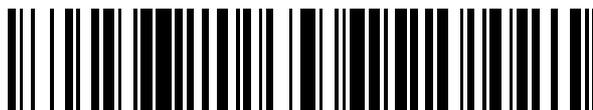


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 570 980**

51 Int. Cl.:

**B01D 61/00** (2006.01)

**F28D 15/04** (2006.01)

**B05B 17/04** (2006.01)

**B64D 13/08** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **05.05.2009 E 09743458 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **10.02.2016 EP 2288430**

54 Título: **Uso de una membrana de material compuesto**

30 Prioridad:

**05.05.2008 US 126447**

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

**23.05.2016**

73 Titular/es:

**CORNELL UNIVERSITY (100.0%)  
395 Pine Tree Road Suite 310  
Ithaca, NY 14850, US**

72 Inventor/es:

**STROOCK, ABRAHAM D. y  
WHEELER, TOBIAS**

74 Agente/Representante:

**DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto**

ES 2 570 980 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

Uso de una membrana de material compuesto

**Campo de la invención**

5 **[0001]** Esta invención se refiere, en general, al campo de las mechas para líquidos, y más particularmente a mechas para microfluidos capaces de bombear líquidos a grandes presiones negativas.

**Antecedentes de la invención**

10 **[0002]** El diseño de los sistemas de transferencia de calor para aplicaciones en aeronaves y otros contextos dinámicos implica restricciones estrictas sobre el peso, factor de forma, amplitud de las condiciones de funcionamiento y robustez del funcionamiento. Los intercambiadores de calor convencionales basados en la transferencia de calor por convección se enfrentan a una serie de retos para estas aplicaciones: la necesidad de bombas activas exclusivas para impulsar el flujo; el requisito de grandes volúmenes de fluido de trabajo debido a la inherentemente pobre eficiencia de la transferencia de calor sensible, y el requisito de grandes diferenciales de temperatura para impulsar tasas de transferencia significativas.

15 **[0003]** Las tuberías de calor son una alternativa atractiva a los intercambiadores de calor convencionales. Las tuberías de calor utilizan el enfriamiento por evaporación para transferir energía térmica desde una fuente de calor hasta un disipador de calor mediante la evaporación y condensación de un fluido de trabajo. El enfriamiento por evaporación tiene la capacidad de eliminar hasta diez veces la energía térmica de un volumen equivalente de líquido por refrigeración sensible (por ejemplo, circuito de refrigerante en circulación). Una tubería de calor típica incluye una tubería sellada que contiene una cantidad de fluido de trabajo y una mecha capilar dispuesta a lo largo de la pared interior de la tubería. Como un extremo de la tubería de calor está expuesto a la fuente de calor, el fluido de trabajo en ese extremo atrae la energía térmica de la fuente de calor y se evapora, aumentando la presión de vapor local en el tubo. El calor latente de evaporación absorbido por la evaporación del fluido de trabajo reduce la temperatura en el extremo caliente de la tubería. La presión de vapor sobre el fluido de trabajo en el lado de la fuente de calor de la tubería es mayor que la presión de vapor en el equilibrio sobre el fluido de trabajo de condensación en el extremo más frío de la tubería, y esta diferencia de presión impulsa una rápida transferencia de masa al extremo de condensación donde el exceso de vapor se condensa, libera su calor latente, y calienta el extremo frío de la tubería. El fluido de trabajo condensado, ahora un líquido, es transferido de nuevo a la fuente de calor mediante la mecha capilar.

20 **[0004]** Los recientes avances en la fabricación de tuberías de calor han dado como resultado tuberías de calor de microfluidos para aplicaciones muy pequeñas, tales como para la refrigeración de elementos microelectrónicos. Las tuberías de calor, planas y delgadas, han surgido también como una tecnología de vanguardia para enfriar los circuitos impresos, ordenadores portátiles u otras aplicaciones que tienen limitaciones en altura. En un ejemplo, una estructura de tubería de calor de microfluidos está grabada en una oblea de silicio utilizando técnicas convencionales de fabricación de microprocesadores. Los canales capilares grabados en la estructura son aumentados con material con efecto de mecha para proporcionar un medio que devuelva el fluido de trabajo condensado al evaporador.

25 **[0005]** Otras estructuras de tuberías de calor incluyen metales porosos de válvulas dispuestos entre la interfaz líquido/vapor del evaporador. La válvula porosa, fabricada típicamente de un metal en polvo sinterizado, tiene huecos intersticiales que actúan como capilares para absorber el fluido de trabajo a través del metal poroso a medida que se evapora el fluido de trabajo.

30 El documento WO 1999-058223 A1 divulga un medio poroso de material compuesto para cualquier fluido gas o líquido. Los medios porosos pueden ser un material compuesto de un metal, un aerogel o una espuma cerámica. Aunque el documento se ocupa principalmente de dispositivos de filtración de aire y líquido, también se sugiere el uso como mecha en una bomba de calor. Los medios porosos de material compuesto tienen una estructura intercelular reticulada en la que las celdas interiores están interconectadas para proporcionar una multiplicidad de poros que atraviesan el volumen de la estructura, siendo las paredes de las propias celdas sustancialmente continuas y no porosas y el volumen de las celdas en relación con el del material que forma las paredes de las celdas es tal que la densidad global de la estructura intercelular está en el intervalo de aproximadamente 20% a aproximadamente 35% de la densidad teórica. La estructura de poros está formada por el polvo sinterizado que rellena los poros de la espuma (y en algunas realizaciones forma una piel sobre la superficie de la espuma) y definirá poros que sean al menos uno o dos órdenes de magnitud más pequeños, por ejemplo, típicamente el tamaño de poro no será mayor que aproximadamente 2 a 10 micrómetros y, preferentemente, de aproximadamente 2 micrómetros para los medios de material compuesto destinados a la operación de flujo de gases y no más de 1 a 100 micrómetros y, preferentemente, de aproximadamente 1 a 20 micrómetros para las aplicaciones de flujo de líquidos. También se sugiere en el contexto de los filtros de material cerámico o de metal para los gases utilizar un aerogel de poro pequeño (por ejemplo, poros de 10 a 100 nanómetros de tamaño) para rellenar los poros del filtro.

35 El documento US 5.037.859 divulga una espuma de material compuesto que comprende una primera espuma de polímero orgánico rígido, microcelular, de célula abierta que tiene una densidad desde aproximadamente 0,015

g/cm<sup>3</sup> a aproximadamente 0,20 g/cm<sup>3</sup> y un tamaño de poro desde aproximadamente 1 micrómetro a aproximadamente 30 micrómetros. La primera espuma contiene un segundo polímero que tiene una densidad de aproximadamente 0,015 g/cm<sup>3</sup> a aproximadamente 0,20 g/cm<sup>3</sup> o una segunda espuma de polímero que tiene una densidad de aproximadamente 0,015 g/cm<sup>3</sup> a aproximadamente 0,20 g/cm<sup>3</sup> y un tamaño de poro de aproximadamente 0,01 micrómetros a aproximadamente 1,0 micrómetros dentro de las celdas abiertas de la primera espuma. La segunda espuma de polímero puede cubrir las paredes de las celdas abiertas de la primera espuma y puede también rellenar de forma sustancialmente completa las celdas abiertas de las primeras celdas abiertas de la primera espuma. La segunda espuma de polímero puede cubrir las paredes de las celdas abiertas de la primera espuma y puede también rellenar de forma sustancialmente completa las celdas abiertas de la primera espuma. La espuma de material compuesto puede ser resistente, fácil de mecanizar, y con el pequeño tamaño de celdas que es necesario para una buena absorción de líquidos.

El documento WO 2006-007721 A1 divulga materiales de absorción híbridos para uso en tuberías de calor de alto rendimiento donde una distribución bimodal de tamaños de poros ofrece ventajas sobre una estructura porosa monolítica homogénea. En un aspecto, una mecha está comprendida de polvo metálico sinterizado formado en las paredes interiores de un sustrato de espuma, fieltro, tamiz o malla metálica. Una estructura de poro fino está formada por el metal en polvo mientras que el sustrato está comprendido de material de poros grandes. Los poros grandes son varias veces, preferentemente de cinco veces a varios órdenes de magnitud mayores en tamaño que los poros pequeños, siendo un intervalo preferido desde aproximadamente 0,5 a aproximadamente 50 micrómetros para los poros pequeños y desde aproximadamente 50 a aproximadamente 1.000 micrómetros para los poros grandes. El polvo metálico sinterizado y el sustrato de metal pueden fabricarse de níquel, cobre, molibdeno, niobio, aluminio, hierro, cobalto, titanio y aleaciones basadas en estos metales, y combinaciones de los mismos.

Seung Ho Yang et al., en el informe "Nanoscale water capillary bridges under deeply negative pressure", Chemical Physics Letters, 451 (2008), 88-92 sobre medidas de microscopio de fuerza atómica (AFM) de la presión Laplace negativa en el interior de puentes capilares de agua entre dos cuerpos por medio de su contribución a la fuerza de adhesión por tracción entre un extremo de la nanoescala AFM y una oblea de silicio en aire y en ultra alto vacío (UHV). Ellos encuentran presiones muy negativas, por debajo de -160 MPa. Finalmente, Ruijing Zhang et al., en el informe "Negative capillary-pressure-induced cavitation probability in nanochannels", Nanotechnology, 21 (2010), 105706 sobre investigaciones de la presión negativa inducida en capilar del flujo de agua en nanocanales de sección transversal rectangular mediante el uso de simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD). Los autores encuentran que las características diametrales de los canales influyen en la probabilidad de cavitación.

**[0006]** Uno de los principales desafíos a los que se enfrentan los diseñadores de tuberías de calor es el de garantizar que la mecha proporciona un flujo positivo de líquido desde la zona del condensador hasta la zona del evaporador. La capacidad de bombeo de la mecha se ve afectada negativamente por la altura (operación contra la gravedad) y la longitud (resistencia del flujo másico). Deben darse consideraciones de diseño cuidadosas a la cantidad de calor que debe ser eliminado a través de la refrigeración por evaporación y garantizar un adecuado suministro de fluido de trabajo para llevar a cabo la eliminación de calor. En aplicaciones de tuberías de calor de microfluidos, se utilizan típicamente para llevar a cabo este fin canales capilares y estructuras con efecto de mecha. Sin embargo, la estructura con efecto de mecha debe generar suficiente fuerza capilar para garantizar el flujo positivo del líquido.

**[0007]** Un inconveniente observado con las tuberías de calor actuales es que la fuerza capilar con efecto de mecha, ya sea en los capilares o en el material con efecto de mecha, no siempre es suficiente para superar las fuerzas dinámicas que pueden ser introducidas en el sistema. Las mechas actuales generan sólo una fracción de un bar (< 1 bar, <1 atmósfera) de presión de bombeo. Esta pequeña diferencia de presión es fácilmente desbordada por la gravedad o por fuerzas de inercia (por ejemplo, la aceleración a lo largo del eje de la mecha). En presencia de estas fuerzas externas, la tubería de calor es propensa a fallos debido al resecado del evaporador. Por ejemplo, el diseño de estructuras de tuberías de calor en aplicaciones aeroespaciales es particularmente difícil. Las secciones del evaporador y del condensador puede que necesiten estar separadas más de 1 metro además de la apropiada diferencia térmica. Además, la aeronave puede desarrollar fuerzas dinámicas de aceleración que pueden ser tres veces superiores a la fuerza de la gravedad (3 g). En situaciones extremas, como cuando los vehículos aeroespaciales viajan hasta o cerca de la frontera con el espacio, las cargas dinámicas pueden ser de hasta diez veces la fuerza de gravedad (10 g). En estas situaciones, se requiere una estructura con efecto de mecha que supere más de 1 bar (1 atmósfera, 0,1 megapascuales) de altura de presión. No hay estructuras con efecto de mecha conocidas que generen suficientes fuerzas con efecto de mecha para superar cargas estáticas y dinámicas de esta magnitud.

## 55 Sumario de la invención

**[0008]** En vista de los antecedentes, es por lo tanto un objeto de la presente invención proporcionar un aparato con efecto de mecha que supere influencias externas como la fuerza de la gravedad, las fuerzas de inercia y la resistencia al flujo viscoso operando a una gran presión negativa. En pocas palabras, un aparato con efecto de mecha incluye una membrana de material compuesto del condensador que comprende una capa de sustrato, un extremo de entrada de vapor, un extremo de descarga de líquido, una pluralidad de cavidades dispuestas en la capa de sustrato que conectan de manera fluida el extremo de entrada de vapor al extremo de descarga de líquido, y un

material nanoporoso de relleno dispuesto dentro de la pluralidad de cavidades. El material nanoporoso de relleno tiene una primera pluralidad de poros abiertos con un diámetro máximo en el intervalo de 0,2 a 200 nanómetros. El aparato con efecto de mecha incluye además un conducto de líquido que tiene un primer extremo y un segundo extremo. El primer extremo del conducto de líquido está conectado de manera fluida al extremo de descarga de líquido de la membrana de material compuesto del condensador. El aparato con efecto de mecha incluye además una membrana de material compuesto del evaporador que comprende una capa de sustrato, un extremo de entrada de líquido, un extremo de descarga de vapor, una pluralidad de cavidades dispuestas en la capa de sustrato que conecta de manera fluida el extremo de entrada de líquido hasta el segundo extremo del conducto de líquido, y un material nanoporoso de relleno dispuesto dentro de la pluralidad de cavidades. El material nanoporoso de relleno tiene una segunda pluralidad de poros abiertos con un diámetro máximo en el intervalo de 0,2 a 200 nanómetros.

[0009] De acuerdo con la invención, el uso de una membrana de material compuesto por una mecha capilar incluye una capa de sustrato que tiene un extremo de líquido, un extremo de vapor y una pluralidad de cavidades que conectan de manera fluida el extremo líquido al extremo vapor para el funcionamiento de la mecha capilar a una presión hidrostática en la entrada de líquido de la mecha que es menor que la presión de vapor de saturación en la descarga de vapor de la mecha en al menos 0,10 bar (0,1 atmósferas), preferentemente en al menos 10 bar (10,1 atmósferas). Un material de relleno que tiene una pluralidad de poros abiertos está dispuesto dentro de la pluralidad de cavidades. Los poros tienen un diámetro máximo en el intervalo de 0,2 a 100 nanómetros.

[0010] De acuerdo con un uso adicional de la membrana de material compuesto, se proporciona un aparato con efecto de mecha en el que la capa de sustrato poroso comprende silicio poroso monocristalino.

[0011] De acuerdo con un uso adicional de la membrana de material compuesto, el material nanoporoso de relleno dispuesto dentro de las cavidades de al menos la membrana de material compuesto del evaporador comprende un gel molecular.

[0012] De acuerdo con un uso adicional de la membrana de material compuesto, el gel molecular dispuesto dentro de las cavidades de al menos la membrana de material compuesto del evaporador es un sol-gel, es decir, el material de relleno es un sol-gel.

[0013] De acuerdo con un uso adicional de la membrana de material compuesto, el gel molecular dispuesto dentro de las cavidades de al menos la membrana de material compuesto del evaporador es un hidrogel.

[0014] De acuerdo con un uso adicional de la membrana de material compuesto, el diámetro máximo de la pluralidad de poros está en el intervalo de 1 a 10 nanómetros.

[0015] Además, la invención comprende el uso de la membrana de material compuesto en una tubería de calor que comprende un condensador, un conducto de líquido que conecta de manera fluida el condensador a la membrana de material compuesto del evaporador, un conducto de vapor que conecta de manera fluida la membrana de material compuesto del evaporador al condensador, y un fluido de trabajo dentro del conducto de líquido, para mantener el fluido de trabajo en el conducto de líquido a una presión hidrostática a la entrada del líquido de la mecha que sea menor que la presión de vapor de saturación en la descarga de vapor de la mecha en al menos 0,10 bar (0,10 atmósferas), preferentemente en al menos 10 bares (10,1 atmósferas).

[0016] De acuerdo con un uso adicional de la membrana de material compuesto en una tubería de calor la membrana de material compuesto del condensador comprende una segunda pluralidad de poros abiertos que tienen un diámetro máximo en el intervalo de 0,2 a 100 nanómetros.

[0017] De acuerdo con un uso adicional de la membrana de material compuesto en una tubería de calor la primera pluralidad de poros abiertos tiene un diámetro máximo en el intervalo de 1 a 10 nanómetros.

[0018] De acuerdo con un uso adicional de la membrana de material compuesto en una tubería de calor el fluido es agua.

[0019] De acuerdo con un uso adicional de la membrana de material compuesto en una tubería de calor el conducto de líquido comprende además un bloque de vapor y un miembro de cuerpo poroso dispuesto adyacente al bloque de vapor, el bloque de vapor configurado para redirigir un flujo de fluido de trabajo a través del miembro de cuerpo poroso, teniendo el miembro de cuerpo poroso poros en el intervalo de 1 a 100 nanómetros.

### Breve descripción de los dibujos

[0020] Las características novedosas que son características de la realización preferida de la invención se exponen con particularidad en las reivindicaciones. La propia invención puede entenderse mejor, con respecto a su organización y procedimiento de operación, con referencia a la siguiente descripción adoptada en relación con los dibujos adjuntos en los que:

La FIG. 1A muestra una vista de la sección transversal simplificada de una tubería de calor;

La FIG. 1B es un gráfico del perfil de presión de la tubería de calor mostrada en la FIG. 1A;

La FIG. 2 muestra una vista esquemática desde arriba de un aparato con efecto de mecha de acuerdo con un uso de la invención;

La FIG. 3 muestra una vista de la sección transversal del aparato con efecto de mecha mostrado en la FIG. 2;

5 La FIG. 4 muestra una vista de la sección transversal en perspectiva de una membrana de material compuesto mostrada en la FIG. 3;

La FIG. 5 muestra una vista de la sección transversal en perspectiva de la alternativa de la membrana de material compuesto mostrada en la FIG. 3;

La FIG. 6 muestra una vista de la sección transversal en perspectiva de otra alternativa de la membrana de material compuesto mostrada en la FIG. 3;

10 La FIG. 7 muestra una vista de la sección transversal de una tubería de calor adecuada para el uso de la invención;

La FIG. 8 muestra una vista de la sección transversal de la membrana de material compuesto mostrada en la FIG. 3;

La FIG. 9 muestra una vista desde arriba del enrejado del bloque de vapor FIG. 8; y

La FIG. 10 muestra una vista desde arriba del conducto de líquido mostrado en la FIG. 2.

### Descripción detallada

15 **[0021]** Una tubería de calor convencional incluye una carcasa mecánicamente robusta formada de un material de alta conductividad térmica, un conducto de vapor a través del cual fluye el vapor desde el evaporador hasta el condensador, y una mecha a través de la cual el líquido retorna al evaporador. Varias restricciones de diseño se imponen a la mecha. En primer lugar, la mecha debe ser diseñada con baja resistencia hidráulica al flujo de líquido. En segundo lugar, la mecha debe tener la capacidad de generar grandes tensiones capilares en el líquido para impulsar el líquido desde el condensador hasta el evaporador. En tercer lugar, la mecha debe tener alta conductividad térmica para transportar calor de manera eficiente hasta la superficie de evaporación de la zona del evaporador.

25 **[0022]** Un enfoque de diseño para cumplir estos requisitos es construir la mecha a partir de un evaporador de membrana microporosa conectado a un conducto de líquido. El conducto, a su vez, está conectado a un depósito de líquido. En esta disposición, el fluido de trabajo es impulsado a través del conducto de líquido por acción capilar ya que el fluido de trabajo se evapora a través de los poros de la membrana. Una tubería de calor en bucle puede construirse a partir de esta disposición incluyendo además un conducto de vapor y un condensador. El conducto de vapor acopla el vapor del evaporador a la entrada del condensador, y el lado de líquido del condensador es conectado al conducto de líquido. Con relación a la FIG. 1A de los dibujos, se ilustra una representación simplificada de un aparato 1 con efecto de mecha que incluye membranas microporosas. El aparato 1 con efecto de mecha incluye dos membranas microporosas 2, 3 conectadas a un conducto 4 relleno de líquido. En este ejemplo simplificado, la primera membrana 2 microporosa actúa como evaporador y la segunda membrana 3 microporosa actúa como condensador. Un fluido 5 de trabajo tal como agua está dispuesto en el conducto 4. Una fuente 6 de calor conectada a la membrana 2 del evaporador hace que el fluido 5 de trabajo se evapore. Un disipador 7 de calor conectado a la membrana 3 del condensador condensa el fluido 5 de trabajo desde vapor de nuevo a líquido. El flujo del fluido 5 de trabajo a través del conducto 4 tiene la oposición de la resistencia hidráulica,  $R_{mecha}$ , y la aceleración,  $g$ .

35 **[0023]** La máxima presión capilar  $\Delta P_{cap}^{max}$  en las membranas microporosas 2, 3 es fijada por el diámetro de poro  $d_p^{max}$  de acuerdo con la ecuación de Young-Laplace:

$$\Delta P_{cap}^{max} = P_{vap} - P_{liq} = \frac{4\gamma \cos \theta_r}{d_p^{max}}, \quad (1)$$

40 donde  $P_{vap}$  y  $P_{liq}$  son las presiones del vapor por encima del poro y del líquido en el poro,  $\gamma$ [N/m] es la tensión superficial, y  $\theta_r$  es el ángulo de contacto de retroceso en el poro (una característica de la humectación).

45 **[0024]** La tasa de transferencia de calor  $q$  a través de la tubería 1 de calor puede expresarse como  $q = -q_{cond} = q_{evap}$  [W]. Haciendo caso omiso de la pérdida de calor, la conexión entre las tasas de transferencia de calor y de masa puede expresarse como:

$$q = \dot{M}\lambda = \left[ \frac{(P_{liq}^{cond} - P_{liq}^{evap}) - \rho_{liq}gL}{R_{mecha}} \right] \lambda, \quad (2)$$

5 donde  $\dot{M}$  [kg/s] es la tasa de flujo másico,  $\lambda$  [J/kg] es el calor latente de vaporización,  $P_{liq}^{cond}$  y  $P_{liq}^{evap}$  [Pa] son las presiones en el fluido 5 de trabajo en el condensador y en el evaporador,  $\rho_{liq}$  [kg/m<sup>3</sup>] es la densidad del líquido,  $g$  [m/s<sup>2</sup>] es la suma de la aceleración gravitacional y dinámica, y  $L$  [m] es la longitud del conducto 4. Resolviendo la ecuación 2 para  $P_{liq}^{evap}$ , el origen de la presión reducida en la fase líquida de la tubería 1 de calor se puede expresar como:

$$P_{liq}^{evap} = P_{liq}^{cond} - \left( \frac{R_{mecha} q}{\lambda} + \rho_l g L \right). \quad (3)$$

10 **[0025]** La Ecuación 3 predice que, como  $q$ ,  $g$ ,  $L$  o  $R_{mecha}$  crecen, la presión en la fase líquida dentro del evaporador caerá inevitablemente y, finalmente, llegará a ser negativa: una tubería de calor larga que funciona contra la gravedad y aceleraciones negativas tendrá que ser capaz de funcionar a presión negativa; los poros en el evaporador deben ser suficientemente pequeños para mantener esta condición ( $\Delta P_{cap}^{m\acute{a}x} \geq P_{vap}^{cond} - P_{vap}^{evap}$ ).

**[0026]** Resolviendo para  $P_{liq}^{cond}$ , la condición de equilibrio termodinámico local del fluido 5 de trabajo entre las fases líquida y vapor en la superficie del condensador da:

$$P_{liq}^{cond} = P_{vap}^{cond} + \frac{RT_{cond}}{\bar{v}} \ln \left[ \frac{P_{vap}^{cond}}{P_{sat}(T_{cond})} \right], \quad (4)$$

15 donde  $P_{vap}^{cond} \cong P_{vap}^{cond}$  [Pa] es la presión total en el vapor en la cavidad del condensador,  $R$  [J/mol °C] es la constante de los gases, y  $\bar{v}$  [m<sup>3</sup>/mol] es el volumen molar de fluido 5 de trabajo. La ecuación 4 predice que  $P_{liq}^{cond}$  llegará a ser negativa para incluso los grados más ligeros de subsaturación, debido a que  $RT/\bar{v} > 10^3$  bar (10<sup>3</sup> atmósferas) para agua a temperatura ambiente, y el término  $\ln(P_{vap}^{cond}/P_{sat}(T_{cond}))$  se vuelve negativo para un vapor subsaturado (la relación de las presiones de vapor es menor que 1).

20 **[0027]** La FIG. 1B ilustra la esperada distribución de la presión a lo largo de la longitud de la tubería de calor 1. La caída de presión desde el punto 1 al punto 2 en el gráfico representa el diferencial de presión a través de la membrana 3 del condensador; la caída de presión desde el punto 2 al punto 3 representa la caída de presión a través del conducto 4; y la caída de presión desde el punto 4 al punto 3 representa la presión diferencial a través de la membrana 2 del evaporador. Como puede verse con referencia al gráfico, se desarrolla una presión negativa en el fluido 5 de trabajo 5 dentro del conducto 4.

25 **[0028]** Los sistemas convencionales de tuberías de calor y los aparatos con efecto de mecha evitan típicamente que el fluido de trabajo funcione a presiones negativas debido al aumento de la probabilidad de cavitación, es decir, la formación espontánea de burbujas de vapor que puede ocurrir cuando la presión del líquido es menor que la presión de vapor. Un evento de cavitación puede desencadenarse por perturbaciones mecánicas, químicas o térmicas, o por impurezas presentes en el fluido de trabajo. Las burbujas de cavitación bloquean el flujo en el conducto de líquido, reduciendo de ese modo la cantidad de fluido disponible para la transferencia de calor por evaporación. La reducida transferencia de calor puede dar como resultado un sobrecalentamiento.

30 **[0029]** La condición de presión negativa en el extremo evaporador de la mecha se evita típicamente limitando la longitud y resistencia del conducto de líquido, evitando el funcionamiento contra la gravedad, y evitando el flujo de calor excesivamente alto y, por ello, el flujo de masa a través de la mecha.

35 **[0030]** La condición de presión negativa en el condensador se evita típicamente en las tuberías de calor convencionales cargando el sistema con un exceso de fluido, de manera que algo de líquido esté siempre presente en la cavidad de vapor y la saturación es garantizada en el condensador Muchos sistemas de tuberías de calor de la técnica anterior utilizan un depósito con este fin. Cargando el sistema se impide un estado conocido como "resecado" en el condensador. De esta manera, el término  $\ln(P_{vap}^{cond}/P_{sat}(T_{cond}))$  se hace cero (debido a que la

razón es igual a 1), y la presión del líquido en el condensador será igual a la presión del vapor en el condensador.

**[0031]** Se ha observado que el exceso de líquido en la entrada del condensador de tuberías de calor convencionales causa varios problemas. En primer lugar, la condensación prematura de líquido en el conducto de vapor puede impedir el flujo de vapor. En segundo lugar, la masa de líquido en el condensador presenta una resistencia añadida a la transferencia de calor entre el evaporador de calor y la superficie a la que se produce la condensación. En tercer lugar, en entornos muy dinámicos, el líquido en los canales de vapor podría plantear problemas adicionales si fueran impulsados por una fuerza de inercia de vuelta a la zona del evaporador.

**[0032]** Los autores de la invención de la presente invención han determinado que estos importantes problemas podrían ser eliminados por "baja carga" del sistema, es decir, disponiendo un sistema de manera que no exista líquido en la trayectoria del vapor. Los autores de la invención han observado que el funcionamiento en este régimen requiere que los poros en el evaporador y en el condensador sean lo suficientemente pequeños para generar presiones negativas en la fase líquida de la mecha, es decir,  $P_{liq}^{cond} = -RT_{cond} / \bar{v} \ln(\rho_{vap}^{cond} / \rho_{sat}) < 0$ , de manera que  $P_{vap}^{cond} / P_{sat} < 1$ . Con relación a la FIG. 1B, un condensador que funciona en un régimen subsaturado desplazaría el punto 1 en el gráfico a la izquierda, dando como resultado una mayor presión negativa. Incrementando la longitud de la mecha incrementaría más la presión negativa porque la fuerza de bombeo de la mecha debe superar la resistencia hidráulica adicional.

**[0033]** Los autores de la invención han reconocido, además, que el deseo de baja resistencia hidráulica al flujo de líquido y la capacidad de generar grandes tensiones capilares empujan el diseño estructural de la tubería de calor en direcciones opuestas, ya que menor resistencia hidráulica requiere poros más grandes mientras que elevar las tensiones máximas capilares requiere poros más pequeños. Dicho de otra manera, la resistencia hidráulica  $R_{mecha}$  de una mecha con poros convencional es proporcional a  $1/d_p^2$ , donde  $d_p$  es el diámetro de poro, y la máxima tensión capilar,  $\Delta P_{cap}^{max}$  es proporcional a  $1/d_p$ . En el diseño de tubería de calor más común, la mecha se forma mediante la sinterización de un polvo metálico para formar una estructura con poros de una sola escala. En ese diseño, la resistencia hidráulica y el rendimiento capilar no se pueden optimizar de forma simultánea. Para dar cabida a estos criterios de diseño divergentes, se han introducido diseños de mecha con conductos axiales a gran escala, conectados a poros a pequeña escala en el evaporador, pero hasta la fecha las dimensiones de los poros dentro de las mechas se han mantenido en un nivel macroscópico (por ejemplo,  $d_p \gg 1$  micrómetro). En consecuencia, la tensión capilar resultante  $\Delta P_{cap}^{max}$  se mantiene cerca de o por debajo de 1 bar (1 atmósfera). Esta limitación capilar ha limitado enormemente la dimensión, rendimiento y aplicaciones de las tuberías de calor.

**[0034]** Al ofrecer una solución a los problemas anteriormente reseñados, los autores de la invención han proporcionado una tubería de calor en la que el proceso de evaporación y de condensación se produce a una presión de vapor subsaturado. Además se proporciona una disposición de mecha que soporta grandes presiones negativas en la fase líquida, tanto en el evaporador como en el condensador. En algunas membranas de material compuesto, se ha mostrado una presión negativa por debajo de -71 bar (-70 atmósferas), permitiendo de ese modo longitudes de conducto del líquido mucho mayores.

**[0035]** Los autores de la invención han reconocido que los tamaños de poro en la disposición de la mecha requeridos para lograr las grandes presiones negativas pueden ser de un orden de magnitud más pequeño que las estructuras existentes en la técnica. Se evaluaron los materiales candidatos, y los autores de la invención llegaron a la conclusión de que los materiales que mejor funcionaban no proporcionaban suficiente resistencia para soportar las grandes presiones negativas contempladas por la presente invención. En algunos aspectos de la invención, entonces, se forma una estructura de material compuesto que comprende una columna estructural, cavidades en la columna y un material de relleno para rellenar las cavidades en la columna. El material de relleno puede ser elegido para proporcionar el tamaño de poro necesario requerido para lograr las grandes presiones negativas.

**[0036]** Con relación a la FIG. 2 de los dibujos, se muestra una vista superior de un ejemplo de aparato 10 con efecto de mecha. El aparato 10 con efecto de mecha incluye una membrana 12 de material compuesto del evaporador, una membrana 14 de material compuesto del condensador, y un conducto 16 de líquido. La vista desde arriba ilustra una estructura a modo de malla para la membrana 12 del evaporador y la membrana 14 del condensador que comprende un sustrato y relleno poroso a escala molecular para ayudar en las funciones respectivas de evaporación y de condensación, como se explicará en detalle a continuación.

**[0037]** Con relación a la FIG. 3 de los dibujos, el aparato 10 con efecto de mecha incluye una capa 18 de vidrio y una capa 20 de sustrato. La capa 18 de vidrio y la capa 20 de sustrato están unidas entre sí formando un sello hermético. La membrana 12 de material compuesto del evaporador incluye la capa 20 de sustrato, un extremo 22 de entrada de líquido, y un extremo 24 de descarga de vapor. El extremo 22 de entrada de líquido conecta de manera fluida el conducto 16 de líquido y la membrana 12 de material compuesto del evaporador, y se puede describir como la interfaz de líquido. La membrana 14 de material compuesto del condensador incluye la capa 20 de sustrato, un extremo 26 de entrada de vapor, y un extremo 28 de descarga de líquido, estando el extremo 28 de descarga de líquido conectado también al conducto 16 de líquido.

**[0038]** La capa 20 de sustrato proporciona la estructura primaria o columna del aparato 10 con efecto de mecha. En la utilización divulgada, la capa 20 de sustrato es silicio poroso monocristalino. El silicio poroso mantiene un alto módulo elástico a altas porosidades (por ejemplo, 28 GPa con un volumen de poros de 50%). El silicio también proporciona alta conductividad térmica ( $k_T \sim 100 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ ), lo cual es ventajoso para las funciones de transferencia de calor, tal como con una fuente de calor y un disipador de calor. El silicio también proporciona compatibilidad con las técnicas de microfabricación, incluida la integración en el sustrato de elementos sensores, tal como sensores de presión (no mostrados). Debido a que el silicio se presta a las técnicas de micro-fabricación, pueden obtenerse por grabado electroquímico características de diseño, tal como la porosidad controlada. Otros materiales de sustrato se contemplan sin apartarse del ámbito de la invención, tales como otros materiales semiconductores, metales, óxidos o materiales cerámicos. Sin embargo, puede que los materiales alternativos no optimicen los requisitos para el diseño global.

**[0039]** Cambiando a la FIG. 4 de los dibujos, se muestra una sección ampliada de la membrana 12 de material compuesto del evaporador de la FIG. 3. La membrana 12 del evaporador incluye una pluralidad de cavidades 30 que conectan de manera fluida el extremo 22 de entrada de líquido al extremo 24 de descarga de vapor. En esta membrana del evaporador, las cavidades 30 tienen un diámetro en el intervalo de 1 a 10 micrómetros, y se extienden rectas hasta la capa 20 de sustrato. Las cavidades 30 se pueden formar en la capa 20 de sustrato de silicio por grabado electroquímico de la capa de sustrato de silicio a través de una máscara estampada litográficamente, por ejemplo. Un ejemplo de procedimiento de fabricación incluye el grabado de las cavidades 30 del lado del líquido de la capa 20 de sustrato, que se corresponde con el fondo o lado inferior de la capa mostrada en la FIG.3. Como se muestra, el grabado se lleva a cabo a través de una parte (aproximadamente la mitad) del espesor de la capa de sustrato. A continuación, el material se retira del lado opuesto de la capa 20 de sustrato hasta que se produce la rotura con las cavidades 30. La membrana 12, 14 resultante puede tener un espesor en el intervalo de 100 a 500 micrómetros.

**[0040]** Un material 32 nanoporoso de relleno está dispuesto dentro de la pluralidad de cavidades 30. El material 32 de relleno incluye una pluralidad de poros 34 (no mostrados) abiertos de escala molecular que conectan de manera fluida el conducto 16 de líquido (FIG. 3) al extremo 24 de descarga del vapor. Los poros 34 están dimensionados para proporcionar una presión diferencial predeterminada a través de la membrana 12 del evaporador, de acuerdo con la Ecuación 1 anterior. Tal como se utiliza en el presente documento, el término "poro abierto" significa un paso abierto desde el lado del vapor al lado del líquido del sustrato. El paso abierto puede ser recto, tortuoso o ramificado.

**[0041]** En una realización, el material 32 de relleno comprende un gel molecular. Como se utiliza en el presente documento, un gel molecular es un sistema reticulado sustancialmente diluido que comprende una mezcla amorfa de una fase interconectada y un disolvente. La red reticulada tridimensional dentro del disolvente proporciona una ruta a escala molecular a través de la estructura del gel, en el presente documento referido como poros 34 abiertos. El diámetro de los poros 34 en los geles moleculares varía de 1 a 100 nanómetros. El gel molecular puede incluir tanto formas orgánicas como formas inorgánicas. En un ejemplo, una forma orgánica es un hidrogel. En otro ejemplo, una forma inorgánica es un sol-gel. Un ejemplo de un sol-gel que se adapta particularmente bien para su uso en la presente invención es un sol-gel de sílice amorfa que comprende un precursor de tetraetoxisilano y que tiene un tamaño de poro en el intervalo de 1 a 2 nanómetros. Con referencia a las ecuaciones anteriores, este material 32 de relleno puede proporcionar presiones negativas en el conducto 16 de líquido de menos que -101 bar (-100 atmósferas, -10 megapascuales). El sol-gel se puede formar a través de recubrimiento por centrifugado de las soluciones precursoras en las cavidades 30 grabadas. Alternativamente, el material compuesto que comprende silicio poroso y sol-gel de sílice se puede formar en las cavidades 30 depositando por goteo la solución pre-gel sobre la matriz porosa. Los reactivos quedarán absorbidos en las cavidades 30 antes del curado térmico en etanol.

**[0042]** En otras realizaciones, el material 32 de relleno puede comprender materiales nanoporosos, tales como zeolitas, materiales cerámicos y óxidos porosos tales como alúmina y sílice. El tamaño de los poros 34 en estos ejemplos puede variar de 0,2 nanómetros (para zeolitas) a 200 nanómetros (para silicio poroso). En un ejemplo, el material 32 de relleno es silicio poroso que tiene un diámetro medio de poro de aproximadamente 20 nanómetros. La presión negativa correspondiente en el conducto 16 de líquido puede ser menor que -0,1 bar (-0,1 atmósferas, -0,01 megapascuales), y en algunos ejemplos, puede ser menor que -10 bar (-10 atmósferas (-1,0 megapascuales).

**[0043]** Cambiando a la FIG. 5 de los dibujos, se muestra otra membrana 12 de material compuesto del evaporador en la que las cavidades 30 son los huecos intersticiales formados en la estructura reticular de la capa 20 de sustrato. Dicho de otra manera, las cavidades 30 ocupan la zona situada entre los átomos que corresponde a la esfera de máximo diámetro que puede caber en el espacio libre limitado por los átomos vecinos. El diámetro medio de los huecos intersticiales se puede calcular o determinar experimentalmente utilizando técnicas conocidas. Los huecos intersticiales se pueden formar en la estructura cristalina o en la estructura amorfa de silicio, por ejemplo. En el ejemplo de silicio monocristalino, los huecos intersticiales proporcionan una trayectoria del fluido que, aunque algo tortuosa, conectará de forma fluida un fluido de trabajo y el extremo 24 de descarga del vapor. Las cavidades 30 (huecos intersticiales) tienen un diámetro medio en el intervalo de 20 a 200 nanómetros.

**[0044]** Los autores de la invención han reconocido que los huecos intersticiales por sí mismos pueden desarrollar suficiente presión negativa en el conducto 16 de líquido para algunas aplicaciones, pero para lograr una presión negativa muy grande el material 32 de relleno puede estar dispuesto en los huecos intersticiales, como se muestra

en la FIG. 5.

**[0045]** Cambiando a la FIG. 6 de los dibujos, todavía se muestra otra membrana 12 de material compuesto del evaporador, en la que una membrana 36 molecular está dispuesta adyacente al material 32 de relleno para añadir una medida adicional de robustez. En un ejemplo, la membrana 36 molecular es una membrana de hidrogel dispuesta en el lado del vapor de la membrana 12 de material compuesto del evaporador. Los autores de la invención han determinado que la membrana 36 de hidrogel, al ser una mezcla de polímero y agua a escala molecular, es capaz de mediar en la generación de presiones negativas a través de un mecanismo a modo de ósmosis y proporciona una excelente capacidad de efecto mecha. En otro ejemplo, la membrana 36 molecular comprende una solución de monómero de acrilato (u oligómeros), un reticulante, un iniciador y un ligante acrilosilano. La solución de hidrogel puede ser fundida por centrifugado sobre la superficie externa del silicio poroso relleno con sol-gel, y después curada.

**[0046]** Con relación a la FIG. 7 de los dibujos, el aparato 10 con efecto de mecha se muestra adaptado para su uso como una tubería 200 de calor en bucle. Además de la membrana 12 de material compuesto del evaporador previamente divulgada, la membrana 14 de material compuesto del condensador, la capa 18 de vidrio, la capa 20 de sustrato, y el conducto 16 de líquido, la tubería 200 de calor incluye además una placa 38 de cobertura y un conducto 40 de vapor. La placa 38 de cobertura se puede retirar de la capa 20 de sustrato para el acceso a la membrana 12 de material compuesto del evaporador y a la membrana 14 de material compuesto del condensador, y puede ser sellada utilizando juntas tóricas 42a, 42b convencionales. El conducto 40 de vapor conecta de manera fluida la descarga de vapor de la membrana 12 de material compuesto del evaporador a la entrada de vapor de la membrana 14 de material compuesto del condensador. Una fuente 44 de calor próxima a la membrana 12 de material compuesto del evaporador proporciona la energía térmica para vaporizar un fluido 46 de trabajo dispuesto en el conducto 16 de líquido. La fuente 44 de calor puede ser cualquier fuente de calor para la que se desea controlar la temperatura, tal como el enfriamiento de un procesador de ordenador o la extracción de calor del borde de ataque de una aeronave hipersónica, por ejemplo. Un disipador 48 de calor próximo a la membrana 14 de material compuesto del condensador está adaptado para extraer energía térmica del condensador para hacer que el fluido 46 de trabajo se condense. El disipador 48 de calor puede ser aire del ambiente, aire del ambiente movido por un ventilador, aletas de refrigeración para irradiar calor, o refrigerante en circulación, por ejemplo.

**[0047]** En el ejemplo ilustrado, se prefiere la membrana 14 de material compuesto del condensador. Sin embargo, un condensador convencional puede sustituir la membrana 14 de material compuesto. Un ejemplo de un condensador convencional pueden ser los utilizados en la refrigeración de los circuitos electrónicos, en donde una zona expuesta a un disipador de calor incluye acanaladuras o canales de microfluidos. A medida que el vapor se condensa a líquido en la zona de condensador, el líquido puede ser absorbido por efecto mecha por acción capilar a través de las acanaladuras de vuelta a la membrana 12 de material compuesto del evaporador. De esta manera, el rendimiento de la tubería 200 de calor (o aparato 10 con efecto de mecha para este asunto) se degradaría debido a que el sistema no puede funcionar en un régimen de baja carga, pero el rendimiento puede ser suficiente para el fin previsto.

**[0048]** La capa 20 de sustrato define además la membrana 14 de material compuesto del condensador para conectar de forma fluida el extremo 26 de entrada de vapor, que puede definirse además por un rebaje en la placa 38 de cobertura, al conducto 16 de líquido. Aunque no sea un requisito, para un mejor rendimiento, la estructura y disposición de la membrana 14 del condensador puede ser idéntica a la membrana 12 del evaporador. Con relación a las Fig. 4-6, la membrana 14 del condensador puede incluir una pluralidad de cavidades 52 que conectan de manera fluida el extremo 26 de entrada de vapor al extremo 28 de descarga de líquido. Un material 54 nanoporoso de relleno que incluye una pluralidad de poros 50 abiertos (no mostrados) a escala molecular puede estar dispuesto dentro de las cavidades 52. Los poros 50 están dimensionados para proporcionar un presión diferencial predeterminada a través de la membrana 14 del condensador, de acuerdo con la Ecuación 1 anterior. Las cavidades 52 pueden tener un diámetro en el intervalo de 1 a 10 micrómetros. Alternativamente, las cavidades 52 pueden ser los huecos intersticiales formados en la estructura reticular de la capa 20 de sustrato, que tienen un diámetro medio en el intervalo de 20 a 200 nanómetros. El material 54 de relleno puede ser un gel molecular que tiene un tamaño de poro en el intervalo de 1 a 200 nanómetros, preferentemente de 1 a 2 nanómetros ya que este diámetro proporciona la mayor caída de presión a través de la membrana 14 del condensador. Para una robustez adicional, una membrana 56 molecular tal como una membrana de hidrogel puede estar dispuesta adyacente al material 54 de relleno. La membrana 56 molecular puede estar construida y dispuesta de la misma manera que se divulga con referencia a la membrana 12 de material compuesto del evaporador.

**[0049]** En algunas membranas de material compuesto la capa 20 de sustrato para la membrana 14 de material compuesto del condensador se ilustra como una sola pieza con la membrana 12 de material compuesto del evaporador. Sin embargo, en algunas circunstancias cuando el conducto 16 de líquido es mayor que 1 metro de longitud, la capa 20 de sustrato puede comprender una estructura separada en la membrana 14 de material compuesto del condensador. De hecho, la capa 20 de sustrato puede comprender una estructura totalmente diferente de la capa 20 de sustrato de la membrana 12 de material compuesto del evaporador. Por ejemplo, la capa 20 de sustrato de la membrana 12 de material compuesto del evaporador puede estar comprendida de silicio poroso monocristalino, y la capa 20 de sustrato de la membrana 14 de material compuesto del condensador puede estar compuesta de un material no poroso que tiene la pluralidad de cavidades 52 rellenas con el material 32 de relleno.

Se contemplan combinaciones adicionales sin apartarse del ámbito de la invención.

5 **[0050]** Con relación ahora a la FIG. 8 de los dibujos, el régimen de presión negativa grande dentro del cual el fluido 46 de trabajo funciona puede ser propenso a cavitación debido a perturbaciones mecánicas, químicas o térmicas en el sistema. Impurezas o burbujas preexistentes en el fluido de trabajo pueden también desencadenar un evento de cavitación. Un evento de cavitación se produce cuando se forma una burbuja de vapor en el líquido. Típicamente, la burbuja de vapor crece y se adhiere a una superficie del conducto de líquido, y es muy difícil de que se suelte. A menudo, la burbuja o burbujas de vapor obstruyen el flujo de líquido dentro del conducto. La disminución resultante en el caudal másico  $M$  provoca además una disminución de la tasa de transferencia de calor  $q$  a través de la tubería de calor (Ecuación 2). La pérdida de transferencia de calor puede provocar que la tubería 200 de calor se sobrecaliente y se reseque, dando como resultado un fallo total del sistema que está siendo enfriado.

15 **[0051]** Un bloque 58 de vapor o un retículo de bloques de vapor puede estar dispuesto de manera periódica en el conducto 16 de líquido, preferentemente debajo de la membrana 12 de material compuesto del evaporador, pero también debajo de la membrana 14 de material compuesto del condensador. El bloque 58 de vapor obstruye periódicamente el flujo de líquido del fluido 46 de trabajo y lo fuerza a que se redirija a través de un miembro de cuerpo 60 poroso. El miembro de cuerpo 60 poroso puede ser la membrana 12, 14 porosa de material compuesto, por ejemplo silicio monocristalino que tiene huecos intersticiales con un diámetro medio en el intervalo de 20 a 200 nanómetros. Alternativamente, el bloque 58 de vapor está comprendido por el miembro de cuerpo 60 poroso. En este caso, una parte del bloque 58 de vapor puede ser porosa, teniendo un diámetro de poro de la misma escala que los poros 34 en la membrana 12 de material compuesto del evaporador, por ejemplo 1 a 10 nanómetros.

20 **[0052]** Tal como lo indica la flecha etiquetada "A" en la FIG. 8, el fluido 46 de trabajo pasa típicamente a través del bloque 58 de vapor cuando es poroso. Si el bloque 58 de vapor es macizo, el fluido 46 de trabajo pasa a través del miembro de cuerpo 60 poroso, como se indica mediante la flecha etiquetada "B". También se muestra en la FIG. 8 una burbuja 62 de vapor que impide el flujo del fluido 46 de trabajo. La burbuja 62 de vapor está atrapada por y adherida al bloque 58 de vapor, aislándola de ese modo. El flujo del fluido 46 de trabajo se interrumpe localmente, pero puede redirigirse a través del miembro de cuerpo 60 poroso a fin de mantener el caudal másico total.

25 **[0053]** Cambiando ahora a la FIG. 9 de los dibujos, se muestra un entramado de miembros de cuerpo 60 porosos junto con la burbuja 62 de vapor. El flujo del fluido 46 de trabajo puede desviarse lateralmente alrededor del compartimiento de líquido en el que reside la burbuja 62 de vapor, como se indica mediante la flecha etiquetada "C". En el ejemplo ilustrado, el bloque 58 de vapor es también el miembro de cuerpo 60 poroso. De esta manera, la burbuja 62 de vapor es aislada en una sola cavidad de líquido, y se impide su expansión y el bloqueo adicional del flujo del fluido 46 de trabajo.

30 **[0054]** Con relación a la FIG. 10 de los dibujos, el conducto 16 de líquido puede incluir además el bloque 58 de vapor dispuesto en forma periódica dentro de la longitud central del conducto. El bloque 58 de vapor obstruye periódicamente el flujo de líquido del fluido 46 de trabajo y lo fuerza a que se redirija a través de un miembro de cuerpo 60 poroso, como se detalló anteriormente. En el ejemplo ilustrado, el bloque 58 de vapor está comprendido por el miembro de cuerpo 60 poroso que tiene un diámetro de poro de la misma escala que los poros 34 en la membrana 12 de material compuesto del evaporador, por ejemplo 1 a 10 nanómetros. El flujo del fluido 46 de trabajo se desvía lateralmente alrededor de la burbuja 62 de vapor, como se indica mediante las flechas etiquetadas "D". De esta manera, se mantiene el caudal másico total. Por supuesto, el flujo también se puede desviar verticalmente por encima del conducto de fluido 16 en la capa 20 de sustrato poroso, como se ilustra mejor en la FIG. 7.

35 **[0055]** Una pluralidad de bloques 58 de vapor puede estar dispuesta para crear una pluralidad de segmentos dentro del conducto 16 de líquido. Los segmentos pueden estar separados axialmente (en la dirección del flujo de líquido) por bloques 58 de vapor que soportan membranas nanoporosas (por ejemplo, el miembro de cuerpo 60 poroso) que sirven para aislar la burbuja 62 de vapor y detener su movimiento de tal manera que los segmentos adyacentes permanezcan rellenos con el líquido bajo tensión. Los segmentos pueden estar dispuestos además de una manera muy redundante e interconectados lateralmente (transversal a la dirección del flujo de líquido) mediante aberturas que están obstruidas por las mismas membranas nanoporosas (por ejemplo, el miembro de cuerpo 60 poroso). Estas aberturas pueden actuar tanto para bloquear el vapor en los segmentos cavitados como para derivaciones del flujo alrededor del bloque 58 de vapor.

40 **[0056]** Con relación ahora de nuevo a la FIG. 7, el conducto 16 de líquido conecta de manera fluida el extremo 28 de descarga del líquido del condensador al extremo 22 de entrada de líquido de la membrana 12 de material compuesto del evaporador. Aquí, el conducto 16 de líquido está grabado en la capa 18 de vidrio hasta una profundidad de 100 a 500 micrómetros utilizando técnicas convencionales tales como la fotolitografía.

45 **[0057]** La capa 18 de vidrio es transparente para la observación visual del fluido 46 de trabajo. Sin embargo, la capa 18 de vidrio puede ser cualquier material adecuado, tal como el mismo material que la capa 20 de sustrato. Como se ha indicado anteriormente, la capa 18 de vidrio y la capa 20 de sustrato están unidas entre sí formando un sello hermético. Un procedimiento para unir la capa 18 de vidrio a la capa 20 de sustrato es por unión anódica. Si la capa 18 de vidrio se compone de silicio, la capa 18 de vidrio puede unirse a la capa 20 de sustrato mediante unión térmica.

**[0058]** La placa 38 de cobertura puede estar fabricada de cualquier material adecuado para su uso en el entorno en el que va a funcionar. En el ejemplo descrito, la placa 38 de cobertura está fabricada de acero inoxidable. Sin embargo, se contemplan otros materiales tales como polímeros de alta resistencia.

5 **[0059]** Un elemento 64 de soporte puede estar dispuesto adyacente al lado del vapor de la membrana 12 del evaporador o de la membrana 14 del condensador. El elemento 64 de soporte puede soportar mecánicamente la membrana de material compuesto y proporcionar caminos de alta conductividad térmica. La conductividad térmica puede ser requerida cuando la fuente 30 de calor o el dissipador 48 de calor están dispuestos en el lado opuesto del mostrado en la FIG. 7. Puede requerirse el soporte estructural cuando la membrana 12, 14 de material compuesto es de tamaño macroscópico. A medida que el área de la superficie de la membrana 12, 14 aumenta, la fuerza total que actúa sobre la membrana debido a la presión negativa del fluido 46 de trabajo puede llegar a ser bastante grande y necesita soporte. Aunque el elemento 64 de soporte se ilustra en el lado del vapor de la membrana 12, 14, también puede estar dispuesto en el lado del líquido (no mostrado). El elemento 64 de soporte puede ser también el bloque 58 de vapor. Alternativamente, el elemento 64 de soporte es también el miembro de cuerpo 60 poroso. El elemento 64 de soporte puede estar fabricado a partir de la capa 20 de sustrato utilizando, por ejemplo, técnicas de grabado convencionales.

10 **[0060]** Como se indicó anteriormente, el conducto 40 de vapor conecta de manera fluida el extremo 24 de descarga de vapor de la membrana 12 de material compuesto del evaporador al extremo 26 de entrada de vapor de la membrana 14 de material compuesto del condensador. El conducto 40 de vapor se construye preferentemente de un material que reduzca al mínimo las pérdidas por transferencia de calor. El conducto 40 de vapor está construido de tuberías aisladas. Alternativamente, el conducto 40 de vapor está grabado en la capa 20 de sustrato, o mecanizado en la placa 38 de cobertura. Como una alternativa más, el conducto 40 de vapor está formando parte del conducto 16 de líquido. Por ejemplo, el conducto 16 de líquido puede tener forma triangular, con el líquido circulando por un ángulo (o los ángulos) del triángulo, y el vapor circulando por la zona central.

20 **[0061]** Una ventaja de la tubería de calor de la presente invención sobre los intercambiadores de calor convencionales es que la tubería de calor divulgada en el presente documento funciona de forma pasiva sin piezas móviles, tales como bombas, el propio gradiente de temperatura impulsa el cambio de fase y la transferencia de masa. El aparato 10 con efecto de mecha puede funcionar con pequeños volúmenes de fluido 46 de trabajo aprovechando el calor latente de vaporización. Un intercambiador de calor convencional que utiliza la eliminación del calor sensible puede requerir un volumen de líquido más de diez veces mayor.

25 **[0062]** Otra ventaja de la tubería de calor divulgada es que permite el funcionamiento por debajo de presiones negativas muy grandes, por ejemplo tan bajas como -101 bar (-100 atmósferas, -10,1 megapascuales). El funcionamiento en este régimen permitiría a una tubería de calor tener un conducto de líquido de 50 metros de longitud para evitar el resecado incluso cuando se somete a aceleraciones de  $10\text{ g}$  ( $\sim 10^2\text{ m/s}^2$ ) a lo largo de su eje mayor (o a lo largo de cualquier otro eje).

30 **[0063]** Una ventaja de la mecha divulgada es que puede funcionar en un régimen de baja carga. Como se utiliza en la presente memoria, "régimen de baja carga" significa que la fase de vapor del fluido de trabajo está subsaturada y la fase de líquida del fluido de trabajo tiene una presión hidrostática menor que la presión de vapor de saturación. Se espera que el régimen de baja carga produzca transiciones más rápidas debido a la masa térmica reducida del fluido de trabajo, a la mejorada transferencia de calor en el condensador debido a la ausencia de una capa de fluido en masa, y a la reducida resistencia a fluir del vapor debido a la ausencia de condensado en la ruta de vapor.

35 **[0064]** Otra ventaja de la tubería de calor divulgada es que los bloques de vapor y los miembros de cuerpo porosos en el conducto de líquido pueden aislar eventos de cavitación, tal que las burbujas de vapor no impidan de forma apreciable el flujo de fluido de trabajo.

40 **[0065]** Aunque la presente invención se ha descrito con referencia a un aparato adecuado para el uso reivindicado como se muestra en los dibujos adjuntos, se entenderá por los expertos en la técnica que la invención no se limita a los dibujos adjuntos. Modificaciones para el uso de la invención se pueden hacer dentro del ámbito de las reivindicaciones.

45 **[0066]** Una muestra de sistemas, procedimientos y aparato para el uso reivindicado se describe en el presente documento como sigue:

50 **[0067]** Un aparato con efecto mecha que comprende:

una membrana de material compuesto del condensador que comprende una capa de sustrato, un extremo de entrada de vapor, un extremo de descarga de líquido, una pluralidad de cavidades dispuestas en la capa de sustrato que conecta de manera fluida el extremo de entrada de vapor al extremo de descarga de líquido, y un material nanoporoso de relleno dispuesto dentro de la pluralidad de cavidades, teniendo el material nanoporoso de relleno una primera pluralidad de poros abiertos, teniendo la primera pluralidad de poros abiertos un diámetro máximo en el intervalo de 0,2 a 200 nanómetros;

un conducto de líquido que tiene un primer extremo y un segundo extremo, estando el primer extremo del conducto

de líquido conectado de forma fluida al extremo de descarga de líquido de la membrana de material compuesto del condensador; y

5 una membrana de material compuesto del evaporador que comprende una capa de sustrato, un extremo de entrada de líquido, un extremo de descarga de vapor, una pluralidad de cavidades dispuestas en la capa de sustrato que conecta de manera fluida el extremo de entrada de líquido al segundo extremo del conducto de líquido, y un material nanoporoso de relleno dispuesto dentro de la pluralidad de cavidades, teniendo el material nanoporoso de relleno una segunda pluralidad de poros abiertos, teniendo la segunda pluralidad de poros abiertos un diámetro máximo en el intervalo de 0,2 a 200 nanómetros.

10 **[0068]** El aparato con efecto de mecha del párrafo [0067] en el que la primera pluralidad de poros abiertos en la membrana de material compuesto del condensador y la segunda pluralidad de poros abiertos en la membrana de material compuesto del evaporador están dimensionadas para proporcionar un diferencial de presión predeterminado a través de la membrana de material compuesto respectiva.

**[0069]** El aparato con efecto de mecha del párrafo [0067] en el que al menos una de entre la capa de sustrato de la membrana del condensador y la capa de sustrato de la membrana del evaporador es porosa.

15 **[0070]** El aparato con efecto de mecha del párrafo [0069] en el que la capa de sustrato respectiva comprende silicio.

**[0071]** El aparato con efecto de mecha del párrafo [0069] en el que la pluralidad respectiva de cavidades son huecos intersticiales formados en la estructura reticular de la capa de sustrato, teniendo los huecos intersticiales un diámetro medio en el intervalo de 20 a 200 nanómetros.

20 **[0072]** El aparato con efecto de mecha del párrafo [0067] en el que al menos una de entre la primera pluralidad de poros abiertos y la segunda pluralidad de poros abiertos tiene un diámetro máximo en el intervalo de 1 a 10 nanómetros.

**[0073]** El aparato con efecto de mecha del párrafo [0067] en el que el material nanoporoso de relleno dispuesto dentro de las cavidades de al menos la membrana de material compuesto del evaporador comprende un gel molecular.

25 **[0074]** El aparato con efecto de mecha del párrafo [0073] en el que el gel molecular es un sol-gel.

**[0075]** El aparato con efecto de mecha del párrafo [0073] en el que el gel molecular es un hidrogel.

**[0076]** El aparato con efecto de mecha del párrafo [0067] que comprende además una membrana molecular dispuesta adyacente a la membrana de material compuesto del evaporador o a la membrana de material compuesto del condensador.

30 **[0077]** El aparato con efecto de mecha del párrafo [0076] en el que la membrana molecular es una membrana de hidrogel.

**[0078]** El aparato con efecto de mecha del párrafo [0067] en el que el conducto de líquido es mayor que 1 metro de longitud.

35 **[0079]** El aparato con efecto de mecha del párrafo [0067] en el que el conducto de líquido comprende un canal de 100 a 500 micrómetros de profundidad.

**[0080]** El aparato con efecto de mecha del párrafo [0067] en el que el conducto de líquido comprende además un bloque de vapor y un miembro de cuerpo poroso dispuesto adyacente al bloque de vapor, el bloque de vapor configurado para redirigir un flujo de fluido de trabajo a través del miembro de cuerpo poroso.

40 **[0081]** El aparato con efecto de mecha del párrafo [0080] en el que el miembro de cuerpo poroso tiene poros en el intervalo de 1 a 100 nanómetros.

**[0082]** El aparato con efecto de mecha del párrafo [0080] en el que una pluralidad de bloques de vapor están dispuestos para crear una pluralidad de segmentos dentro del conducto de líquido, los segmentos conectados de manera fluida en una dirección axial y en una dirección lateral mediante el miembro de cuerpo poroso.

45 **[0083]** En una tubería de calor que comprende un condensador, una membrana de material compuesto del evaporador, un conducto de líquido que conecta de manera fluida el condensador a la membrana de material compuesto del evaporador, y un conducto de vapor que conecta de manera fluida la membrana de material compuesto del evaporador al condensador, un procedimiento para hacer funcionar la tubería de calor que comprende las etapas de:

proporcionar una fuente de calor próxima a la membrana de material compuesto del evaporador;

50 proporcionar un disipador de calor próximo al condensador;

proporcionar una primera pluralidad de poros abiertos en la membrana de material compuesto del evaporador, teniendo los poros un diámetro máximo en el intervalo de 0,2 a 100 nanómetros;

proporcionar un fluido de trabajo dentro del conducto de líquido; y

mantener una presión del fluido de trabajo en el conducto de líquido a menos que -0,01 megapascales.

5 **[0084]** El procedimiento del párrafo [0083] que incluye además la etapa de hacer funcionar la tubería de calor en un régimen de baja carga.

**[0085]** El procedimiento del párrafo [083] en el que la presión del fluido de trabajo en el conducto de líquido se mantiene a menos que -1,0 megapascales.

10 **[0086]** El procedimiento del párrafo [0085] en el que la presión del fluido de trabajo en el conducto de líquido se mantiene a menos que -5,0 megapascales.

**[0087]** El procedimiento del párrafo [0083] en el que la membrana de material compuesto del evaporador comprende una capa de sustrato que tiene una pluralidad de cavidades, y un material de relleno dispuesto dentro de la pluralidad de cavidades, teniendo el material de relleno la primera pluralidad de poros abiertos.

**[0088]** El procedimiento del párrafo [0087] en el que el material de relleno es un gel molecular.

15 **[0089]** El procedimiento del párrafo [0087] en el que el gel molecular es un sol-gel.

**[0090]** El procedimiento del párrafo [0083] en el que un diámetro máximo de poro de la primera pluralidad de poros abiertos está en el intervalo de 1 a 10 nanómetros.

20 **[0091]** El procedimiento del párrafo [0083] en el que el condensador es una membrana de material compuesto del condensador, y el procedimiento incluye además la etapa de proporcionar una segunda pluralidad de poros abiertos en la membrana de material compuesto del condensador, teniendo la segunda pluralidad de poros abiertos un diámetro máximo en el intervalo de 0,2 a 100 nanómetros.

**[0092]** El procedimiento del párrafo [0091] en el que la membrana de material compuesto del condensador comprende una capa de sustrato que tiene una pluralidad de cavidades, y un material de relleno dispuesto dentro de la pluralidad de cavidades, teniendo el material de carga la segunda pluralidad de poros abiertos.

25 **[0093]** El procedimiento del párrafo [0092] en el que el material de relleno es un gel molecular.

**[0094]** El procedimiento del párrafo [0093] en el que el gel molecular es un sol-gel.

**[0095]** Una membrana de material compuesto para su uso en una mecha capilar, que comprende:

una capa de sustrato que tiene un extremo de líquido, un extremo de vapor, y una pluralidad de cavidades que conecta de manera fluida el extremo de líquido al extremo de vapor; y

30 un material de relleno dispuesto dentro de la pluralidad de cavidades, teniendo el material de relleno una pluralidad de poros abiertos, teniendo los poros un diámetro máximo en el intervalo de 0,2 a 100 nanómetros.

**[0096]** La membrana de material compuesto del párrafo [0095] en la que la capa de sustrato comprende un metal.

**[0097]** La membrana de material compuesto del párrafo [0095] en el que la capa de sustrato comprende un óxido.

35 **[0098]** La membrana de material compuesto del párrafo [0095] en el que la capa de sustrato comprende un material cerámico.

**REIVINDICACIONES**

1. Uso de una membrana (12) de material compuesto en una mecha (10) capilar, que comprende:
- 5 una capa (20) de sustrato que tiene un primer extremo (22, 26), adaptado para uso como una entrada de líquido de la mecha (10), un segundo extremo (24, 28), adaptado para uso como una descarga de vapor de la mecha (10), y una pluralidad de cavidades (30) que conectan de manera fluida la entrada de líquido con la descarga de vapor; y
- un material (32, 54) de relleno dispuesto dentro de la pluralidad de cavidades (30, 52), teniendo el material (32, 54) de relleno una pluralidad de poros abiertos (34, 50), teniendo los poros (34, 50) un diámetro máximo en el intervalo de 0,2 a 100 nanómetros, para
- 10 el funcionamiento de la mecha (10) capilar a una presión hidrostática en la entrada de líquido de la mecha (10) que es menor que la presión de vapor de saturación a la descarga de vapor de la mecha (10) en al menos 0,10 bar (0,10 atmósferas).
2. Uso según la reivindicación 1, caracterizado por que la mecha se hace funcionar a una presión hidrostática a la entrada de líquido de la mecha (10) que es menor que la presión de vapor de saturación en la descarga de vapor de la mecha (10) en al menos 10,1 bar (10 atmósferas).
- 15 3. Uso según la reivindicación 1, caracterizado por que el diámetro máximo de los poros (34, 50) está en el intervalo de 1 a 10 nanómetros.
4. Uso según la reivindicación 1, caracterizado por que el material (32, 54) de relleno es un gel molecular.
5. Uso según la reivindicación 4, caracterizado por que el gel molecular es orgánico.
6. Uso según la reivindicación 5, caracterizado por que el gel molecular orgánico es un hidrogel.
- 20 7. Uso según la reivindicación 6, caracterizado por que el material de relleno es inorgánico.
8. Uso según la reivindicación 7, caracterizado por que el material de relleno inorgánico es un sol-gel.
9. Uso según la reivindicación 8, caracterizado por que el sol-gel es un sol-gel de sílice.
10. Uso según la reivindicación 1, caracterizado por que comprende una membrana de gel molecular dispuesta adyacente al material (32, 54) de relleno.
- 25 11. Uso según la reivindicación 10, caracterizado por que la membrana de gel molecular es una membrana de hidrogel (36).
12. Uso según la reivindicación 11, caracterizado por que la membrana de gel molecular está dispuesta en el extremo de vapor de la mecha.
- 30 13. Uso según la reivindicación 1, caracterizado por que la pluralidad de cavidades comprende poros abiertos que tienen un diámetro en el intervalo de 20 nanómetros a 10 micrómetros.
14. Uso según la reivindicación 1, caracterizado por que la capa (20) de sustrato comprende un material semiconductor.
15. Uso según la reivindicación 4, caracterizado por que el material semiconductor es silicio poroso monocristalino.
- 35 16. Uso según la reivindicación 1, caracterizado por que la pluralidad de cavidades (30) comprende huecos intersticiales formados en la estructura reticular de la capa (20) de sustrato, teniendo los huecos intersticiales un diámetro medio en el intervalo de 20 a 200 nanómetros.
17. Uso de una tubería de calor, en donde una membrana de material compuesto se utiliza según la reivindicación 1, comprendiendo además la tubería de calor:
- un condensador;
- 40 un conducto (16) de líquido que conecta de manera fluida el condensador a la membrana (12) de material compuesto del evaporador;
- un conducto (40) de vapor que conecta de manera fluida la membrana (12) de material compuesto del evaporador al condensador; y
- un fluido (5) de trabajo dentro del conducto (16) de líquido, para
- 45 mantener el fluido (5) de trabajo en el conducto (16) de líquido a una presión hidrostática en la entrada de líquido de

la mecha (10) que es menor que la presión de vapor de saturación en la descarga de vapor de la mecha (10) en al menos 0,10 bar (0,10 atmósferas).

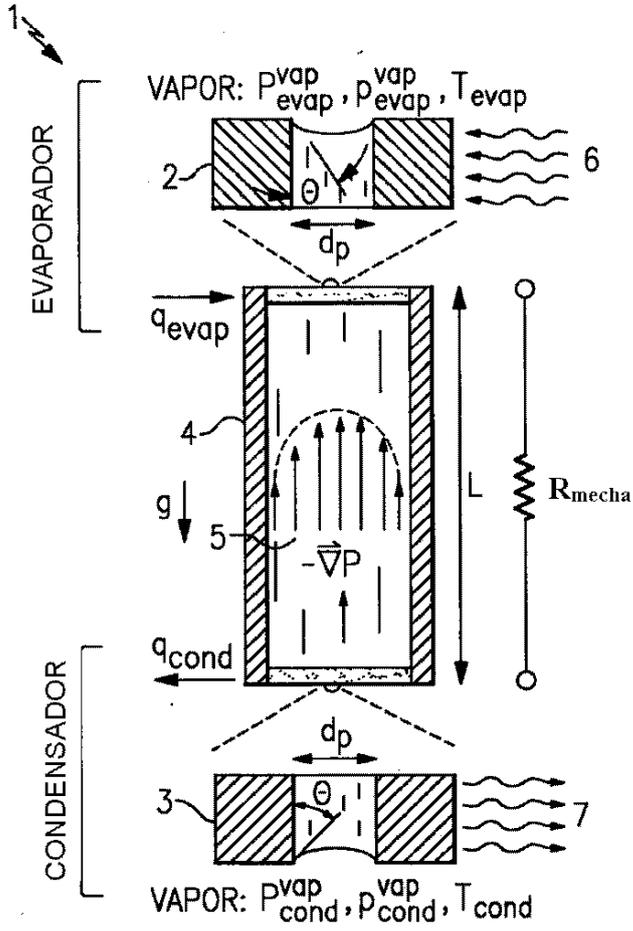
5 18. Uso según la reivindicación 17, caracterizado por que el fluido (5) de trabajo en el conducto (16) de líquido se mantiene a una presión hidrostática a la entrada de líquido de la mecha (10) que es menor que la presión de vapor de saturación en la descarga de vapor de la mecha (10) en al menos 10,1 bar (10 atmósferas).

19. Uso según la reivindicación 17, caracterizado por que el condensador es una membrana (14) de material compuesto del condensador que comprende una segunda pluralidad de poros abiertos (50) que tiene un diámetro máximo en el intervalo de 0,2 a 100 nanómetros.

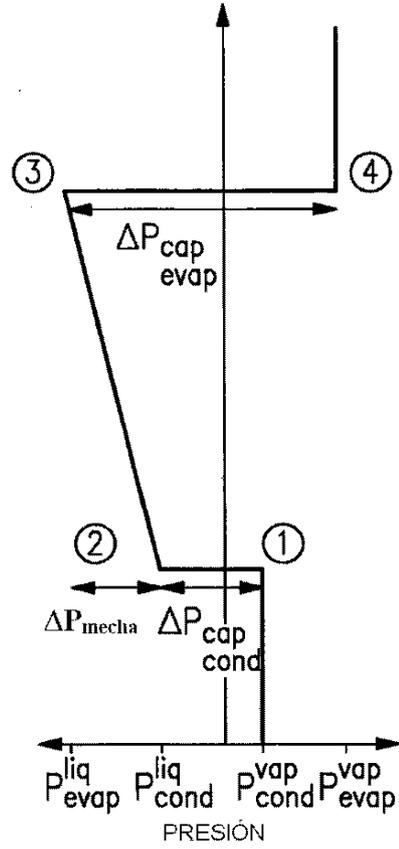
10 20. Uso según la reivindicación 17, caracterizado por que la primera pluralidad de poros abiertos (34) tiene un diámetro máximo en el intervalo de 1 a 10 nanómetros.

21. Uso según la reivindicación 17, caracterizado por que el fluido (5) de trabajo es agua.

15 22. Uso según la reivindicación 17, caracterizado por que el conducto (16) de líquido comprende además un bloque (58) de vapor y un miembro (60) de cuerpo poroso dispuesto adyacente al bloque (58) de vapor, configurado el bloque (58) de vapor para redirigir un flujo de fluido (5) de trabajo a través del miembro de cuerpo (60) poroso, teniendo el miembro de cuerpo (60) poroso poros (50) en el intervalo de 1 a 100 nanómetros.



**FIG.1A**



**FIG.1B**

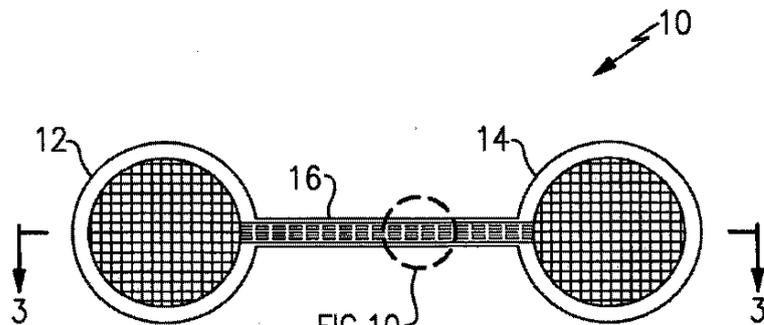
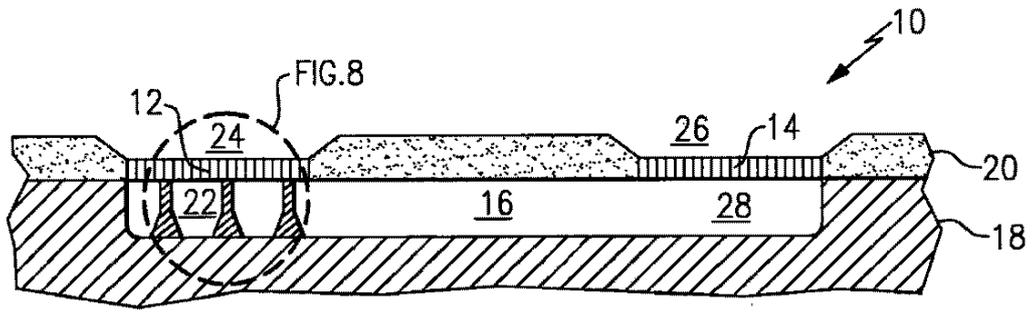
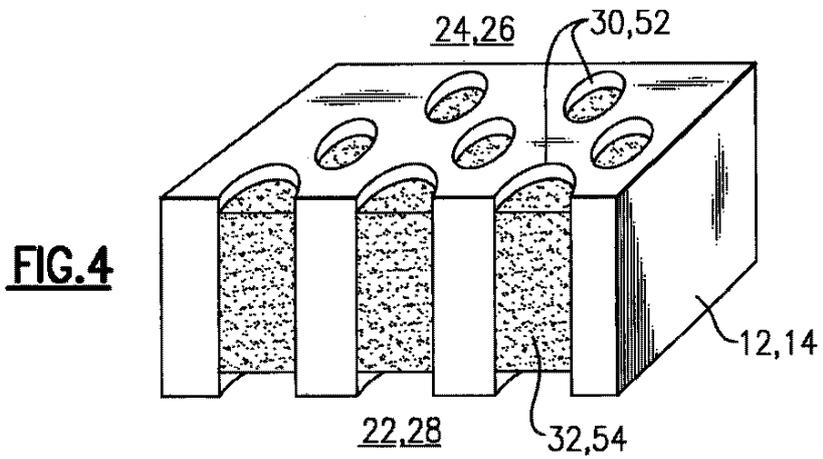


FIG.10

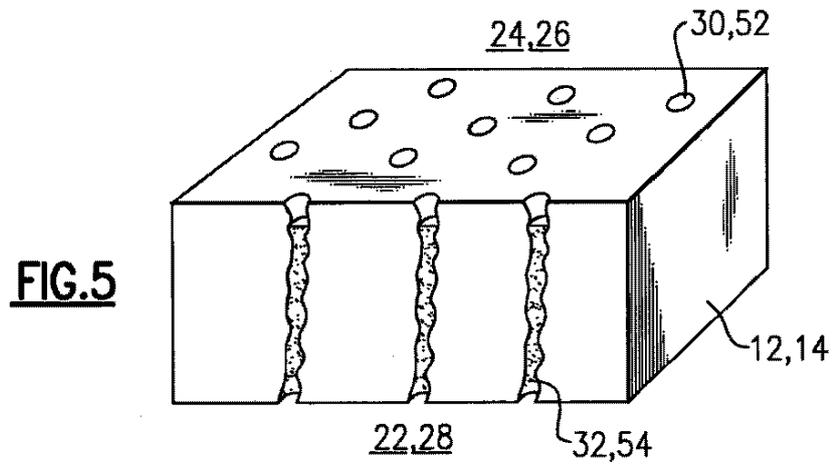
**FIG.2**



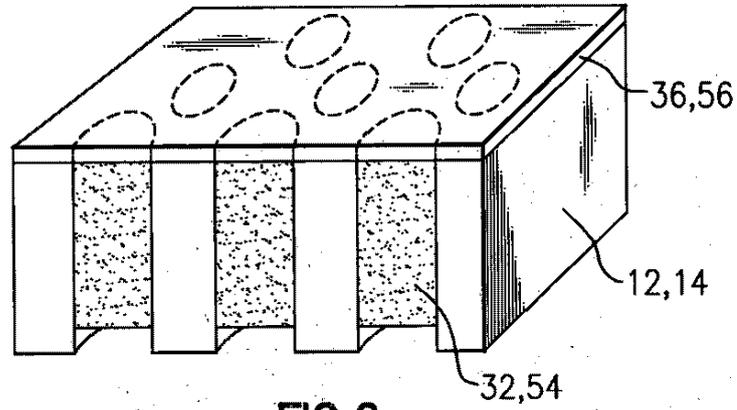
**FIG. 3**



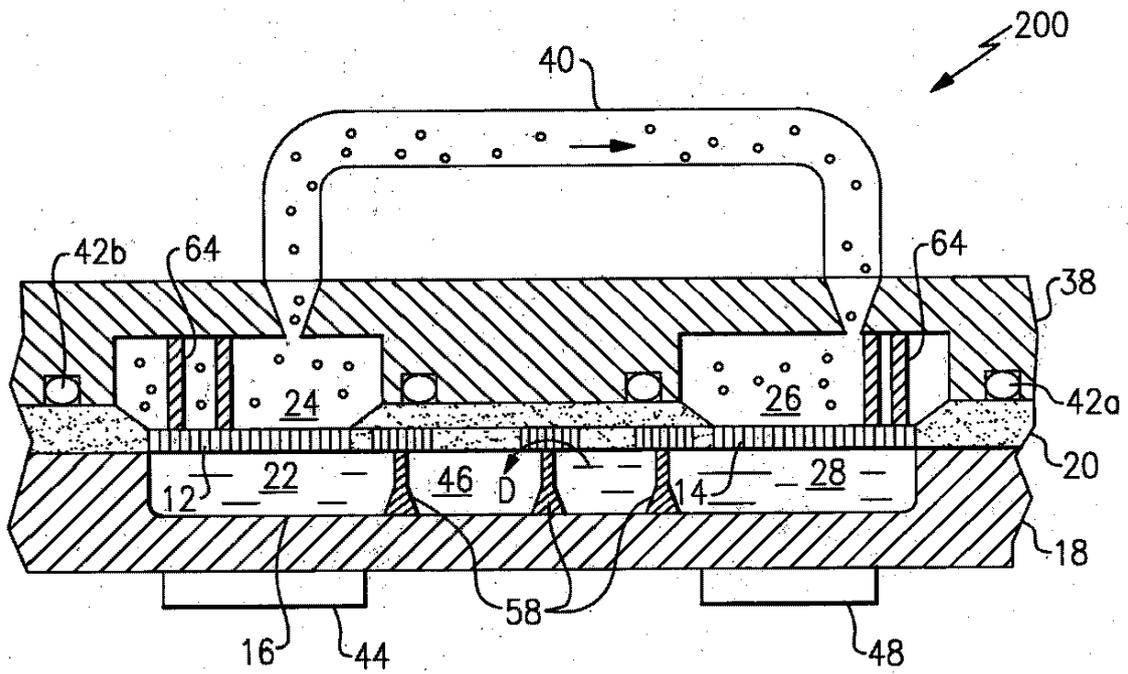
**FIG. 4**



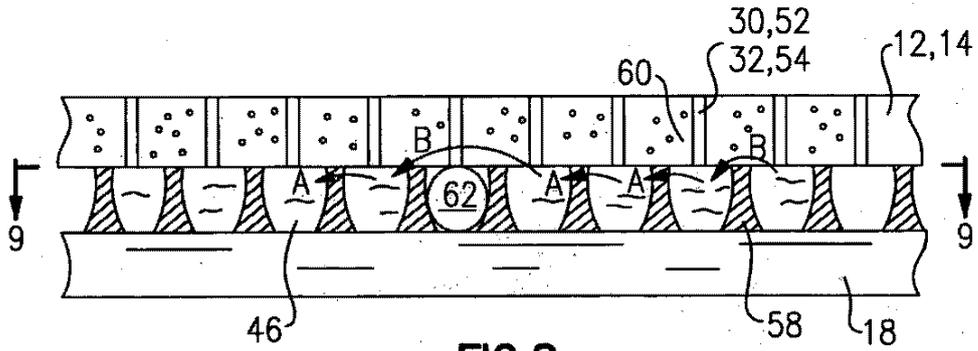
**FIG. 5**



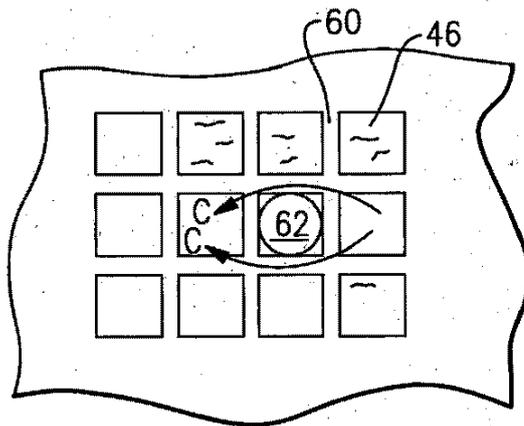
**FIG. 6**



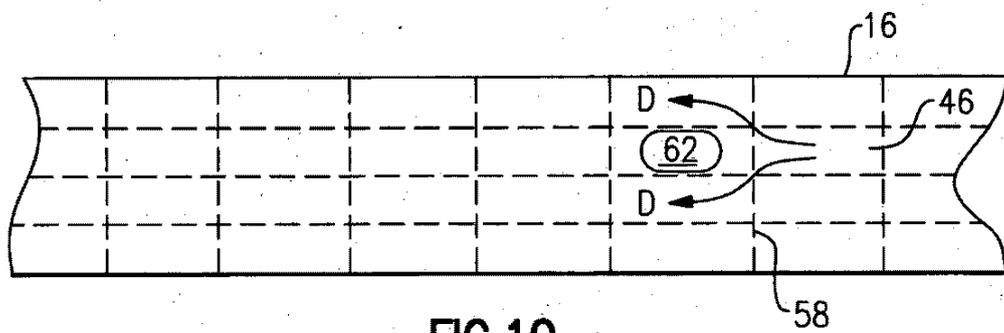
**FIG. 7**



**FIG. 8**



**FIG. 9**



**FIG. 10**