

OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

T3

1 Número de publicación: 2 789 581

51 Int. CI.:	
B01D 53/32	(2006.01)
B01D 53/00	(2006.01)
B01D 53/60	(2006.01)
F01N 3/08	(2006.01)
B01D 53/02	(2006.01)
B01D 53/92	(2006.01)

(12)

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacion	al: 03.10.2016)16 I	PCT/GB2016/053075	
87) Fecha y número de publicación internacional:	06.04.	2017	WO170	55881	
96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea:	03.10.	2016	E 1677	7789 (5)	
97 Fecha y número de publicación de la concesión europea:	08.04.	2020	EP 335	6018	

54 Título: Aparato y método para lavado por irradiación de electrones

30 Prioridad:

02.10.2015 GB 201517477

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente: 26.10.2020

73 Titular/es:	
----------------	--

DAPHNE TECHNOLOGY SA (100.0%) Chemin de la Venoge 7 1025 Saint-Sulpice VD, CH

(2) Inventor/es: MICHAN, JUAN MARIO

(74) Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

Aviso:En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Aparato y método para lavado por irradiación de electrones

5

10

La presente descripción está relacionada con métodos de lavado de gas por exposición a electrones y aparatos para ello. Puede encontrar aplicación particular en, por ejemplo, el lavado de gases de combustión. Estos métodos y aparatos se podrían usar, por ejemplo, para reducir emisiones perjudiciales creadas por el quemado de combustibles fósiles, p. ej. para impulsar barcos.

Existen requisitos crecientes de emisiones reducidas y "más limpias", es decir, menos perjudiciales, procedentes del uso de combustibles fósiles y otros procesos. Es deseable reducir la emisión de contaminantes que pueden contribuir al cambio climático y/o a dañar el medio ambiente de otras maneras, p. ej. por perjuicio a la salud humana, animal o vegetal y/o daños a estructuras naturales o artificiales, por ejemplo mediante la creación de lluvia ácida.

- En consecuencia, los gobiernos y las organizaciones intergubernamentales están implementando límites legales sobre las emisiones de ciertos contaminantes. Por ejemplo, en octubre de 2008, la Organización Marítima Internacional (OMI) (una agencia de las Naciones Unidas a cargo de la protección y seguridad marítima y la prevención de la
- contaminación marina) adoptó nuevas normas para controlar las emisiones de escape procedentes de los barcos. El 15 nuevo programa requiere que los barcos controlen las emisiones manteniéndolas en todo momento dentro de los límites estándar mundiales de óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno en aguas internacionales. Además, también existen áreas de control de emisiones de azufre (SECA o ECA) dentro de una distancia a tierra de aproximadamente 200 millas náuticas en la que los barcos están obligados a cumplir con límites más estrictos. Los Estados Unidos de América y Canadá presentaron una solicitud conjunta para una ECA a lo largo de todas sus costas, que fue aceptada
- 20 en marzo de 2010. También hay ECAs en el Mar Báltico y se espera que la Unión Europea sea la siguiente, designando más ECAs. Las nuevas regulaciones requieren que los barcos reduzcan la emisión de óxidos de azufre en un 85% y de óxidos de nitrógeno en un 80% para 2015 en las ECAs, y para 2020 (o 2025 sujeto a una revisión) internacionalmente y en todo momento en el mar.
- La solución actualmente preferida para cumplir con estas regulaciones es una combinación de tecnología de reducción 25 catalítica selectiva ("lavador") para reducir los óxidos de nitrógeno y de cambio a combustible con bajo contenido de azufre para reducir los óxidos de azufre. Esta solución requiere algunas modificaciones (estructurales y en el motor) de los barcos actuales, que generalmente están diseñados para funcionar de manera eficiente con combustible con alto contenido de azufre (el combustible más rentable disponible). Las tecnologías de lavador a menudo implican también el uso de catalizadores, lo que puede ser caro y requiere el reemplazo del catalizador cuando se usan.
- 30 La tecnología de lavado utilizada más habitualmente en barcos implica rociar líquido de lavado por encima de los gases de escape en una torre o chimenea de lavado. El líquido de lavado es generalmente una mezcla de agua dulce con sosa cáustica. Sin embargo, el almacenamiento de agua dulce en los barcos (en particular en los cruceros) a menudo es limitado y es necesario reservar mucha para el consumo y lavado de la tripulación, los pasajeros y el equipo de cocina. La desalinización a bordo a menudo no es factible debido al coste y a la cantidad de espacio ocupado
- 35 por el equipo. Además, una vez utilizado, el líquido de lavado debe almacenarse para su tratamiento en una planta de efluentes situada en tierra, o debe llevarse a bordo un equipo de rotura de la emulsión para tratar el líquido de lavado de modo que no sea perjudicial para la vida marina cuando se descarga por la borda. Generalmente existe un espacio limitado a bordo para tanques de almacenamiento o para equipos de rotura de la emulsión.

Una tecnología de lavador sin catalizadores utilizada para el tratamiento de emisiones de humos procedentes de 40 instalaciones de quemado de combustibles fósiles (p. ej., centrales eléctricas) y de incineradoras de quemado de residuos sólidos municipales es el tratamiento de gases de combustión por haz de electrones (EBFGT). El EBFGT elimina los óxidos de azufre y los óxidos de nitrógeno de los gases de la chimenea con bajo coste de energía mediante la conversión a sulfato-nitrato de amonio no nocivo, utilizable como fertilizante agrícola. Esta técnica implica que los gases de combustión humidificados pasen a través de un reactor de haz de electrones donde electrones de alta 45 energía bombardean el agua y el oxígeno para crear reactivos fuertes que reaccionan con los óxidos de azufre y con los óxidos de nitrógeno para formar ácidos sulfúrico y nítrico. Estos reaccionan con gas amoníaco inyectado para

formar sales de sulfato y nitrato de amoníaco.

El reactor de haz de electrones está formado por un banco de aceleradores del haz de electrones, específicamente pistolas de electrodos de tetrodo de doble rejilla en las cuales la carcasa del cátodo está contenida en una carcasa de 50 vacío. Se producen electrones libres en un entorno ultra limpio (denominado vacío ultra-alto) donde la presión es 12 órdenes de magnitud menor que la presión atmosférica. A continuación, los electrones se aceleran y se envían a través de una membrana de aluminio o de titanio que separa el entorno de vacío ultra-alto de la chimenea de evacuación de gases de combustión por donde están fluyendo los gases contaminantes. Los electrones que atraviesan la membrana de aluminio colisionan con las moléculas de gas e inician una reacción química en cadena que reduce

55 los contaminantes.

> Sin embargo, sólo una proporción muy baja de los electrones (alrededor de 1 en 19.000.000) consiguen pasar a través de la membrana metálica, por lo que el proceso es ineficiente. Además, las implementaciones de estos sistemas EBFGT requieren costes de capital muy grandes debido a la instalación del acelerador de electrones. Los aceleradores de electrones también requieren mantenimiento frecuente. Además, se deben implementar múltiples aceleradores con

fines de redundancia. La necesidad de un vacío ultra-alto en particular añade coste y puede contribuir a fallos del acelerador. La tecnología EBFGT no se ha utilizado a bordo de barcos debido a la complejidad del equipo acelerador de electrones.

El documento JP 2010194448 A describe un método para descomponer de manera eficiente los NOx contenidos en gases de escape a bajo coste. El método de tratamiento de los gases de escape se caracteriza por reducir y descomponer los NOx irradiando, con un haz de electrones, los gases de escape a presión atmosférica que comprenden gas nitrógeno como su componente principal y NOx.

El documento JP 2008200057 A describe un método de tratamiento de sustancias perjudiciales para el medio ambiente (dioxinas o NOx) con alta eficiencia energética sin producir subproductos perjudiciales. La sustancia perjudicial para

10 el medio ambiente se trata mediante decloración y reacción de reducción utilizando electrones emitidos por una fuente de electrones de nanotubos de carbono (CNT) y la aceleración de los mismos, y en consecuencia puede descomponerse y hacerse inofensiva sin necesidad de una temperatura alta en un proceso de tratamiento y sin producir sustancias perjudiciales.

De acuerdo con un primer aspecto, se proporciona un aparato de acuerdo con la reivindicación 1.

15 La nanoestructura podría tener una relación de aspecto de al menos 1000, opcionalmente al menos 5000, opcionalmente al menos 10.000.

La nanoestructura podría ser un nanocable, un nanotubo o un nanocuerno de carbono, silicio u óxido de titanio. La nanoestructura podría ser un nanotubo de carbono (CNT). Dicha nanoestructura podría ser un CNT de paredes múltiples (MWNT) o un CNT de pared simple metálica (SWNT metálico).

20 La nanoestructura está conectada eléctricamente al cátodo.

El aparato podría comprender además una fuente de electrones adicional configurada para hacer incidir electrones libres sobre el CNT para inducir emisión estimulada por efecto de campo de electrones desde el mismo. Dicha fuente de electrones adicional podría ser otra nanoestructura.

El aparato podría comprender además una conexión de suministro de energía eléctrica acoplada operativamente a la nanoestructura. Dicha conexión podría estar configurada para proporcionar un pulso de tensión a la nanoestructura.

El aparato podría comprender una matriz de nanoestructuras, una de las cuales es la citada nanoestructura, ubicada entre el ánodo y el cátodo y conectada eléctricamente al cátodo, estando configurada dicha matriz para emitir electrones por efecto de campo en respuesta a la presencia de un campo eléctrico entre el ánodo y el cátodo cuando se establece una diferencia de potencial entre ellos. La matriz podría consistir en: CNTs de paredes múltiples

- 30 (MWNTs); y/o CNTs de pared simple (SWNTs). La matriz podría comprender más SWNTs metálicos que SWNTs semiconductores. Las nanoestructuras adyacentes de la matriz podrían estar separadas por una distancia menor o igual que 400 nm. El aparato podría comprender además un substrato sobre el cual está conformada la matriz. Dicho substrato podría ser conductor de la electricidad. Dicho substrato podría estar comprendido en el cátodo o conectado eléctricamente al cátodo. Dicho substrato podría comprender uno o ambos de silicio y un metal. Dicho silicio podría
- 35 ser silicio conductor fuertemente dopado. Dicho silicio podría estar recubierto con aluminio al menos en un lado en el cual está conformada dicha matriz. Dicho metal podría comprender titanio, y/o una aleación de titanio, y/o aluminio, y/o una aleación de aluminio y/o de cobre, y/o una aleación de cobre. Dicho metal podría estar pulido.

El aparato podría comprender además un elemento de calentamiento diseñado para calentar la nanoestructura. Dicho elemento de calentamiento podría estar dispuesto en contacto térmico con un lado de dicho substrato inverso al lado en el que está presente la matriz de tal manera que el elemento de calentamiento pueda conducir calor a través del substrato hasta la matriz.

El aparato podría comprender además una fuente de alimentación controlada por corriente configurada para calentar dicho substrato mediante calentamiento óhmico. Dicha fuente de alimentación controlada por corriente podría estar conectada a tierra mediante el cátodo. El aparato podría comprender además una fuente de alimentación controlada por tensión configurada para proporcionar dicho pulso de tensión a dicha conexión. Dicha fuente de alimentación controlada a tierra mediante estar: conectada eléctricamente entre la conexión y el ánodo; y conectada a tierra

mediante el cátodo.

40

45

50

La nanoestructura podría estar al menos parcialmente recubierta con un material que tenga una función de trabajo de menos de 4 eV. Dicho material podría comprender cesio o hafnio. El material de recubrimiento podría tener un punto de fusión de al menos 400°C.

La nanoestructura podría estar al menos parcialmente recubierta con un recubrimiento catalítico. Dicho recubrimiento catalítico podría comprender uno o más de óxido de vanadio, óxido de zinc y trióxido de tungsteno. Dicho recubrimiento catalítico podría estar aplicado sobre un recubrimiento estabilizador tal como dióxido de titanio.

La matriz podría comprender una combinación de al menos dos de: una o más nanoestructuras no recubiertas, una o más nanoestructuras recubiertas al menos parcialmente con un material que tenga una función de trabajo de menos de 4 eV, y una o más nanoestructuras recubiertas al menos parcialmente con un recubrimiento catalítico.

La nanoestructura podría ser hueca, estando su interior al menos parcialmente relleno de un material rigidizador, comprendiendo el material rigidizador opcionalmente un metal de transición tal como titanio, hierro o cobre. El material rigidizador podría comprender un material que comprende el substrato, y opcionalmente carbono. El substrato podría comprender titanio y el material rigidizador podría comprender carburo de titanio.

La nanoestructura podría ser dopada con un material de mejora del transporte de electrones o de incremento de la conductividad eléctrica.

10 De acuerdo con un segundo aspecto, se proporciona un sistema para el lavado de gases de combustión por irradiación de electrones, comprendiendo dicho sistema múltiples aparatos de acuerdo con cualquier reivindicación precedente, configurados para estar dispuestos concéntricamente, apilados o agrupados en forma de matriz dentro de una cavidad de chimenea.

De acuerdo con un tercer aspecto, se proporciona un sistema de acuerdo con la reivindicación 7. Los substratos podrían estar dispuestos en un patrón de doble zigzag.

De acuerdo con un cuarto aspecto, se proporciona un método de lavado por irradiación de electrones de acuerdo con la reivindicación 8.

El método podría comprender además exponer el CNT a un electrón libre para inducir emisión estimulada por efecto de campo de electrones desde el CNT. Dicho electrón libre se podría emitir desde una fuente de electrones adicional mediante emisión por efecto de campo o emisión estimulada por efecto de campo, siendo dicha fuente de electrones adicional otra nanoestructura.

El método podría comprender además proporcionar un pulso de tensión a la nanoestructura. Dicho pulso podría tener una magnitud menor que una tensión de ruptura de dicho gas.

Dicha nanoestructura podría estar diseñada para generar el citado haz de electrones en un entorno a una presión absoluta de no menos de 80 kPa.

Dicho pulso de tensión podría tener una amplitud absoluta de 100 V a 5 kV. Dicho pulso de tensión podría tener una duración de 1 µs a 1 ms. Dicho pulso de tensión se podría repetir periódicamente. Dicha repetición se podría producir con una frecuencia de desde 100 Hz hasta 500 kHz. Dicha repetición de pulso podría conformar un tren de pulsos con un ciclo de trabajo de menos del 50%.

30 El método podría comprender además calentar la nanoestructura durante dicha emisión por efecto de campo. La nanoestructura se podría calentar hasta entre 200 y 1000°C, opcionalmente hasta entre 300 y 900°C, opcionalmente hasta entre 400 y 800°C, opcionalmente hasta entre 400 y 600°C.

El método podría comprender además: antes de exponer dicho gas a dichos electrones, mezclar el gas con amoníaco para formar una mezcla de gases; y después de exponer dicha mezcla de gases a los electrones, recoger un polvo producido de este modo.

Dicho gas podría comprender las emisiones de un barco.

20

35

De acuerdo con un quinto aspecto, se proporciona un barco de acuerdo con la reivindicación 9.

Se describirán ahora a modo de ejemplo aspectos de la presente invención con referencia a las figuras adjuntas (que no están dibujadas a escala). En las figuras:

40 La Figura 1A es un diagrama de flujo de un método de lavado;

La Figura 1B ilustra esquemáticamente el principio de una tecnología de lavado por irradiación de electrones;

La Figura 2 ilustra esquemáticamente una disposición de ejemplo a mayor escala mostrada en sección transversal vertical;

La Figura 2A muestra una sección transversal horizontal de una disposición de ejemplo de acuerdo con la Figura 2;

45 La Figura 2B muestra una sección transversal horizontal de otra disposición de ejemplo de acuerdo con la Figura 2;

La Figura 2C muestra una sección transversal horizontal de una disposición de ejemplo alternativa;

La Figura 3 ilustra esquemáticamente una disposición potencial escalonada de ejemplo;

La Figura 4A es una vista lateral de una matriz de CNTs tomada con un microscopio electrónico de barrido;

La Figura 4B es un diagrama de flujo de un método de fabricación de matriz CNT de ejemplo;

La Figura 5 ilustra esquemáticamente una disposición de calentamiento óhmico de ejemplo; y

La Figura 6 ilustra un aparato de lavado de ejemplo.

La siguiente descripción se presenta para permitir que cualquier persona experta en la técnica fabrique y use el 5 sistema, y se proporciona en el contexto de una aplicación particular. Diversas modificaciones a las realizaciones descritas serán fácilmente evidentes para los expertos en la técnica.

Se ha descubierto que los nanotubos de carbono (CNTs) son muy buenos emisores por efecto de campo de electrones cuando se exponen a un campo eléctrico. El proceso de emisión por efecto de campo implica la aplicación de grandes campos eléctricos a la superficie de un material. A un campo eléctrico suficientemente alto, la barrera de vacío se

- 10 reduce hasta el punto de que pueden escapar electrones de la superficie del material mediante tunelación cuántica. Los CNTs pueden producir grandes cantidades de electrones a tensiones aplicadas relativamente bajas debido a su muy elevada relación de aspecto (típicamente de 50 a 200 nm de diámetro frente a de 1 a 2 mm de longitud, es decir, relación de aspecto de 5000 a 40.000) y su baja función de trabajo (típicamente alrededor de 4 eV). La elevada relación de aspecto provoca un gran incremento del campo en las puntas de los CNTs pudiéndose alcanzar varios V/µm a
- 15 bajas tensiones aplicadas. La intensidad de campo eléctrico mínima requerida para la emisión por efecto de campo desde un CNT es por lo general de alrededor de 30 V/µm. Esto se puede lograr variando uno o más de la longitud del CNT, el diámetro del CNT, la distancia entre el ánodo y el cátodo utilizados para crear el campo eléctrico y la tensión aplicada. Si se usa una matriz de CNTs, también se puede variar la densidad de la matriz para variar la intensidad del campo eléctrico, ya que los CNTs tienden a apantallarse entre sí.
- 20 Se ha desarrollado una técnica, a la que se hará referencia en esta memoria como emisión estimulada por efecto de campo de electrones, para incrementar aún más el número de electrones emitidos por los CNTs. Esta técnica implica la estimulación de los CNTs por impacto de electrones energéticos. Este proceso es similar al proceso de emisión secundaria de electrones en materiales en bruto en los que un electrón energético que incide en la superficie provoca que una gran cantidad de electrones unidos cercanos a la superficie (hasta a aproximadamente 10 nm de la superficie)
- 25 escapen del material.

35

La emisión estimulada por efecto de campo de electrones se mejora considerablemente en matrices de CNTs (se han demostrado ganancias de hasta 19000), en parte debido a su gran área superficial y baja densidad en comparación con un material en bruto tal como un metal. Un electrón energético que viaja a través de una matriz de nanotubos recorre una distancia más larga en comparación con una dispersión de electrones a través de un material en bruto debido a la densidad relativamente baja de la matriz y al número relativamente grande de superficies desde las cuales

30 puede dispersarse el electrón. Esta penetración más profunda conduce a la liberación de más electrones.

La emisión por efecto de campo de electrones y la emisión estimulada por efecto de campo de electrones son procesos muy eficientes en CNTs en vacío, pero se vuelven menos eficientes a presiones mayores. Por ejemplo, los gases de escape marinos están típicamente a una presión absoluta un poco por encima de la atmosférica, p. ej. 105 kPa, con fluctuaciones, p. ej. dentro de un rango de aproximadamente 87 kPa a 140 kPa. Esta reducción en la eficiencia de emisión se debe quizás a la reducción del campo eléctrico provocada por la alta densidad de partículas cargadas que se forma delante de las puntas libres de los CNTs. Una técnica que se puede utilizar para mantener la eficiencia instantánea de producción de electrones en nanotubos en entornos de alta presión (p. ej., a alrededor de la presión atmosférica, por ejemplo de 80 a 150 kPa) es aplicar una serie de pulsos de tensión a los CNTs.

- 40 Se propone en esta memoria usar electrones emitidos por efecto de campo por uno o más CNTs para lavar gases tales como emisiones de humos procedentes de motores de combustión, p. ej. en barcos y otros vehículos, centrales eléctricas e incineradores. De acuerdo con algunos aspectos de la descripción, se proporcionan una o más matrices de CNTs para este propósito. El aparato puede estar diseñado, como se describe más adelante, para provocar emisión de electrones desde los CNTs por efecto de campo y emisión estimulada por efecto de campo.
- 45 Esta tecnología de lavado sin catalizadores puede reducir potencialmente las emisiones de óxidos de azufre en un 99%, y las emisiones de óxidos de nitrógeno en un 85%, procedentes del escape de motores de barcos nuevos y reacondicionados, superando los requisitos de las regulaciones mencionadas anteriormente. En consecuencia, los operadores de barcos no necesitarían cambiar a un combustible de bajo contenido de azufre menos rentable para cumplir con las nuevas regulaciones. Esta tecnología también puede reducir otros contaminantes (aún no regulados 50 en la industria del transporte) como el cloruro de hidrógeno, el fluoruro de hidrógeno, los compuestos orgánicos volátiles y las dioxinas.
 - La Figura 1A es un diagrama de flujo de este método de lavado 100. En S110, un CNT se expone a un campo eléctrico, produciendo como resultado la emisión por efecto de campo de electrones desde el CNT. En S120, el gas a lavar se expone a esos electrones.
- 55 La Figura 1B ilustra esquemáticamente el principio de esta tecnología de lavado por irradiación de electrones. Un ánodo 110 está situado enfrente de un cátodo 120. Un CNT 130 está situado entre el ánodo y el cátodo, y opcionalmente puede estar conectado eléctricamente al cátodo. El CNT emite electrones (e⁻) por efecto de campo en

respuesta a la presencia de un campo eléctrico entre el ánodo y el cátodo cuando se establece una diferencia de potencial entre ellos. El CNT se acopla a una carcasa de algún tipo con el fin de ubicarlo en un contenedor 140 que contiene gas (g) a lavar de tal manera que un interior del contenedor se puede exponer a los electrones emitidos por efecto de campo.

5 Para una disposición compacta, el ánodo y/o el cátodo se pueden fijar al interior del contenedor (por ejemplo, a la chimenea) de tal manera que el CNT se extiende hacia el interior de la chimenea y los electrones atraviesan una sección transversal del mismo. Sin embargo, se podrían prever muchas otras disposiciones.

No es necesario que el cátodo y la carcasa sean ubicados conjuntamente.

20

45

La tasa de emisión del CNT se puede mejorar pulsando la tensión aplicada entre el ánodo y el cátodo y/o estimulando 10 el CNT con bombardeo energético de electrones/iones.

Puede ser más práctico, p. ej. en un entorno industrial, usar matrices de CNTs en lugar de CNTs individuales. También puede ser preferible proporcionar múltiples conjuntos de aparatos de ánodo-cátodo-CNT. La Figura 2 ilustra una disposición a mayor escala de este tipo mostrada en sección transversal a través de una chimenea. También se podrían prever disposiciones en las que se usan múltiples conjuntos de ánodo-cátodo-CNTs individuales, o en los que hay un único conjunto de ánodo-cátodo-matriz de CNTs. La Figura 2 muestra 6 matrices de CNTs como ejemplo

15 hay un único conjunto de ánodo-cátodo-matriz de CNTs. La Figura 2 muestra 6 matrices de CNTs como ejemple ilustrativo, pero se podrían usar otros números de matrices.

En la Figura 2, se proporcionan matrices 230 de CNTs sobre substratos conductores 220 que actúan como cátodos situados enfrente de ánodos 210. Todos los ánodos están conectados eléctricamente al terminal positivo de un suministro eléctrico 250, mientras que los cátodos están conectados eléctricamente a su terminal negativo. El gas de combustión (g) asciende entre los ánodos y los cátodos y, por lo tanto, está expuesto a los electrones emitidos por efecto de campo por las matrices de CNTs. La separación de cada matriz de CNTs de su ánodo correspondiente podría ser, por ejemplo, de aproximadamente 0,5 a 1 cm.

La tasa de emisión de electrones se puede incrementar si el suministro eléctrico 250 es una fuente controlada por tensión operada para enviar un pulso de tensión a los cátodos, estando los cátodos conectados eléctricamente a los CNTa. Este puede de tensión podría tener adequadamente una amplitud abacluta de deada 100 V hesta 5 kV por

- 25 CNTs. Este pulso de tensión podría tener adecuadamente una amplitud absoluta de desde 100 V hasta 5 kV, por ejemplo, 800 V funciona bien para mezclas de gases de presión absoluta de hasta aproximadamente una atmósfera. La tensión del pulso debería estar por debajo de la tensión de ruptura para la mezcla de gases (la tensión necesaria para provocar arco eléctrico). Esta tensión máxima se puede calcular utilizando la Ley de Paschen para la mezcla de gases y la presión específicas. El pulso podría tener una duración de desde 1 µs hasta 1 ms, por ejemplo 200 µs. Se
- 30 podría emplear una serie de pulsos de tensión. Se podría utilizar un tren de pulsos de tensión periódico, por ejemplo, con una frecuencia de desde 100 Hz hasta 500 kHz, p. ej. 1 kHz. De forma adecuada, se puede emplear un ciclo de trabajo de menos del 50%. Los parámetros de pulso óptimos dependen de la geometría del aparato, así como de la velocidad y la composición del gas.
- La Figura 2 muestra una sección transversal a través de una chimenea que puede corresponder a dos disposiciones de ánodos y cátodos como las mostradas en las Figuras 2A y 2B, las cuales muestran respectivamente secciones transversales horizontales de las dos disposiciones implementadas en chimeneas de sección transversal circular. Se podrían usar aparatos similares en chimeneas con secciones transversales de otras formas, por ejemplo, cuadradas o rectangulares. Aparte de donde se indique lo contrario con números de referencia, en las Figuras 2A y 2B las líneas de puntos indican ánodos y las líneas continuas indican disposiciones de matriz de cátodos.
- 40 De acuerdo con la disposición de la Figura 2A, dentro de la chimenea 240 están dispuestos concéntricamente (de fuera hacia adentro) un cátodo, un ánodo, una pareja de cátodos adosados y un ánodo central.

De acuerdo con la disposición de la Figura 2B, dentro de la chimenea 240 están dispuestos (de izquierda a derecha), en forma de placas sustancialmente planas, cátodo, ánodo, pareja de cátodos adosados, ánodo, pareja de cátodos adosados, ánodo, cátodo. Las placas podrían ser de diferentes anchuras para extenderse a través de toda la chimenea como se muestra. Esto maximiza el volumen de gas que pasa entre las placas. De forma alternativa, todas las placas podrían tener sustancialmente la misma anchura para mayor facilidad de fabricación.

En la Figura 2C se muestra una disposición ligeramente diferente. En este caso, la pared del contenedor es conductora (por ejemplo, metálica) y actúa como ánodo. Por ejemplo, podría estar en contacto eléctrico con los ánodos indicados por las líneas de puntos. De izquierda a derecha, los electrodos son, por lo tanto, ánodo de la pared del contenedor,

- 50 pareja de cátodos adosados, ánodo, pareja de cátodos adosados, ánodo de la pared del contenedor. Las paredes del contenedor, y opcionalmente los otros ánodos, podrían estar todos conectados a tierra, con los cátodos mantenidos a un potencial negativo. En este caso, se muestra un contenedor de sección transversal cuadrada, pero el principio de usar las paredes del contenedor como electrodos se podría aplicar a otras formas de sección transversal.
- 55 Ampliando la escala de los tipos de disposiciones mostrados en las Figuras 2 a 2C hasta tamaños típicos para un escape de barco, una chimenea de sección transversal de 1 m² podría tener, por ejemplo, parejas de matrices de

CNTs repetidas a través de la sección transversal con un paso de aproximadamente 2 cm. De esta forma el número de matrices necesarias sería del orden de 100.

Las disposiciones mostradas en las Figuras 2, 2A y 2B implican todas ellas parejas de cátodos adosados. Como se muestra en la Figura 2, cada cátodo de una pareja podría tener una conexión eléctrica independiente a la fuente de tensión 250. Se puede usar una única conexión eléctrica a cada pareja si los cátodos de cada pareja están conectados eléctricamente entre sí. De forma alternativa, en lugar de cada pareja de cátodos adosados, se podría usar un único cátodo con una matriz de CNTs ubicada a ambos lados de él.

Los ánodos podrían ser mallas metálicas. Si esto es así, algunos electrones emitidos por efecto de campo por la matriz más a la izquierda 230a, como se ilustra en la Figura 2, pueden pasar a través del ánodo 210ab y continuar hasta 10 provocar emisión estimulada por efecto de campo en la siguiente matriz 230b. Este efecto se incrementa si los potenciales de los cátodos están escalonados, es decir, el cátodo más a la izquierda 220a está al potencial más bajo, el siguiente cátodo 220b está a un potencial ligeramente mayor (pero todavía menor que el ánodo más a la izquierda 210ab). Este escalonamiento de potencial se podría lograr utilizando colocación de resistencias de valor nominal adecuado entre los electrodos (no mostradas).

- 15 Allí donde se hace referencia a ánodos y cátodos en la presente memoria, se hace referencia a dos electrodos enfrentados entre sí a través de un hueco de aire/gas sin ningún otro electrodo intermedio, en donde se define el ánodo como el electrodo al potencial más positivo de los dos. Por lo tanto, aunque en esta realización el segundo cátodo 220b está a un potencial mayor que el cátodo más a la izquierda 220a, todavía se hace referencia al segundo cátodo 220b como cátodo, no ánodo, dado que el ánodo 210ab, a un potencial mayor que ambos cátodos 220a y
- 20 220b, separa los dos cátodos.

5

25

Como ejemplo, el cátodo más a la izquierda 220a podría estar a -1,3 kV con relación al ánodo más a la izquierda 210ab, que está conectado a tierra, y el siguiente cátodo 220b podría estar a -1,0 kV. Un electrón procedente del cátodo más a la izquierda 220a tendrá 1,3 keV de energía en la malla anódica 210ab y sólo necesita 1 keV para alcanzar el siguiente cátodo 220b. Cuando choca con ese cátodo 220b, puede generar hasta 19.000 electrones. Este patrón escalonado se podría repetir a través de las tres celdas cátodo-ánodo-cátodo de la disposición.

De forma alternativa al uso de ánodos en forma de malla, se podría usar una disposición de potencial escalonado como la mostrada en la Figura 3. Las matrices de CNTs están dispuestas en una configuración de doble zigzag, estando ubicada cada matriz en un substrato que forma un electrodo a un potencial ligeramente mayor que el anterior. Esto se logra mediante la conexión de los electrodos en serie, alternando con resistencias. La matriz 330A emite

30 electrones por efecto de campo, algunos de los cuales inciden sobre la matriz 330B. Por consiguiente la matriz 330B emite electrones estimulada por efecto de campo, algunos de los cuales inciden sobre la matriz 330C y así sucesivamente en orden alfabético a lo largo de todo el camino hasta la matriz 330G como se indica mediante las flechas. (Es probable que algunos de los electrones emitidos por cada matriz también incidan sobre otras matrices además de sólo sobre aquella con el siguiente potencial más alto; el camino tomado por cada electrón libre dependerá 35 del campo eléctrico a través del cual viaje, generado por una combinación de todos los electrodos).

Antes de pasar a través del aparato ánodo-cátodo-CNT, el gas puede ser pretratado. Por ejemplo, puede pasar a través de un precipitador electrostático para eliminar material en forma de partículas. También se puede enfriar, por ejemplo usando un intercambiador de calor o pulverizando o atomizando agua fría u otro líquido o disolución a través de él.

- 40 Si se agrega amoníaco al gas antes de que sea irradiado, entonces la fragmentación de cualquier óxido de azufre u óxido de nitrógeno como resultado de la irradiación de electrones conduce a la formación de sales de sulfato de amonio y de nitrato de amonio, respectivamente. Estas sales se pueden usar en fertilizantes. Una manera eficiente de recogerlas es hacer pasar el gas irradiado a través de un precipitador húmedo, produciendo como resultado la precipitación de una disolución de sulfato nitrato de amonio, que se usa a continuación como spray de enfriamiento
- 45 para el pretratamiento del gas de combustión. El calor del gas de combustión evapora el agua de la disolución de sales, dejando que las sales sólidas caigan al interior de un colector de partículas. Sólo se necesita añadir un poco de agua para compensar las pérdidas en la chimenea; el resto se recicla de manera continua a través del bucle spraysecador-precipitador.

La Figura 4A es una vista lateral de una matriz de CNTs tomada con un microscopio electrónico de barrido. La longitud 50 de cada CNT es aproximadamente 2 mm. Una matriz como esta se puede fabricar de varias maneras. Se proporciona como Figura 4B un diagrama de flujo de un método 400 de ejemplo.

En S410, un material de substrato se preprocesa para lograr rugosidad superficial por debajo del nanómetro. Por ejemplo, si se usa silicio como substrato, se puede depositar sobre su superficie una capa intermedia de aluminio. Esta capa intermedia podría tener aproximadamente 10 nm de espesor. De forma alternativa, si se usa un substrato

55 metálico (p. ej., titanio, aluminio, cobre o aleaciones de los mismos), el paso S410 podría comprender pulir la superficie del metal. Este pulido podría implicar, por ejemplo, un proceso electrolítico. El substrato podría tener, por ejemplo, aproximadamente 0,5 mm de espesor.

En S420 se deposita un catalizador sobre el substrato. La capa de catalizador podría tener p. ej. aproximadamente 1 nm de espesor. El catalizador podría ser, por ejemplo, hierro, níquel o cobalto. El catalizador se podría depositar de acuerdo con un patrón predeterminado, p. ej. utilizando fotolitografía. Rasgos del patrón, p. ej. el paso y/o la geometría de una cuadrícula, podrían depender de la composición del gas para cuya limpieza se utilizará la matriz. De forma adecuada, el paso del patrón (el cual determina la separación de los CNTs en la matriz) podría ser menor o igual que el camino libre medio del gas, que podría ser típicamente de hasta alrededor de 400 nm.

5

45

En S430, el substrato preparado se coloca en un horno con una mezcla de un gas inerte, hidrógeno y un gas precursor de carbono (p. ej., C₂H₂, C₂H₄, CH₄ o C₄H₁₀). Por ejemplo, los gases del horno podrían consistir en 600 sccm (centímetros cúbicos estándar por minuto) de argón, 75 sccm de etileno y 600 sccm de hidrógeno.

10 En S440, se calienta el horno, produciendo como resultado la descomposición del gas precursor. Se produce nucleación en el catalizador para formar nanopartículas a partir de las cuales crecen los CNTs. El horno se podría calentar, por ejemplo, a alrededor de 650 a 800°C.

Los CNTs se pueden recubrir, total o parcialmente, p. ej. en sus extremos libres, con un recubrimiento de baja función de trabajo, por ejemplo, cesio o hafnio, para mejorar la tasa de emisión por efecto de campo.

15 De forma alternativa o adicional, los CNTs se podrían dopar con un material de mejora del transporte de electrones o de incremento de la conductividad eléctrica para mejorar la eficiencia de emisión por efecto de campo. Por ejemplo, el dopaje con nitrógeno provoca un comportamiento metálico en los CNTs semiconductores.

Típicamente, la fabricación de CNTs provoca como resultado la producción de una mezcla de CNTs de pared simple (SWNTs), que tienden a venir en una mezcla de tipos metálicos y semiconductores, y CNTs de paredes múltiples
(MWNTs). Dado que los MWNTs y los SWNTs metálicos son mejores conductores eléctricos que los SWNTs semiconductores, es preferible un proceso de fabricación que favorezca un alto porcentaje de uno de los tipos anteriores de CNTs o de ambos con respecto al anterior. (La emisión por efecto de campo en los SWNTs semiconductores sigue el mismo proceso físico que en los SWNTs metálicos, pero la conducción eléctrica a través del nanotubo no es tan eficiente, lo que puede conducir a carga y aumento de la barrera de vacío (o superficial), reduciendo
la eficiencia de emisión por efecto de campo. Sin embargo, puede ser posible mejorar la eficiencia excitando más el

25 la eficiencia de emisión por efecto de campo. Sin embargo, puede ser posible mejorar la eficiencia excitando más el sistema, por ejemplo, utilizando una tensión aplicada mayor y/o iluminando con un láser los CNTs).

Las matrices de CNTs pueden obstruirse con polvo cuando se dejan expuestas. Si las matrices están en contacto directo con gases de combustión, como se ilustra, también pueden obstruirse con cualesquiera partículas pequeñas que no sean eliminadas con éxito por el preacondicionamiento del gas. Si se añade amoníaco como se describió

- 30 anteriormente, entonces partículas de sal de sulfato nitrato de amonio también pueden recubrir las superficies de la matriz (siendo por lo general las partículas demasiado grandes para penetrar en las matrices y obstruirlas). Los CNTs también pueden resultar dañados por descargas y cortocircuitos que se pueden producir durante la operación debido a la ionización del gas. También se puede producir daño a los CNTs debido a colisiones con iones acelerados. Por todas estas razones, las prestaciones de emisión por efecto de campo de las matrices de CNTs en entornos de alta
- 35 presión (p. ej., a alrededor de la presión atmosférica, por ejemplo, de 80 a 150 kPa) tienden a disminuir con el tiempo. Todos estos problemas, que no se encontraron para los sistemas de emisión de CNTs anteriores con los CNTs en (o cerca de) vacío, se pueden resolver calentando las matrices, por ejemplo a alrededor de 600 a 800°C durante 1 a 3 horas en un gas inerte. Esto somete a recocido a los CNTs, reparando enlaces rotos y recuperando la forma original. El polvo superficial se quema y cualquier gas adsorbido se desorbe. Las matrices se podrían calentar durante el uso para seguir efectuando un recocido continuo y para reducir el coeficiente de adherencia para limitar los depósitos de
- 40 para seguir efectuando un recocido continuo y para reducir el coeficiente de adherencia para limitar los depósitos de partículas.

Este calentamiento se podría realizar mediante un elemento de calentamiento fijado a la parte posterior del substrato de la matriz. De forma alternativa, podría emplearse calentamiento óhmico del propio substrato. Una disposición de calentamiento óhmico de ejemplo se ilustra esquemáticamente en la Figura 5. Una fuente de alimentación controlada por corriente 560 se usa para calentar los substratos 520. La fuente de alimentación controlada por corriente y la fuente de alimentación controlada por tensión 550 podrían estar ambas conectadas a tierra a través de los substratos (cátodos).

Si se emplea un recubrimiento de baja función de trabajo, entonces se prefiere un recubrimiento que tenga un alto punto de fusión. Por ejemplo, recubrimientos con puntos de fusión por encima de 400°C serían adecuados, p. ej. recubrimientos que comprenden hafnio, el cual tiene un punto de fusión de 2231°C. Esto permite la auto-reparación de los CNT por calentamiento como se ha descrito anteriormente, y también garantiza que el recubrimiento permanezca intacto incluso cuando se expone a gases de escape calientes.

También se podrían emplear recubrimientos catalíticos para reducir los óxidos de nitrógeno existentes en el gas por medio del proceso de reducción catalítica selectiva (SCR). La estructura de la matriz de nanotubos significa que una gran área superficial del recubrimiento catalítico está expuesta al gas, conduciendo a una SCR eficiente. Se podría utilizar un sistema que combine CNTs desnudos, y/o CNTs con un recubrimiento de baja función de trabajo, y/o CNTs con un recubrimiento catalítico, para lograr unas prestaciones óptimas al lograr un equilibrio entre la generación de electrones y la eficiencia del proceso de SCR.

Materiales de recubrimiento catalítico de ejemplo incluyen óxido de vanadio (V₂O₅), óxido de zinc (ZnO) y trióxido de tungsteno (WO₃). Estos materiales pueden, por ejemplo, ser aplicados como recubrimiento directamente sobre los CNTs, o por encima de un recubrimiento de dióxido de titanio (TiO₂). Se sabe que el dióxido de titanio proporciona fuerte soporte mecánico y estabilidad térmica a los catalizadores. También se podrían usar otras combinaciones de tales catalizadores. Por ejemplo V₂O₅-WO₃/TiO₂. Para implementar esto, se podría evaporar en primer lugar TiO₂ sobre los nanotubos y a continuación se podrían depositar V₂O₅ y WO₃.

Los nanotubos se podrían rellenar total o parcialmente con un material rigidizador para hacerlos más rígidos y/o para que se unan más fuertemente a la superficie del substrato. Esto los hace más resistentes al daño. Por ejemplo, se podría usar un relleno de metal de transición como titanio, hierro o cobre. De forma adecuada, el material de relleno puede ser el material del substrato y/o una combinación del material del substrato y carbono (p. ej., un carburo del material del substrato). Los nanotubos unidos a un substrato de titanio se podrían rellenar con carburo de titanio para

10 puede ser el material del substrato y/o una combinación del material del substrato y carbono (p. ej., un carburo del material del substrato). Los nanotubos unidos a un substrato de titanio se podrían rellenar con carburo de titanio para producir nanotubos muy bien unidos.

5

35

Como alternativa a los CNTs, o adicionalmente para el mismo propósito, se podrían usar otros tipos de nanoestructura que emiten electrones por efecto de campo, tales como nanocuernos de carbono, nanocables de silicio, nanotubos de dióxido de titanio o nanocables de dióxido de titanio. Las nanoestructuras de elevada relación de aspecto proporcionan

- 15 dióxido de titanio o nanocables de dióxido de titanio. Las nanoestructuras de elevada relación de aspecto proporcionan una emisión por efecto de campo más eficiente, por ejemplo, se podrían usar nanoestructuras con una relación de aspecto de al menos 1000. Una ventaja de usar nanocables es que se pueden fabricar fácilmente a escala industrial grandes matrices de nanocables alineados verticalmente. Estos ejemplos no emiten por efecto de campo de manera tan eficiente como los CNTs, pero su emisión por efecto de campo se podría mejorar recubriéndolos con materiales
- 20 de baja función de trabajo como se describió anteriormente. De forma alternativa o adicional, la emisión por efecto de campo se podría hacer más eficiente mediante dopado con materiales que mejoran el transporte de electrones o que incrementan la conductividad eléctrica. Por ejemplo, se podrían usar átomos del Grupo III (aceptor) o del Grupo V (donor) (p. ej., fósforo o boro) en nanoestructuras de silicio.
- Si se usa dióxido de titanio, ya sea para conformar las nanoestructuras o para recubrirlas, la temperatura de las nanoestructuras (ya sea como resultado de la exposición al gas de escape caliente o de calentamiento deliberado para auto-reparación como se describió anteriormente) se debería mantener por debajo de 600ºC. Por encima de esta temperatura, el dióxido de titanio cambia de estructura de anatasa a estructura de rutilo.

La Figura 6 ilustra esquemáticamente una disposición 600 de ejemplo del tipo de aparato descrito anteriormente en una chimenea. Las pilas 610 de matrices de CNTs se alternan con precipitadores/colectores 620 de partículas a lo largo del camino del flujo de gas g. Podría haber, por ejemplo, cuatro pilas de matrices de CNTs que se alternen con cuatro precipitadores/colectores de partículas. Las partículas p se dirigen fuera de la chimenea hacia unas tolvas.

Las matrices de CNTs podrían estar conformadas, por ejemplo, en placas de 1 m de ancho y 0,2 m de alto. Estas podrían estar separadas verticalmente p. ej. por 0,3 m. En el ejemplo de módulo cuádruple mostrado, la altura total del aparato 600 sería, por lo tanto, de 2 m. Cada pila 610 de matrices de CNTs podría comprender, por ejemplo, 50 parejas de matrices de CNTs, p. ej. dispuestas como se muestra en la Figura 2C con 49 parejas adosadas, más una única matriz en cada uno de los bordes izquierdo y derecho.

Otras realizaciones serán evidentes para los expertos en la técnica a partir de la consideración de la especificación y la puesta en práctica de las realizaciones descritas en la presente memoria. Se pretende que la especificación y los ejemplos se consideren sólo ejemplares.

- 40 Además, allí donde esta solicitud ha enumerado los pasos de un método o procedimiento en un orden específico, podría ser posible, o incluso conveniente en ciertas circunstancias, cambiar el orden en el que se realizan algunos pasos, y se pretende que los pasos particulares de las reivindicaciones del método o del procedimiento descritas en la presente memoria no se interpreten como específicos del orden a menos que dicha especificidad del orden se indique expresamente en la reivindicación. Es decir, las operaciones/etapas se pueden realizar en cualquier orden, a menos que se especifique lo contrario, y las realizaciones pueden incluir más o menos operaciones/pasos que los
- descritos en esta memoria. Se contempla además que la ejecución o realización de una operación/paso particular antes de, simultáneamente a, o después de, otra operación está en conformidad con las realizaciones descritas.

REIVINDICACIONES

1. Aparato para lavado por irradiación de electrones, comprendiendo dicho aparato:

un ánodo (210);

un cátodo (220);

30

45

5 una nanoestructura ubicada entre dicho ánodo y dicho cátodo, estando dicha nanoestructura conectada eléctricamente al cátodo y configurada para emitir electrones por efecto de campo en respuesta a la presencia de un campo eléctrico entre el ánodo y el cátodo cuando se establece una diferencia de potencial entre ellos; y

una carcasa acoplada a dicha nanoestructura y configurada para ubicar la nanoestructura de modo que la nanoestructura se extiende hacia el interior de un contenedor que contiene gas a lavar de tal manera que un interior de dicho contenedor se puede exponer a dichos electrones.

10 de dicho contenedor se puede exponer a dichos electrones.

2. El aparato de la reivindicación 1, en donde la nanoestructura es un nanotubo de carbono (CNT), comprendiendo además el aparato una fuente de electrones adicional configurada para hacer incidir electrones libres sobre el CNT para inducir emisión estimulada por efecto de campo de electrones desde el mismo;

opcionalmente en donde dicha fuente de electrones adicional es otra nanoestructura.

15 3. El aparato de cualquiera de las reivindicaciones 1 o 2, que comprende además una conexión de suministro de energía eléctrica (250) acoplada operativamente a la nanoestructura y configurada para proporcionar un pulso de tensión a la nanoestructura.

4. El aparato de cualquier reivindicación precedente, que comprende además:

una matriz de nanoestructuras ubicada entre el ánodo (210) y el cátodo (220) y conectada eléctricamente al cátodo,
 estando configurada dicha matriz para emitir electrones por efecto de campo en respuesta a la presencia de un campo eléctrico entre el ánodo y el cátodo cuando se establece entre ellos una diferencia de potencial, y que comprende dicha nanoestructura;

un substrato (520) en el que se forma la matriz, estando dicho substrato opcionalmente comprendido en el cátodo o conectado eléctricamente al cátodo;

25 un elemento de calentamiento diseñado para calentar la nanoestructura, opcionalmente en donde dicho elemento de calentamiento está dispuesto en contacto térmico con un lado de dicho substrato inverso a aquel sobre el que está presente la matriz, de tal manera que el elemento de calentamiento pueda conducir calor a través del substrato hasta la matriz; y

ya sea además de o como alternativa al elemento de calentamiento, una fuente de alimentación controlada por corriente (560) configurada para calentar dicho substrato mediante calentamiento óhmico; en donde:

el aparato opcionalmente comprende además una conexión de suministro de energía eléctrica (250) acoplada operativamente a la nanoestructura y configurada para proporcionar un pulso de tensión a la nanoestructura.

5. El aparato de cualquier reivindicación precedente, en donde:

la nanoestructura está recubierta al menos parcialmente con un material que tiene una función de trabajo de menos
 de 4 eV, comprendiendo opcionalmente dicho material cesio o hafnio en donde, cuando depende de la reivindicación
 4, el material de recubrimiento tiene opcionalmente un punto de fusión de al menos 400°C; y/o

la nanoestructura está recubierta al menos parcialmente con un recubrimiento catalítico, en donde opcionalmente:

dicho recubrimiento catalítico comprende uno o más de óxido de vanadio, óxido de zinc y trióxido de tungsteno; y/o

dicho recubrimiento catalítico se aplica sobre un recubrimiento estabilizador tal como dióxido de titanio; y/o

40 la nanoestructura está dopada con un material de mejora del transporte de electrones o un material de incremento de la conductividad eléctrica;

opcionalmente en donde el aparato comprende además una matriz de nanoestructuras ubicada entre el ánodo (210) y el cátodo (220) y conectada eléctricamente al cátodo, estando configurada dicha matriz para emitir electrones por efecto de campo en respuesta a la presencia de un campo eléctrico entre el ánodo y el cátodo cuando se establece una diferencia de potencial entre ellos, y que comprende la citada nanoestructura, comprendiendo la matriz una combinación de al menos dos de:

una o más nanoestructuras no recubiertas,

una o más nanoestructuras recubiertas al menos parcialmente con un material que tiene una función de trabajo de menos de 4 eV, y

una o más nanoestructuras recubiertas al menos parcialmente con un recubrimiento catalítico.

 6. El aparato de cualquier reivindicación precedente, en donde la nanoestructura es hueca, estando su interior al menos parcialmente relleno de un material rigidizador, comprendiendo opcionalmente el material rigidizador un metal de transición tal como titanio, hierro o cobre;

opcionalmente en donde el aparato comprende además:

una matriz de nanoestructuras ubicada entre el ánodo (210) y el cátodo (220) y conectada eléctricamente al cátodo, estando configurada dicha matriz para emitir electrones por efecto de campo en respuesta a la presencia de un campo eléctrico entre el ánodo y el cátodo cuando se establece una diferencia de potencial entre ellos, y que comprende la

10 eléctrico entre el ánodo y el cátodo cuando se establece una diferencia de potencial entre ellos, y que comprende la citada nanoestructura; y

un substrato (520) sobre el cual está conformada la matriz;

en donde:

20

30

40

el material rigidizador comprende un material que comprende el substrato, y opcionalmente carbono; y

15 opcionalmente, el substrato comprende titanio y el material rigidizador comprende carburo de titanio.

7. Un sistema para el lavado de gases de combustión por irradiación de electrones, comprendiendo dicho sistema:

al menos cuatro matrices de nanoestructuras ubicadas entre el ánodo (210) y el cátodo (220) y conectadas eléctricamente al cátodo, estando configuradas dichas matrices para emitir electrones por efecto de campo en respuesta a la presencia de un campo eléctrico entre el ánodo y el cátodo cuando se establece una diferencia potencial entre ellos y que comprende la citada nanoestructura,

estando conformada cada matriz sobre un substrato conductor de la electricidad (520);

un suministro de energía eléctrica (250);

conexiones eléctricas que conectan dichos substratos, dicha fuente de alimentación y tierra de tal manera que cada substrato está a un potencial eléctrico diferente; y

25 una o más carcasas acopladas a los substratos y configuradas para ubicar a dichas matrices de tal manera que sus nanoestructuras se extiendan hacia el interior del contenedor que contiene gas a lavar de tal manera que un interior de dicho contenedor se puede exponer a electrones emitidos por efecto de campo por las matrices;

en donde los substratos están dispuestos de tal manera que, para todos los substratos excepto para aquel que está al potencial eléctrico más alto, existe una trayectoria en línea recta desde una superficie de cada matriz definida por extremos libres de las nanoestructuras que forman esa matriz hasta una superficie correspondiente de la matriz conformada en el substrato en el siguiente potencial más alto;

opcionalmente en donde los substratos están dispuestos en un patrón de doble zigzag.

8. Un barco que comprende el aparato de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, o el sistema de la reivindicación 7, en el cual el contenedor está configurado para contener emisiones de dicho barco.

9. Un método de lavado por irradiación de electrones que se realizará con el aparato de la reivindicación 1, cualquiera de las reivindicaciones 2 a 6 como dependiente de ella, o el sistema de la reivindicación 7 como dependiente de ella, comprendiendo el método:

establecer una diferencia de potencial entre el ánodo (210) y el cátodo (220) de tal manera que la nanoestructura esté expuesta a un campo eléctrico, produciendo como resultado emisión de electrones por efecto de campo por dicha nanoestructura; y

exponer el gas a lavar a dichos electrones.

10. El método de la reivindicación 9, en el cual la nanoestructura es un nanotubo de carbono (CNT), que comprende además exponer el CNT a un electrón libre para inducir emisión estimulada por efecto de campo de electrones desde el CNT;

45 en donde dicho electrón libre se emitía opcionalmente desde una fuente de electrones adicional mediante emisión por efecto de campo o emisión estimulada por efecto de campo, siendo dicha fuente de electrones adicional otra nanoestructura.

11. El método de cualquiera de las reivindicaciones 9 o 10, que comprende además proporcionar un pulso de tensión a la nanoestructura, teniendo dicho pulso opcionalmente una magnitud menor que una tensión de ruptura de dicho gas;

en donde dicho pulso de tensión opcionalmente:

5 tiene una amplitud absoluta de desde 100 V hasta 5 kV; y/o

tiene una duración de desde 1 µs hasta 1 ms; y/o

se repite periódicamente, opcionalmente con una frecuencia de desde 100 Hz hasta 500 kHz, opcionalmente con un ciclo de trabajo de menos del 50%.

12. El método de cualquiera de las reivindicaciones 9 a 11, en donde dicha nanoestructura está diseñada para generar
dicho haz de electrones en un entorno a una presión absoluta de no menos de 80 kPa.

13. El método de cualquiera de las reivindicaciones 9 a 12, que comprende además calentar la nanoestructura durante dicha emisión por efecto de campo;

en donde la nanoestructura se calienta opcionalmente hasta entre 200 y 1000°C, opcionalmente hasta entre 300 y 900°C, opcionalmente hasta entre 400 y 800°C, opcionalmente hasta entre 400 y 600°C.

15 14. El método de cualquiera de las reivindicaciones 9 a 13, que comprende además:

antes de exponer dicho gas a dichos electrones, mezclar el gas con amoníaco para formar una mezcla de gases; y

después de exponer dicha mezcla de gases a los electrones, recoger un polvo producido de ese modo.



FIG. 1A



FIG. 1B











15



FIG. 4A



FIG. 4B





FIG. 6