(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 972 167**

(51) Int. Cl.:

G05D 23/19 (2006.01)

H05H 1/24 (2006.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **23.02.2021 E 21382145 (7)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **29.11.2023 EP 4047443**

(54) Título: **Sistema para controlar la temperatura de un cuerpo**

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
11.06.2024

(73) Titular/es:

INSTITUTO NACIONAL DE TECNICA AEROESPACIAL (100.0%)
Ctra. Ajalvir, p.k. 4,5
28850 Torrejon De Ardoz (Madrid), ES

(72) Inventor/es:

CONESA TORRES, ANTONIO JESÚS;
CABRERA REVUELTA, ÁNGEL y
SÁNCHEZ GARCÍA, MARIO

(74) Agente/Representante:

DE DIOS SERRANÍA, Gustavo Adolfo

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

Sistema para controlar la temperatura de un cuerpo

CAMPO

La presente divulgación enseña en general técnicas relacionadas con el intercambio de calor. Más particularmente, se refiere a técnicas de control de temperatura que utilizan vientos iónicos formados con actuadores de plasma basados en el efecto de descarga de barrera dieléctrica (DBD).

ANTECEDENTES

Existen muchas aplicaciones en varios campos donde es necesario mejorar la gestión térmica, ya sea para aumentar o para disminuir la temperatura de un cuerpo. Por ejemplo, en el campo de la electrónica, la miniaturización de circuitos integrados requiere la refrigeración adecuada para compensar el aumento de calor. Sin embargo, las propuestas existentes normalmente son voluminosas, ruidosas y/o complejas (por ejemplo, añadiendo piezas mecánicas o efectos giroscópicos). En el campo de la aeronáutica, otro ejemplo ilustra la situación contraria en que las bajas temperaturas durante el vuelo provocan la formación de hielo, un fenómeno adverso que afecta a la aerodinámica y al rendimiento de la aeronave.

Entre otras técnicas, el efecto de descarga de barrera dieléctrica (DBD) puede usarse en calentamiento. La DBD se conoce desde el siglo XIX, una alta tensión alterna produce una descarga no térmica entre dos electrodos separados por una barrera dieléctrica aislante. Cuando estos electrodos se disponen en una configuración asimétrica, se obtiene un viento iónico.

Los actuadores capaces de producir el efecto DBD se denominan actuadores DBD. Son dispositivos que habitualmente tienen dos o más electrodos superpuestos (un electrodo expuesto y un electrodo aislado) y separados por un medio dieléctrico. Los electrodos pueden ser de cualquier material conductor. Cuando se suministra alimentación de CA de alta tensión y alta frecuencia, se crea una descarga de plasma. Se transfiere impulso desde la descarga de plasma al entorno a través de una colisión de iones con moléculas neutras que producen fuerza inducida en el aire y en el cuerpo.

Los actuadores DBD conocidos se han usado en la industria en aplicaciones relacionadas con el control de flujo. Sin embargo, los actuadores DBD para transferir calor son raros y se limitan a aplicaciones de calentamiento.

Existen otras técnicas de generación de plasma, como la descarga por efecto corona. La descarga por efecto corona también es una descarga no térmica generada por la aplicación de alta tensión directa a puntas de electrodo afiladas.

El documento US20190193863A1 da a conocer técnicas de calentamiento que mejoran la eficacia de deshielo y antihielo a través de una descarga de barrera dieléctrica (DBD) y también permiten el control de flujo. Se diseña un actuador de plasma DBD basándose en una configuración de tres electrodos, con dos electrodos expuestos al flujo de aire y un electrodo integrado en un dieléctrico. Un electrodo expuesto recibe alimentación de CA y el otro se energiza mediante pulsos de tensión de CC de nanosegundos. La DBD funciona como un controlador de flujo, usando el viento iónico para transferir impulso a las moléculas de aire, como un detector de hielo, usando el principio del sensor capacitivo, o como un dispositivo de deshielo/antihielo al producir una región de plasma más extensa y ondas de choque para proporcionar un calentamiento superficial más rápido.

Por tanto, existe la necesidad actual en el estado de la técnica de permitir que los actuadores DBD controlen mejor la temperatura de un cuerpo, de modo que pueda proporcionarse enfriamiento mejorado, calentamiento mejorado o enfriamiento y calentamiento alternativos.

SUMARIO

La presente invención se realizó en vista de las limitaciones del estado de la técnica y la exigente necesidad de una adecuada gestión térmica. Según la reivindicación independiente, se propone un sistema capaz de enfriar y/o calentar la superficie. El sistema puede usarse en aplicaciones anticongelantes (también denominadas antihielo) y aplicaciones de descongelación (también denominadas de deshielo), entre otras. El sistema puede generar un viento iónico, como resultado de la ionización del aire, cuya temperatura y diversas características pueden variarse dependiendo de determinadas condiciones de funcionamiento. El viento iónico puede usarse para modificar, por ejemplo, retirar la capa límite y lograr una mejora en la transferencia de calor por convección. Ventajosamente, tanto el enfriamiento como el calentamiento de una superficie pueden lograrse o bien en una realización del sistema con una función alternativa o bien, en realizaciones independientes, en una particularmente adaptada para enfriar y otra particularmente adaptada para calentar.

El sistema comprende un actuador DBD que va a ubicarse cerca de un cuerpo, por ejemplo, que va a regularse térmicamente, de tal manera que se produzca un viento iónico. El actuador DBD incluye electrodos y un material

dieléctrico no gaseoso. Cuando se produce un gradiente de campo eléctrico entre los electrodos, se genera una fuerza en la dirección decreciente del campo eléctrico y se aplica al aire débilmente ionizado sobre la superficie del material dieléctrico. En su desplazamiento, los iones chocan con moléculas de aire neutras transfiriéndoles impulso y produciendo un flujo de aire a partir de estos impactos, denominándose tal flujo de aire, viento iónico. La velocidad y el volumen de este viento iónico aumentan con la tensión y la frecuencia, entre otros parámetros. El viento iónico puede modificar las propiedades de la capa límite y la estructura del flujo.

La presente invención proporciona un sistema para controlar la temperatura de un cuerpo que comprende un actuador DBD configurado para poder conectarse a una fuente de alimentación y producir un viento iónico sobre el cuerpo, y una unidad de control configurada para seleccionar una configuración inicial y para controlar la fuente de alimentación dependiendo de una diferencia de temperatura entre una temperatura de entrada (T_i) y una temperatura objetivo (T_{ta}) sobre el cuerpo. La configuración inicial comprende los siguientes parámetros de construcción del actuador DBD: número de electrodos, forma y geometría de los electrodos, posición relativa entre los electrodos (d), material dieléctrico, grosor dieléctrico (e), y los siguientes parámetros de ajuste en la fuente de alimentación: un valor de frecuencia (f), un valor de amplitud (V), una señal de forma de onda y un ciclo de trabajo. La unidad de control está configurada, además, para ajustar la configuración inicial modificando cualquiera de los parámetros de ajuste para controlar el calor transferido al viento iónico producido.

Pueden definirse varias realizaciones del sistema según las reivindicaciones dependientes. Entre otros, por ejemplo, pueden usarse diferentes actuadores DBD que tengan diversas características según el número de electrodos, la forma de los electrodos (es decir, forma plana, ondulada, redonda o cilíndrica), la posición (es decir, la distancia de los bordes, paralela, coplanaria, etc.), la geometría (dentada, recta, puntiaguda, etc.), la encapsulación (inexistente, uniforme, variable), la estructura de sus componentes (rígida, flexible), etc. Tales son características de construcción que se refieren al diseño de fabricación del actuador DBD.

De manera similar, las características de la señal de tensión aplicada a los electrodos del actuador DBD del sistema cambian el comportamiento general. Al hacerlo, puede modificarse el viento iónico. Estas características son, por ejemplo, la frecuencia, la amplitud, la forma de onda o el ciclo de trabajo. Se consideran parámetros de ajuste que pueden cambiarse fácilmente si es necesario. Para ello, se propone una unidad de control configurada para cambiar el ajuste de la fuente de alimentación según la aplicación prevista. Los parámetros de ajuste del actuador DBD pueden considerarse cuando se controla la fuente de alimentación.

Por ejemplo, para generar un determinado grado de enfriamiento o calentamiento sobre el cuerpo, la unidad de control puede ajustar una forma de onda, tensión y/o frecuencia particular para la fuente de alimentación y monitorizar si se logra el resultado o, de lo contrario, si la configuración necesita ajustes. La selección de parámetros influye aumentando o disminuyendo la temperatura, la velocidad y/o el volumen del viento iónico producido por el actuador DBD. También afecta a la capa límite.

El rendimiento del sistema está limitado por la temperatura de entrada a la DBD (T_i) y se ve afectado por la temperatura objetivo (T_{ta}). Aunque pueden ser fijas, ambas también pueden modificarse. En realidad, la T_{ta} es un valor establecido por diseño y puede modificarse por el usuario, mientras que T_i puede modificarse, por ejemplo, forzando el flujo desde diferentes áreas en los alrededores del sistema DBD con temperaturas más altas o más bajas o a través de sistemas de calentamiento/enfriamiento ubicados en la entrada de DBD, además pueden estimarse e introducirse manualmente. Debe observarse que T_{ta} puede seleccionarse de manera que resulte inalcanzable, forzando al sistema a funcionar sólo en un sentido (sólo calentamiento o sólo enfriamiento).

En algunos usos, el sistema puede aprovechar la presencia de un sensor que mida en tiempo real cualquier parámetro de interés del sistema (por ejemplo, un sensor que identifica la presencia de hielo). Este parámetro puede usarse para adaptar adicionalmente el control del sistema. En una realización preferida, este sensor es un sensor de temperatura que mide la temperatura del cuerpo.

Es importante destacar que, para lograr enfriamiento o calentamiento, la presente invención se enfrenta a una compleja compensación y equilibrio de características. Hay características que producen efectos opuestos, ya sean parámetros de construcción o de ajuste. También hay determinadas características que pueden cambiar su comportamiento en el sentido opuesto cuando se modifican.

Por ejemplo, una mayor separación entre los electrodos implica una zona de descarga más grande, pero una región con plasma más pequeña y una formación de viento iónico más débil. Por otro lado, cuando se separan los electrodos, la descarga no es homogénea, por lo que el comportamiento es menos repetible. Para compensar la falta de homogeneidad de la descarga, puede modificarse la forma del borde del electrodo (habitualmente recto). Por ejemplo, se propone que el borde pueda tener forma de diente de sierra o de punta. Por tanto, seleccionar una geometría de borde adecuada hace que las descargas comiencen en una determinada región del electrodo. Por consiguiente, la descarga es más homogénea y, por tanto, aumenta la intensidad del campo eléctrico. En este caso, la geometría de borde compensa el efecto de separación de los dos electrodos.

De manera similar, la unidad de control puede cambiar dinámicamente el ajuste de la fuente de alimentación a través

de determinados parámetros de ajuste para actuar sobre el comportamiento de la DBD de manera rápida.

La unidad de control influye en cómo se produce el viento iónico para lograr la aplicación prevista. Por ejemplo, los siguientes parámetros son clave para alimentar el actuador DBD: forma de onda, ciclo de trabajo, amplitud y frecuencia de la señal de tensión. Como resultado, puede conseguirse la regulación térmica de un cuerpo. La generación del viento iónico que incide sobre la superficie del cuerpo puede variar y puede obtenerse diferente regulación térmica (ya sea enfriamiento o calentamiento o alternativamente ambos).

Puede mejorarse la robustez del sistema, por ejemplo, puede evitarse una ruptura dieléctrica debido al calentamiento excesivo en el actuador DBD. La unidad de control puede disminuir la frecuencia de excitación mientras mantiene la amplitud de tensión a temperatura decreciente si el sensor de temperatura indica un valor mayor que un umbral de seguridad (por ejemplo, límite de temperatura).

El sistema ahorra consumo de energía en la fuente de alimentación. Por ejemplo, puede funcionar para enfriar un cuerpo con una frecuencia más baja (por ejemplo, 1 kHz o menos).

El sistema tiene varias ventajas adicionales tales como: bajo peso, ocupación de volumen reducida (no necesita disipador térmico ni ventilador en aplicaciones de enfriamiento), flexibilidad para adaptarse a una forma específica, bajo mantenimiento y una combinación de funcionalidades (enfriamiento y calentamiento).

Las enseñanzas de la presente invención también permitirían reducir la complejidad y mejorar la integración de los sistemas de protección térmica que pueden ser aplicables a tecnologías heterogéneas.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

La figura 1 muestra un diagrama de bloques esquemático con elementos de una realización del sistema.

La figura 2 muestra un diagrama de bloques esquemático de una unidad de control de una realización del sistema.

La figura 3 muestra un diagrama de flujo a modo de ejemplo de una unidad de control para enfriar o calentar un cuerpo de una realización del sistema.

La figura 4 muestra una representación esquemática de una realización de un sistema con un actuador DBD.

Las figuras 5A-5C muestran tres formas diferentes de los electrodos expuestos para un actuador DBD.

La figura 6A muestra un actuador DBD que tiene un electrodo inferior sin encapsulación.

La figura 6B muestra un actuador DBD que tiene un electrodo encapsulado inferior.

La figura 7 muestra, para tres frecuencias de tensión, resultados experimentales de la variación de la velocidad del viento iónico con la altura sobre el actuador DBD de la figura 6B.

Las figuras 8A-8G muestran diferentes realizaciones de construcción de actuadores DBD para el sistema.

La figura 9 muestra diferentes formas de onda.

La figura 10 muestra una forma de onda estacionaria y no estacionaria.

La figura 11 muestra una forma de onda de pulso único generada en la fuente de alimentación.

La figura 12A muestra una curva de la temperatura frente al tiempo con respecto al calentamiento de la realización de un sistema de la figura 8A.

La figura 12B muestra una curva de la temperatura frente a la distancia con respecto al calentamiento de la realización de un sistema de la figura 8A.

La figura 13A muestra el efecto del enfriamiento en función del tiempo y la tensión de frecuencia de excitación.

La figura 13B muestra el efecto del enfriamiento en función del tiempo y la amplitud de tensión.

DESCRIPCIÓN DETALLADA

Se explicarán varios aspectos y realizaciones de la invención con referencia a los dibujos para una mejor comprensión.

La figura 1 muestra un diagrama de bloques simplificado según una realización de la invención. Un sensor de

temperatura (7) mide la temperatura de un cuerpo (6) y proporciona este valor a una unidad de control (8). La fuente de alimentación (5) suministra tensión alternativa a un actuador DBD (9). La unidad de control (8) controla una fuente de alimentación (5) dependiendo de la temperatura del cuerpo (6) y también dependiendo de una temperatura objetivo. La unidad de control (8) puede seleccionar un determinado ajuste de la fuente de alimentación (5) como configuración inicial. Puede aplicarse enfriamiento o calentamiento dependiendo de la temperatura actual del cuerpo (6) proporcionada por el sensor de temperatura (7) y la temperatura objetivo. En la configuración inicial también pueden considerarse las características de construcción del actuador DBD. Los electrodos del actuador DBD crean una región de plasma que provoca un viento iónico hacia el cuerpo (6). La unidad de control (8) puede producir de ese modo el enfriamiento o calentamiento del cuerpo (6) variando parámetros de ajuste tales como la frecuencia de tensión y/o la amplitud de tensión y/o la forma de onda y/o el ciclo de trabajo para comprobar después de un intervalo de tiempo, Δt, con el sensor de temperatura (7) si la temperatura del cuerpo ha cambiado según lo deseado. Si la temperatura del cuerpo no ha cambiado lo suficiente tras la comprobación, puede ajustarse la configuración inicial para facilitar que se alcance la temperatura objetivo.

La unidad de control puede activarse para funcionar en modo de calentamiento o de enfriamiento basándose en el sensor de temperatura y en la temperatura objetivo. Además, la unidad de control puede incluir otras señales de entrada para modificar su funcionamiento. Adicionalmente, la unidad de control puede permitir el funcionamiento en modo manual seleccionando cualquiera de los dos ajustes (enfriamiento o calentamiento).

En el modo de calentamiento, la forma de onda predeterminada será nanopulsos (ns-DBD). Si con la configuración preestablecida no puede alcanzarse la temperatura objetivo, se aumenta la tensión de excitación y luego la frecuencia. Por ejemplo, puede realizarse de manera alternativa o incluso simultánea. Cuando se alcanza la temperatura objetivo, puede cambiarse a una forma de onda de menor consumo, introduciendo una onda no estacionaria con un ciclo de trabajo o en forma de ráfagas.

En el modo de enfriamiento, la forma de onda preestablecida será preferentemente una señal de CA sinusoidal. Si no se alcanza la temperatura objetivo con las condiciones preestablecidas, se aumentará la tensión de excitación. Obsérvese que durante el aumento de la tensión de excitación para lograr el enfriamiento de la superficie, puede producirse un efecto no deseado: puede aparecer un aumento de temperatura. En tal circunstancia, la frecuencia de excitación se reduce o se excita con una onda no estacionaria a través de un ciclo de trabajo. La unidad de control puede usar una actuación similar para reducir el consumo de energía una vez que se alcanza la temperatura objetivo.

Debe observarse que el sistema presentado en la figura 1 también es válido sin sensor de temperatura (7). En este caso, el control podría prefijarse o gestionarse manualmente.

La figura 2 muestra otro diagrama de bloques de la unidad de control 8. La unidad de control (8) puede considerar una configuración inicial con parámetros de ajuste de la fuente de alimentación (5) y parámetros de construcción del actuador DBD (9) para ajustar adecuadamente la configuración inicial, por ejemplo, los parámetros de ajuste de la fuente de alimentación (5). Los parámetros de construcción del actuador DBD (9) pueden ser parte de las entradas para la unidad de control (8) (por ejemplo, valores de funcionamiento de seguridad tales como amplitud límite de tensión para un determinado intervalo de frecuencia, frecuencia límite de la señal de tensión para un determinado intervalo de amplitud, temperatura límite del actuador DBD).

La unidad de control (8) está configurada para monitorizar un funcionamiento de seguridad para el actuador DBD (9) comprobando si una modificación en un parámetro de ajuste de la fuente de alimentación (5) hace que se alcance un valor límite de funcionamiento para el actuador DBD (9), seleccionándose el valor límite de funcionamiento según el resto de parámetros de ajuste en la fuente de alimentación (5).

La figura 3 muestra un diagrama de flujo de una implementación de la unidad de control (8) para el control de temperatura. Si la temperatura de un cuerpo (T_b) está por debajo (calentamiento) o por encima (enfriamiento) de T_{ta} grados, se usa una configuración inicial para hacer funcionar la fuente de alimentación y crear plasma con el actuador DBD. Después de un determinado período de tiempo, Δt, se compara la temperatura del cuerpo con el valor objetivo deseado T_{ta}. Si hay una diferencia de temperatura entre T_b y T_{ta}, la unidad de control puede ajustar la configuración inicial modificando los parámetros de ajuste de la unidad de alimentación. De este modo, pueden modificarse selectivamente los parámetros de ajuste para enfriar o calentar.

La figura 4 muestra una representación esquemática de una realización de un sistema 10 para modificar la temperatura de un cuerpo 6 basándose en el efecto de descarga de barrera dieléctrica (DBD). El sistema 10 incluye un actuador DBD con dos electrodos. Un primer electrodo 1 tiene un lado expuesto al exterior (generalmente, aire circundante, pero también otros fluidos), un segundo electrodo 2 tiene una estructura de encapsulación 4 para evitar efectos no deseados y reducir el consumo de energía. Ambos electrodos están conectados a una fuente de alimentación 5 que proporciona una alta tensión alterna. Pueden ser adecuados otros actuadores DBD, tal como se comenta más adelante. Preferiblemente, la forma de onda de tensión y los parámetros asociados pueden definirse según el uso previsto. Algunos de los parámetros que se ajustan como frecuencia, amplitud, forma de onda y ciclo de trabajo, se explicarán más adelante. Tal como puede observarse, los electrodos 1, 2 están ubicados en planos paralelos, definiendo entre ellos un espacio para una capa dieléctrica 3 de determinado grosor “e”. Los electrodos 1, 2 no están

alineados verticalmente, hay una desviación “d” entre los bordes 1b, 2b, cuando se aplica una alta tensión, provoca una ionización del aire y se genera un viento iónico tal como se indica por flecha que puede emplearse para varios propósitos. En particular, enfriar o calentar la superficie del cuerpo 6. Debe observarse que d>0 significa un espacio o separación entre los electrodos, es decir, un espacio desde el borde 2b hasta el borde 1b, mientras que d<0 implica al menos una superposición parcial entre ambos electrodos, es decir, el borde 2b está debajo del electrodo 1. Como regla general, debería preferirse una configuración con d<0 para aplicaciones de calentamiento, mientras que se preferirían configuraciones de d>0 para enfriar.

Las figuras 5A-5C muestran tres formas diferentes de los electrodos expuestos. Las características geométricas pueden variar. La figura 5A muestra un electrodo que tiene bordes rectos. La figura 5B muestra un electrodo que tiene dientes triangulares. La figura 5C muestra un electrodo que tiene bordes sinusoidales. La forma del borde es importante para producir una descarga adecuada, tal como se explica más adelante.

Se ha descubierto que el grosor de los electrodos no es un factor clave. Sin embargo, cuanto menor sea el grosor, mejor. Generalmente, el grosor de los electrodos debe ser inferior a 200 micrómetros, de manera preferible de aproximadamente 50 micrómetros.

La figura 6A ilustra un actuador DBD simplificado definido por dos electrodos 1, 2 ubicados en lados opuestos de un medio dieléctrico 3 dispuestos en una configuración asimétrica. En esta realización no hay electrodo encapsulado. Una fuente alterna de alta tensión 5 aplica una tensión a los electrodos 1, 2. En el contexto del presente documento, alta tensión debe entenderse desde 5 kVpp hasta 50 kVpp. Por encima de un umbral de tensión se produce una descarga eléctrica, el aire se ioniza en ambos lados del material dieléctrico, en las regiones con mayor intensidad del campo eléctrico. Se forma plasma en ambos lados del material dieléctrico 3. Por consiguiente, se produce un viento iónico en ambos lados con sentido opuesto.

La figura 6B ilustra otro actuador DBD simplificado. En este caso, la generación de plasma se produce sólo en un lado del dieléctrico 3. Para evitar la generación de plasma en el otro lado del dieléctrico, uno de los electrodos se aísla, por ejemplo, convirtiéndolo en un electrodo encapsulado. Se forma una región de plasma en el electrodo expuesto. En general, el electrodo conectado a tierra es habitualmente el electrodo encapsulado.

La región de plasma se forma debido al intenso campo eléctrico obtenido al aplicar una señal de alta tensión a los electrodos. El aire ionizado contenido en la región de plasma se propaga desde el borde 1b del electrodo expuesto 1 hasta el electrodo encapsulado 2, generando un viento iónico.

El material dieléctrico evita que se forme un arco eléctrico entre los dos electrodos. Además, la acumulación de carga en el material dieléctrico 3 hace que la descarga disminuya y finalmente se extinga. Por este motivo, normalmente se usa una señal de tensión alterna.

La figura 7 ilustra mediciones experimentales de la velocidad del viento iónico inducido en función de *h,* la altura por encima de la superficie del actuador DBD, tal como se representa en la figura 6B. Se usa Kapton® como elemento dieléctrico y tres valores de frecuencia diferentes (1 kHz, 2 kHz, 3 kHz) para una tensión de suministro de 14 kVpp (amplitud de 7 kV) y en L = 16 mm desde el electrodo expuesto del borde posterior (1b). Se ha descubierto que cuanto mayor es la frecuencia, mayor es la velocidad del viento iónico. La unidad de control aprovecha este hecho para modificar el funcionamiento del actuador DBD. La velocidad alcanza el máximo cerca de la superficie del actuador, entre una altura de 0,5 y 1 mm.

En las figuras 8A-8G puede observarse esquemáticamente la diferente formación del viento eléctrico según diversas realizaciones de sistema de DBD (9) en las que varían los parámetros de construcción del actuador DBD (disposición, tamaño, número, etc.) de los electrodos. La punta de la flecha indica la dirección del viento iónico. El tamaño de la flecha no está relacionado con la magnitud de velocidad.

La figura 8A ilustra el caso en el que el electrodo expuesto 1 se coloca encima de una capa dieléctrica 3. El electrodo encapsulado 2 se coloca en el lado opuesto de la capa dieléctrica. Ambos electrodos 1, 2 son laminares (por ejemplo, de cinta de aluminio) y están dispuestos en planos paralelos y tienen un desplazamiento en los bordes respectivos. El plasma se genera en el borde del electrodo expuesto 1 más cercano al electrodo encapsulado 2. Un actuador DBD como este puede ser adecuado para aplicaciones de enfriamiento y calentamiento.

La figura 8B ilustra el caso en el que el electrodo expuesto 1 se coloca encima de una capa dieléctrica 3. El electrodo encapsulado 2 se coloca en el lado opuesto del dieléctrico. Ambos electrodos 1, 2 son laminares y están dispuestos en planos paralelos. El electrodo expuesto 1 es más pequeño que el electrodo encapsulado 2 y está completamente superpuesto. Se genera plasma en ambos bordes del electrodo expuesto 1. Un actuador DBD como este puede ser más adecuado para aplicaciones de calentamiento.

La figura 8C muestra otra realización donde la proyección de un electrodo sobre el otro define una separación o espacio adicional. Este espacio entre el electrodo expuesto 1 y el electrodo encapsulado 2 puede modificarse para adaptarse a las necesidades. Un actuador DBD como este puede ser más adecuado para aplicaciones de

enfriamiento.

La figura 8D representa otra realización con un tercer electrodo adicional. En esta configuración, se genera un viento eléctrico perpendicular a la superficie del cuerpo 6. Con respecto a los tres electrodos, dos electrodos están expuestos y conectados a la misma fuente de alimentación. Se genera un viento eléctrico de modo que la dirección del viento puede modificarse 180 grados; para lograr este resultado, la tensión y/o la frecuencia aplicadas a los electrodos 1 y 13 deben ser diferentes, pudiendo usarse dos fuentes de alimentación. Un actuador DBD como este puede ser más adecuado para aplicaciones de calentamiento.

La figura 8E muestra otra realización similar a la configuración explicada en la figura 8A donde el grosor del dieléctrico no es constante. Una parte del electrodo encapsulado no es paralela al plano del electrodo expuesto. Se produce una región de plasma más grande al disminuir el grosor del dieléctrico en una región donde la intensidad del campo eléctrico disminuye. Un actuador DBD como este puede ser más adecuado para aplicaciones de enfriamiento.

La figura 8F representa otra realización con tres electrodos. En esta configuración, el tercer electrodo 13 está conectado eléctricamente al electrodo encapsulado a tierra. Cuando el electrodo 1 está conectado a una señal alterna de alta tensión y los electrodos 2 y 13 están conectados a tierra, la descarga tiene la ventaja de que el electrodo 13 permite una mayor neutralización de carga, reduciendo la acumulación de carga en el material dieléctrico 3. Un actuador DBD como este puede ser más adecuado para aplicaciones de calentamiento.

La figura 8G muestra una realización según una configuración denominada “descarga deslizante” con tres electrodos y combina una descarga por efecto corona y DBD. Hay dos electrodos expuestos y un electrodo encapsulado, separados por el elemento dieléctrico 3. En esta disposición, el electrodo adicional 13 está conectado a una fuente de corriente continua negativa. Entre los electrodos 1 y 2 hay un DBD básico. Hay canales de descarga por efecto corona formados desde el electrodo 1 al electrodo 13. Esta configuración logra una región de plasma más grande con una tensión reducida. Un actuador DBD como este puede ser más adecuado para aplicaciones de calentamiento.

Las configuraciones anteriores son meramente ilustrativas. Pueden definirse otros tipos. También son posibles combinaciones de diferentes configuraciones, incluso algunas de ellas compartiendo electrodos.

Aunque las figuras muestran un único actuador DBD (9), un sistema puede comprender múltiples actuadores que actúan sobre un mismo cuerpo o sobre diferentes. Obsérvese que la forma de los electrodos no se limita a ser plana o laminar ni a que sean paralelos entre ellos. De hecho, pueden preverse beneficios en el rendimiento del sistema cuando el DBD y sus componentes se adaptan al cuerpo o a una forma específica.

A continuación, se comentan parámetros de construcción adicionales que también influyen en el rendimiento de las realizaciones.

El grosor del electrodo expuesto tiene una influencia relativa sobre la intensidad del campo eléctrico. La anchura y el material del que están realizados los electrodos no son muy importantes. Cuanto más fino sea el electrodo expuesto, mejores resultados se obtendrán en lo que se refiere a la generación de viento iónico.

La anchura del electrodo encapsulado produce un aumento en la longitud de la región de plasma, lo que mejora el rendimiento. Sin embargo, por encima de un determinado valor, no se obtiene ninguna mejora adicional.

La disposición de electrodos opuestos puede ser de modo que exista una desviación “d” entre los bordes que van a colocarse uno frente al otro; como consecuencia, el parámetro “d” puede ser negativo o positivo. Los mejores resultados para la generación de viento iónico se obtienen con una desviación de -1 mm a 1 mm. La configuración de electrodos superpuestos está relacionada con una descarga más uniforme. Esta realización también permite un ligero aumento en el rendimiento.

El material de la capa dieléctrica es de gran importancia, afectando al rendimiento del sistema DBD y a sus condiciones máximas de funcionamiento. Los materiales típicos usados como dieléctricos incluyen Teflón®, cristal, Kapton®, Macor®, baquelita, cuarzo, Delrin®, metacrilato y policarbonato, entre otros. En la práctica, no existe un medio dieléctrico perfecto y el más apropiado depende de la aplicación específica.

Aparte de las consideraciones anteriores, la excitación eléctrica también tiene gran importancia en el comportamiento del sistema.

La figura 9 muestra varios tipos de señales eléctricas que pueden usarse para alimentar el sistema: sinusoidal, rectangular, triangular, de diente de sierra y de pulso. En general, se prefieren las formas de onda sinusoidales para aplicaciones de enfriamiento, mientras que para las de calentamiento se prefieren pulsos de duración muy corta.

La excitación no estacionaria puede obtenerse modulando una señal de tensión usando pulsos. Por ejemplo, encender y apagar una señal de corriente alterna a una frecuencia determinada. La relación entre el tiempo de acción y el período de excitación da el ciclo de trabajo. Un rendimiento estacionario tiene un ciclo de trabajo del 100%. Una

actuación no estacionaria puede provocar inestabilidades en una capa límite desprendida, obteniendo mejores resultados que en una actuación estacionaria.

La figura 10 muestra una forma de onda estacionaria y no estacionaria. Este tipo de excitación es válida tanto en enfriamiento como en calentamiento. En cuanto a la frecuencia, las descargas de pulsos de nanosegundos pueden ser más eficientes que las descargas de microsegundos. Es necesario que la fuente de alimentación pueda proporcionar una señal de duración tan corta.

La descarga de pulsos de nanosegundos, también denominada ns-DBD, ha demostrado ser eficaz para aplicaciones de control de flujo en un amplio intervalo de Mach. También se muestra un gran efecto sobre la transferencia de calor, provocando así un calentamiento rápido. Una configuración basada en descarga de pulsos de nanosegundos es básicamente la misma que la de la DBD normal, también denominada AC-DBD en este contexto, comentado anteriormente. Todos los ajustes comentados son válidos y aplicables para ambos.

En una configuración de ns-DBD, el efecto Joule es clave. El calentamiento del aire alrededor del sistema es tan rápido que produce ondas de compresión que se propagan a velocidades sónicas. En los sistemas de ns-DBD, la excitación se produce mediante pulsos de alta tensión (5-50 kV) con un tiempo de aumento del orden de decenas de nanosegundos y con una duración de entre 5 ns y 200 ns, como se observa en la figura 11.

La figura 11 muestra una forma típica de un solo pulso que se repite según una determinada frecuencia. Estos pulsos se usan en la denominada configuración de ns-DBD. La aplicación de la configuración de ns-DBD es un elemento antihielo debido a una gran capacidad para generar calor con el fin de evitar la formación de hielo en los aviones.

Las figuras 12A-12B presentan resultados experimentales para calentamiento. La figura 12A muestra la variación de temperatura a lo largo del tiempo de una realización de un sistema en la configuración de la figura 8A. Asimismo, la figura 12B muestra la variación de temperatura en una línea paralela al borde “1b” y ubicada a 5 mm del borde mencionado. Puede lograrse un aumento de casi 100 °C en aproximadamente 20 segundos. Los ajustes particulares usados son una frecuencia de 1500 Hz, una amplitud de 16 kV y la forma de onda es un pulso de nanosegundos. Las frecuencias más altas pueden lograr resultados incluso mejores.

Un aumento en la tensión y la frecuencia implica aumentar la capacidad de calentamiento en un sistema anticongelante o de descongelación. Aún alternativa o adicionalmente, puede lograrse un aumento en la región calentada mediante una configuración de “descarga deslizante” de la figura 8G.

En cuanto a la capacidad de enfriamiento, debe tenerse cuidado para obtener el resultado deseado, si se aumenta la tensión o la frecuencia con el objetivo de generar más viento iónico, también se obtiene un aumento en la temperatura del propio viento. El aumento en la temperatura puede neutralizar la mejora esperada. Incluso puede provocar el efecto opuesto, tal como puede observarse en las siguientes figuras. La unidad de control tiene en cuenta este efecto para controlar adecuadamente la fuente de alimentación y no revertir el objetivo previsto.

La figura 13A muestra la variación de temperatura a lo largo del tiempo para una placa plana calentada a 70 °C bajo la acción de una realización del sistema de la figura 4. La tensión de alimentación se fija a 20 kV_{pp} de amplitud, mientras que la frecuencia aumenta. Como puede observarse, un aumento en la frecuencia implica una mayor disminución de temperatura de la placa y, por consiguiente, un aumento de la capacidad de enfriamiento. Pero esta capacidad de enfriamiento disminuye cuando se aumenta la frecuencia, revirtiendo incluso la tendencia. El aumento de la velocidad del viento iónico puede provocar un aumento de la temperatura del propio viento, de modo que después de un tiempo determinado, la placa puede volver a calentarse. La unidad de control monitoriza este comportamiento para aplicar una configuración que lo contrarreste si es necesario.

La figura 13B muestra un comportamiento similar en un gráfico con varias curvas que representan la variación de temperatura a lo largo del tiempo a una frecuencia fija de 1 kHz, cada curva se corresponde con un valor de amplitud de tensión. Puede observarse que cada aumento en la tensión representa una pequeña mejora en el enfriamiento, anulándola y revirtiéndola cuando los valores de tensión son mayores de 22 kVpp.

Las curvas de las figuras 13A y 13B sugieren que es posible enfriar aplicando el efecto DBD a cambio de un rendimiento limitado y un alto consumo de energía. Este problema se aborda realizando un conjunto de acciones algo opuestas.

EJEMPLOS

A continuación, en el presente documento, se describe la presente invención específicamente con referencia a algunos ejemplos, que sin embargo no pretenden limitar la presente invención.

Con la unidad de control se logra un control dinámico de los ajustes de la fuente de alimentación.

Parámetros de ajuste para enfriamiento:

Debe establecer una frecuencia lo más baja posible. Los actuadores DBD funcionan en el intervalo de 1 kHz a 50 kHz de forma regular. Ventajosamente, el presente sistema permite reducir la frecuencia de funcionamiento en al menos uno o dos órdenes de magnitud, siendo el intervalo óptimo menor de 100 Hz. Para estas frecuencias más bajas, el viento iónico tiene poca capacidad de enfriamiento, por lo que la unidad de control aumenta la tensión de excitación a valores del orden de 25 kV_{pp}.

También pueden proporcionarse varias recomendaciones para los parámetros de construcción. En primer lugar, al imponer una separación entre el electrodo expuesto y el electrodo encapsulado, esto implica una región de plasma más pequeña y un viento iónico más débil. Sin embargo, una distancia entre los electrodos también provoca una descarga no homogénea. Es decir, la descarga no tiene un comportamiento repetible.

En segundo lugar, para compensar la falta de homogeneidad de la descarga, el electrodo expuesto, que habitualmente es recto tal como se muestra en la figura 5A, se reemplaza por un electrodo de diente de sierra tal como se ilustra en la figura 5B, haciendo que las descargas comiencen siempre en los dientes del electrodo. La descarga será más homogénea y el campo eléctrico más intenso, compensando los inconvenientes de separar los dos electrodos, aumentando el parámetro d.

Con estas acciones de diseño y funcionamiento se consigue un viento iónico con un mínimo incremento en la temperatura. Por tanto, puede lograrse un excelente enfriamiento con un mínimo consumo de energía.

En resumen, para lograr una buena capacidad de enfriamiento, se sigue un enfoque particular que se aleja del funcionamiento normal de un actuador DBD. Se usa un intervalo de frecuencia diferente, se requiere una separación entre los electrodos, así como una forma particular para controlar la descarga.

Ejemplo de una actuación de enfriamiento

Considérense como entradas una temperatura del cuerpo de 70 grados Celsius y una temperatura objetivo de 40 grados Celsius. Una temperatura ambiente de aproximadamente 25 grados Celsius impone algunas condiciones y/o restricciones. Cuanto mayor es la temperatura ambiente, menor es el flujo de calor disipado de la superficie del cuerpo. Por otro lado, una temperatura ambiente más baja permite alcanzar una temperatura del cuerpo más baja.

Parámetros de construcción:

Grosor del orden de 0,5 mm (material Kapton).

Separación d entre los electrodos mayor de 0 mm, preferiblemente 3 mm.

Parámetros de ajuste:

i. Vpp < 40 kVpp

ii. f > 50 Hz

iii. Forma de onda: CA (sinusoidal, cuadrada...)

iv. Posibilidad de actuación con un ciclo de trabajo para reducir el consumo.

En el caso de un grosor dieléctrico mayor, la separación d puede reducirse hasta 0 mm.

i. Vpp > 12 kVpp

ii. f > 500 Hz

iii. Forma de onda: CA (sinusoidal, cuadrada...)

iv. Posibilidad de actuar con un ciclo de trabajo para reducir el consumo.

Parámetros de ajuste para calentamiento:

Debe configurarse una frecuencia y amplitud de la tensión lo más alta posible. La unidad de control trabajará con un margen de seguridad para evitar sobrepasar la temperatura del dieléctrico usado y su ruptura dieléctrica. Los actuadores DBD funcionarán en el intervalo de varios kHz y decenas de kV de forma regular.

Ejemplo de una actuación de calentamiento

Considérense como entradas una temperatura del cuerpo de -10 grados Celsius y una temperatura objetivo de 10 grados Celsius. En caso de que la temperatura ambiente sea igual a o menor que la temperatura del cuerpo, será necesario una mayor entrada aporte de energía.

Parámetros de construcción:

El espacio disponible en la aplicación condicionará el tipo y el grosor del material dieléctrico que ha de usarse. El uso de Kapton con un grosor de 0,5 mm permite superponer los electrodos, desde d negativa hasta 0 mm.

Parámetros de ajuste:

i. V > 10 kV

ii. f > 2 kHz

iii. Forma de onda: preferiblemente nanopulsos

Estas y otras características, funciones y ventajas que se han comentado pueden lograrse de forma independiente en varias realizaciones o pueden combinarse aún en otras realizaciones.

REIVINDICACIONES

1. Sistema para controlar la temperatura de un cuerpo (6) que comprende:

un actuador DBD (9) configurado para poder conectarse a una fuente de alimentación y producir un viento iónico sobre el cuerpo;

una unidad de control (8) configurada para considerar una configuración inicial y para controlar la fuente de alimentación (5) dependiendo de una diferencia de temperatura (ΔT) entre una temperatura de entrada (T_i) y una temperatura objetivo (T_{ta}) sobre el cuerpo (6),

en el que la configuración inicial comprende los siguientes parámetros de construcción del actuador DBD: número de electrodos, forma y geometría de los electrodos, posición relativa entre los electrodos (d), material dieléctrico, grosor dieléctrico (e),

en el que la configuración inicial comprende además los siguientes parámetros de ajuste de la fuente de alimentación (5): un valor de frecuencia (f), un valor de amplitud (V), una señal de forma de onda y un ciclo de trabajo,

en el que la unidad de control (8) está configurada además para ajustar la configuración inicial modificando cualquiera de los parámetros de ajuste para controlar el calor transferido al viento iónico producido;

en el que el sistema comprende además un sensor de temperatura (7) configurado para medir una temperatura (T_b) de la superficie del cuerpo, en el que se proporciona a la unidad de control (8) la temperatura medida (T_b) como temperatura de entrada;

estando el sistema caracterizado porque

la unidad de control (8) está configurada para aplicar una configuración de enfriamiento si la temperatura objetivo es menor que la temperatura del cuerpo (6) y/o está configurada para aplicar una configuración de calentamiento si la temperatura objetivo es mayor que la temperatura del cuerpo (6),

en el que la configuración de enfriamiento comprende un valor de frecuencia menor que un límite máximo de frecuencia de enfriamiento y un valor de amplitud mayor que un límite mínimo de amplitud de enfriamiento, y

en el que la configuración de calentamiento comprende un valor de frecuencia superior a un límite mínimo de frecuencia de calentamiento, un valor de amplitud menor que un límite máximo de amplitud de calentamiento.

2. Sistema según la reivindicación 1, en el que el actuador DBD (9) comprende componentes flexibles o se adapta a una forma específica.

3. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el material dieléctrico (3) en el actuador DBD (9) tiene un grosor no constante.

4. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores que comprende múltiples actuadores DBD.

5. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el control del sistema está prefijado o se gestiona manualmente.

6. Sistema según la reivindicación 5, en el que el límite máximo de frecuencia de enfriamiento está en el intervalo de 10 Hz a 5 kHz y el límite mínimo de amplitud de enfriamiento está en el intervalo de 5 kV_{pp} a 40 kV_{pp}.

7. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 5 o 6, en el que el límite máximo de frecuencia de enfriamiento está en el intervalo de 10 Hz a 100 Hz.

8. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 5 a 7, donde la separación (d) entre los bordes de los electrodos (1, 2) es de entre 0 y 8 mm.

9. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 5 a 8, donde el electrodo expuesto del actuador DBD tiene un borde no recto (1b), preferiblemente una forma de diente de sierra (figura 5B).

10. Sistema según la reivindicación 1, en el que el actuador DBD (9) comprende un tercer electrodo (13), en el que el tercer electrodo (13) y el primer electrodo (1) están ubicados en el mismo lado del medio dieléctrico, en el que el tercer electrodo (13) está conectado eléctricamente al primer electrodo (1) o al segundo electrodo (2) o a una fuente de alimentación externa (CA o CC) o permanece como electrodo flotante.

11. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 1 o 12, donde la separación (d) entre los bordes (1b y 2b) de los electrodos (1, 2) es negativa, estando ambos electrodos superpuestos parcial o completamente.

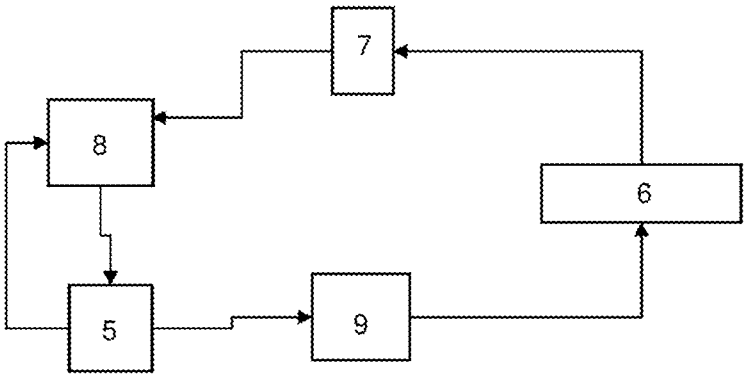

7
8
6
5
9

Fig. 1

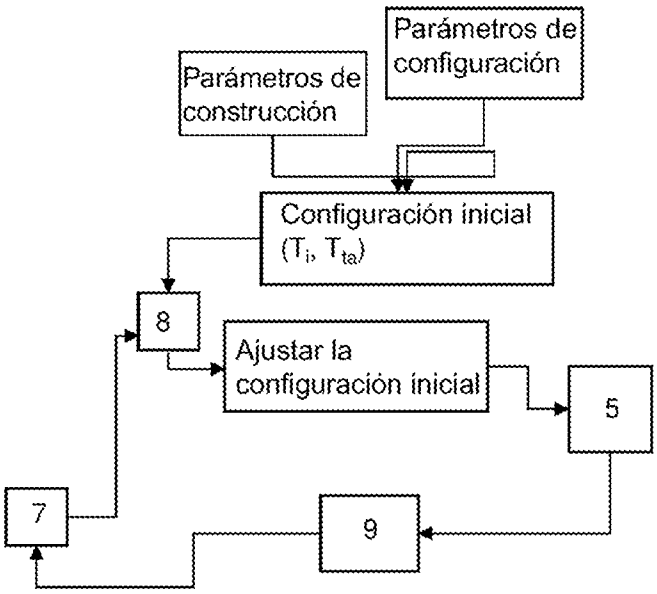

Parámetros de configuración
Parámetros de construcción
Configuración inicial (T_i, T_{ta})
8
Ajustar la configuración inicial
5
7
9

Fig. 2

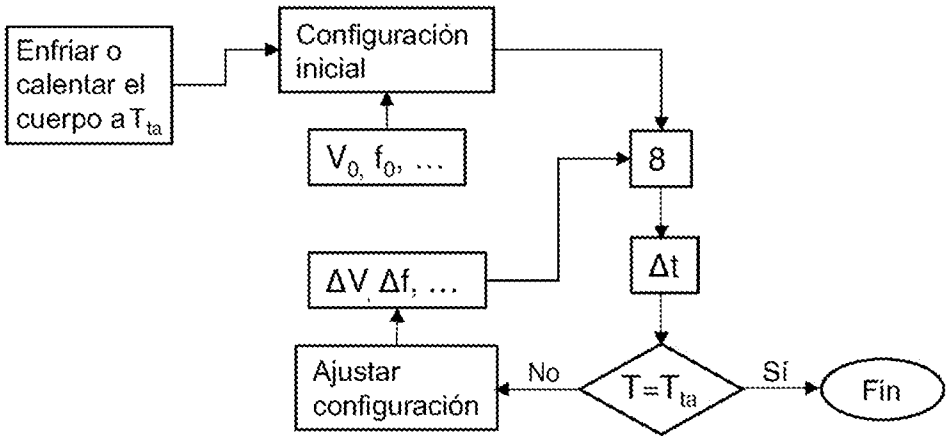


Fig. 3

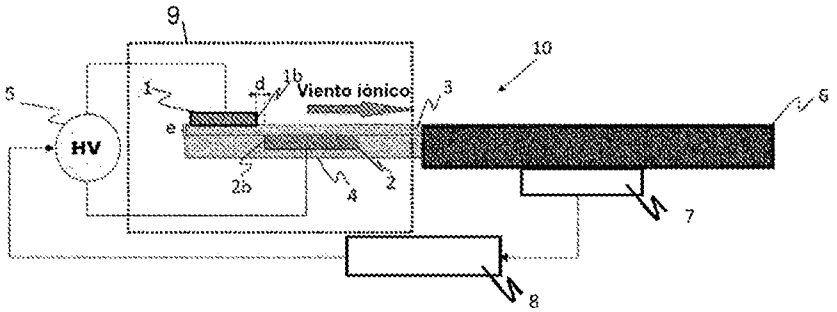


Fig. 4

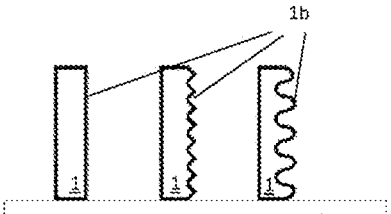


Fig. 5A Fig. 5B Fig. 5C

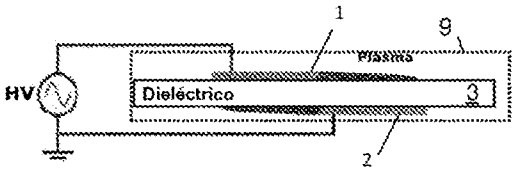


Fig. 6A

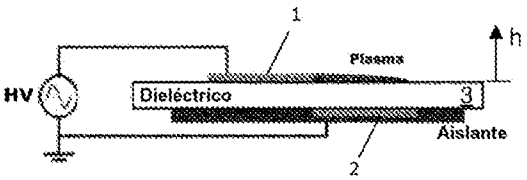


Fig. 6B

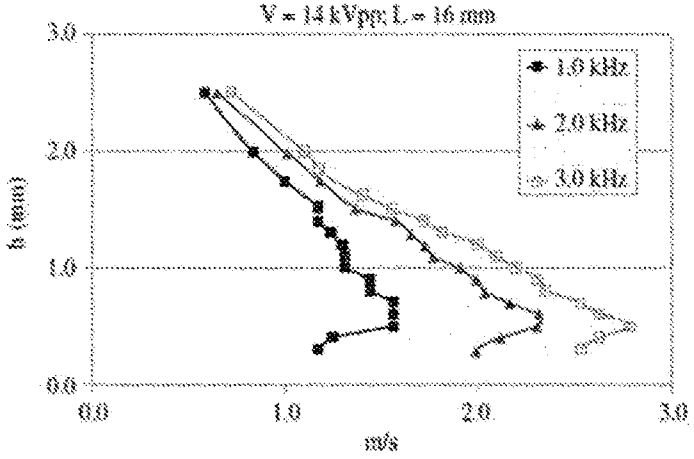


Fig. 7

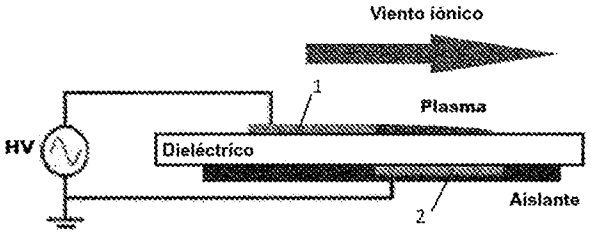


Fig. 8A

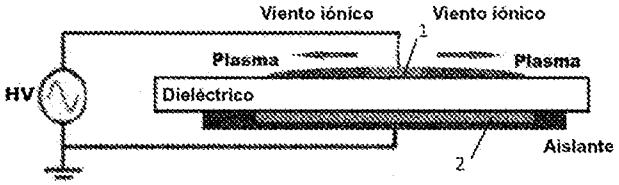


Fig. 8B

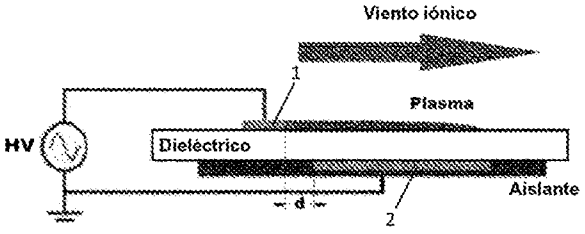


Fig. 8C

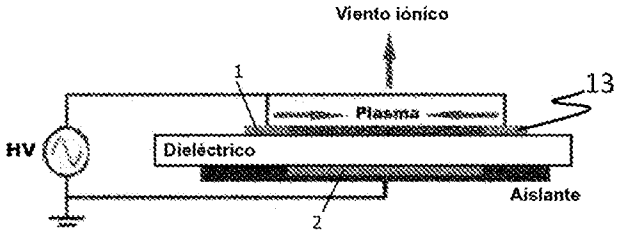


Fig. 8D

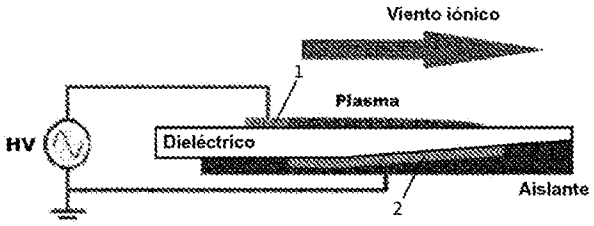


Fig. 8E

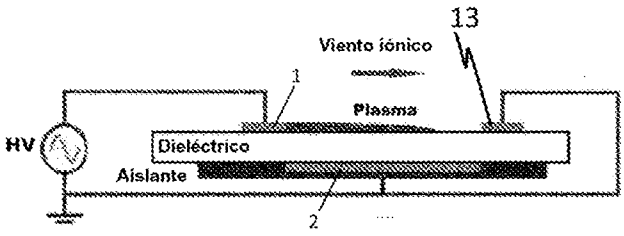


Fig. 8F

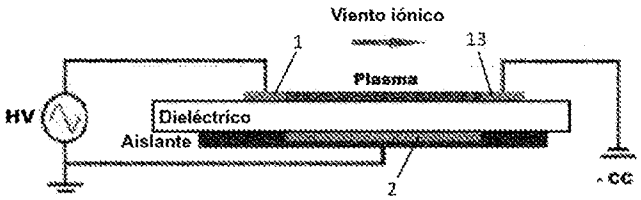


Fig. 8G

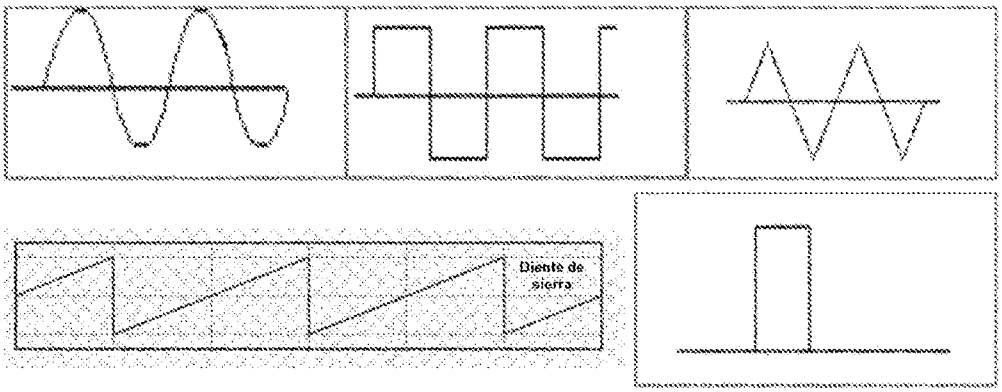


Fig. 9

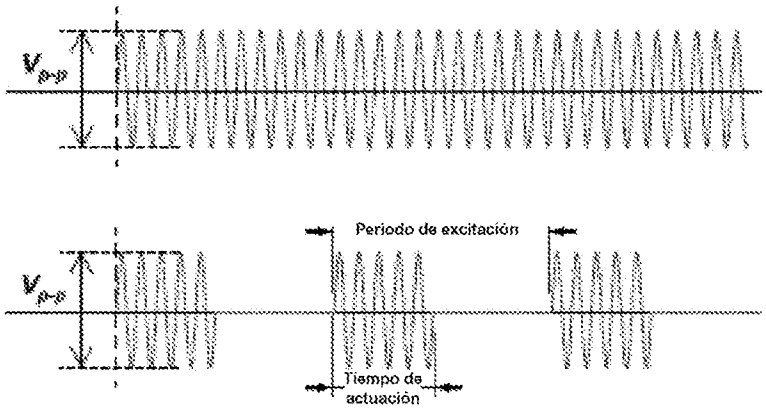


Fig. 10

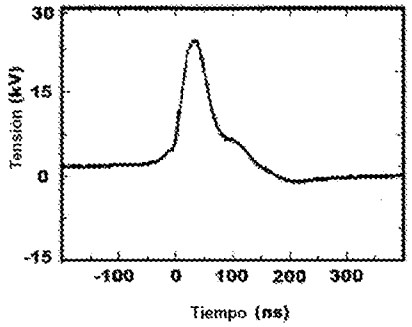


Fig. 11

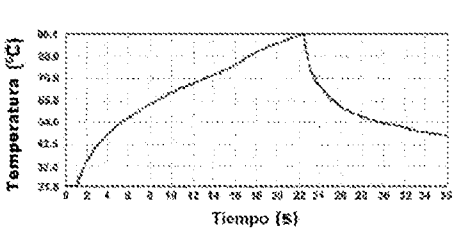


Fig. 12A

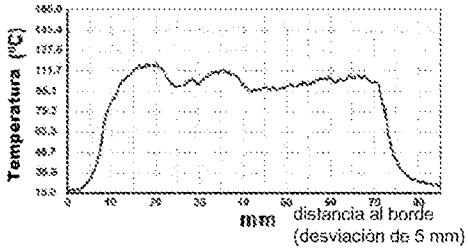


Fig. 12B

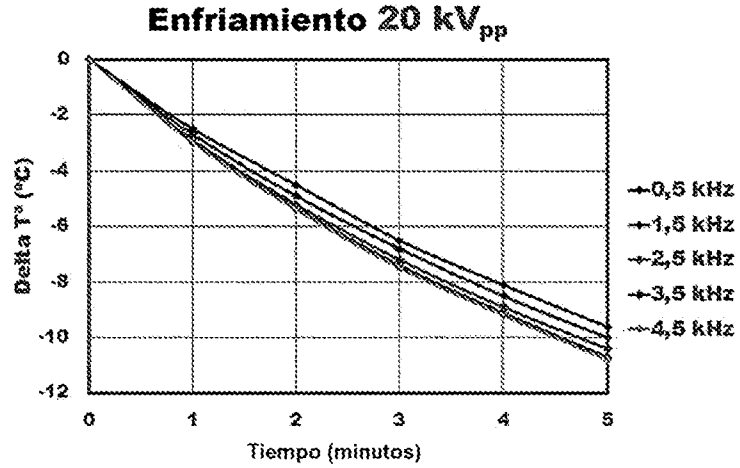


Fig. 13A

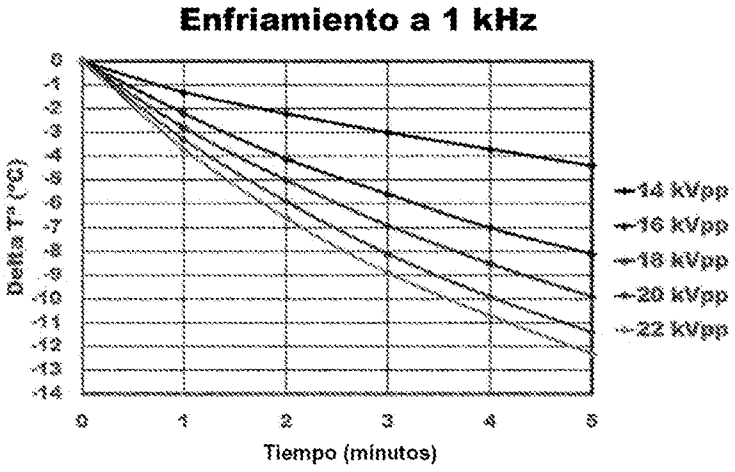


Fig. 13B