico por un método según al menos una de la reivindicaciones anteriores, el aparato (100) comprende:
- un dispositivo fluídico (102) que incluye dos depósitos (120), al menos dos electrodos (112), y un soporte (122), en donde:
 - los depósitos (120) contienen fluido que contiene iones, la membrana (116) separa los dos depósitos (120) e impide que el fluido pase entre los dos depósitos (120),
 - los electrodos (112) se conectan eléctricamente a una fuente de alimentación y pueden funcionar para aplicar uno de un potencial eléctrico o una corriente eléctrica a la membrana (116), y
 - el soporte (122) se configura para sostener la membrana (116) que está sumergida en el fluido desde los dos depósitos (120) e incluye una ventana (128) que proporciona acceso óptico a la membrana (116);
 - un dispositivo óptico (104) puede funcionar para emitir un haz láser enfocado que pasa a través de la ventana (128) del soporte (122) y dirigido hacia una ubicación particular sobre la membrana (116), en donde el haz láser enfocado ilumina la ubicación particular de la membrana (116) conforme el uno del potencial eléctrico o la corriente eléctrica está siendo aplicado a la membrana (116) por los electrodos (112);
 - un sensor acoplado eléctricamente a uno de los electrodos (112) y que puede funcionar para medir una propiedad eléctrica a través de la membrana (116), en donde la propiedad eléctrica incluye al menos una de tensión y fuga de corriente; y
 - un controlador (106) que forma una interfaz con el sensor, en donde el controlador (106) detecta un cambio brusco en la propiedad eléctrica medida y, en respuesta a detectar el cambio brusco en la propiedad eléctrica medida, retira el uno del potencial eléctrico o la corriente eléctrica aplicado a la membrana (116) y retira el haz láser enfocado desde la ubicación particular sobre la membrana (116).
14. El aparato (100) de la reivindicación 13 en donde una longitud de onda para el haz láser enfocado se basa en composición de material del material dieléctrico de la membrana (116).
15. El aparato (100) de la reivindicación 13 en donde:
- los electrodos (112) aplican una corriente eléctrica a la membrana (116),
 - el sensor mide una tensión a través de la membrana (116), como propiedad eléctrica, y
 - el controlador (106) compara la tensión medida con un umbral y retira la corriente eléctrica a la membrana (116) y el haz láser enfocado desde la ubicación particular sobre la membrana (116) en respuesta a la tensión que es menor que el umbral.
16. El aparato (100) de la reivindicación 13 en donde:
- los electrodos (112) aplican un potencial eléctrico a la membrana (116),
 - el sensor mide una fuga de corriente a través de la membrana (116), como propiedad eléctrica, y
 - el controlador (106) compara la fuga de corriente medida con un umbral y retira el potencial eléctrico a la membrana (116) y el haz láser enfocado desde la ubicación particular sobre la membrana (116) en respuesta a que la fuga de corriente medida sea mayor que el umbral.



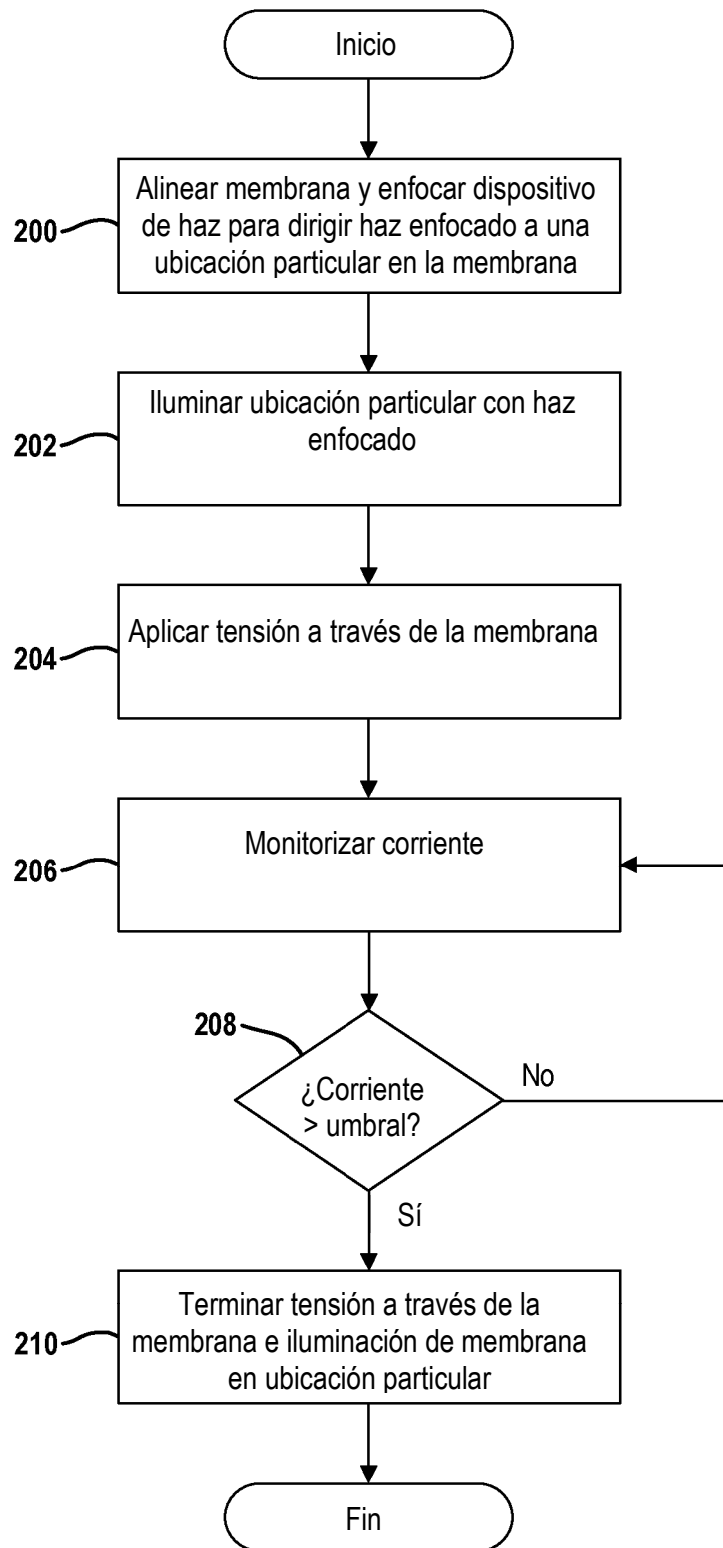


FIG. 3

Material	Longitud de onda
SiCN	326 nm
β -C ₃ N ₄	388 nm
β -Si ₃ N ₄	295 nm 250 nm
α -Si ₃ N ₄	268 nm
Si ₃ N ₄	234 nm
HfO ₂	214 nm 218 nm
SiO ₂	138 nm
α -SiO ₂	222 nm
SiN _x (nitruro de silicio no estequiométrico)	269 nm-1127 nm dependiendo de x

FIG. 4

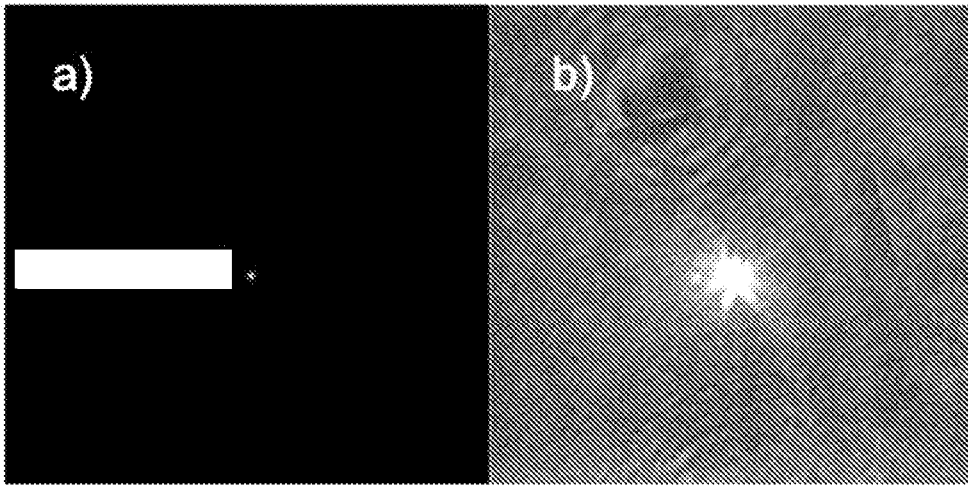


FIG. 5A

FIG. 5B

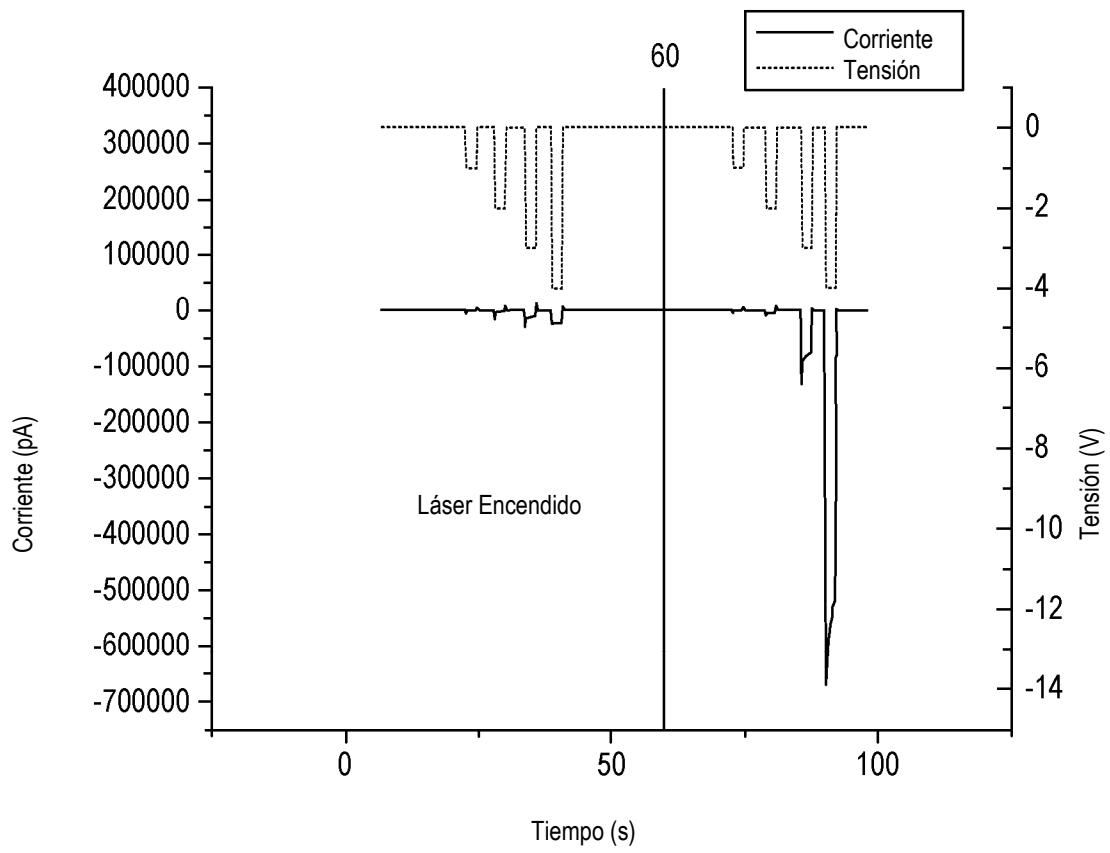


FIG. 6

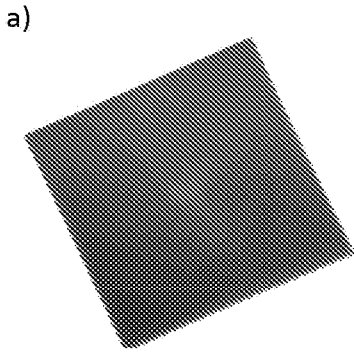


FIG. 7A

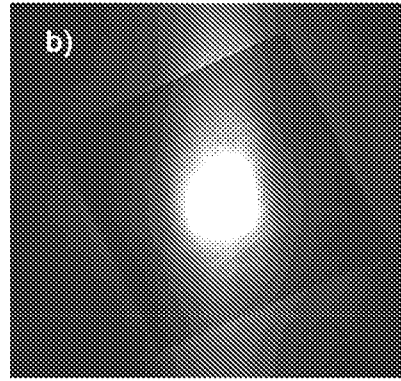


FIG. 7B

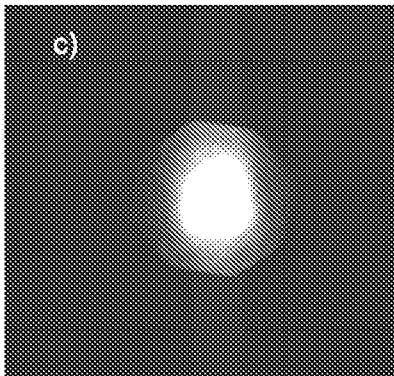


FIG. 7C

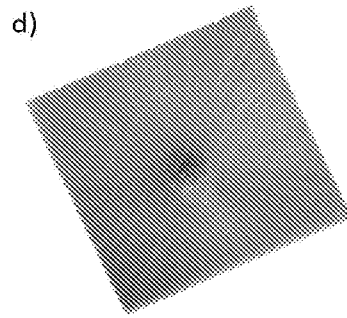


FIG. 7D

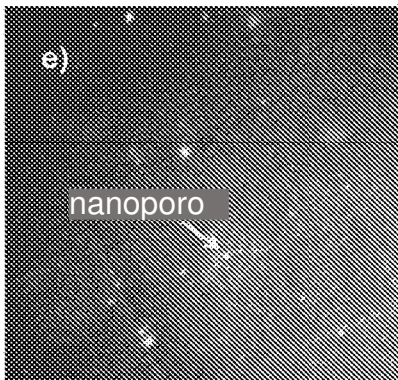


FIG. 7E

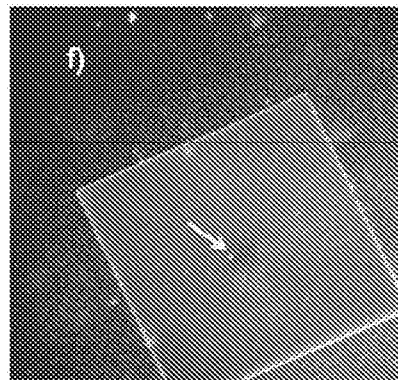


FIG. 7F