

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 660 213**

51 Int. Cl.:

**F03H 1/00**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **19.05.2010 PCT/FR2010/050963**

87 Fecha y número de publicación internacional: **25.11.2010 WO10133802**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **19.05.2010 E 10728782 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **03.01.2018 EP 2433002**

54 Título: **Propulsor de plasma de efecto Hall**

30 Prioridad:

**20.05.2009 FR 0953370**

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

**21.03.2018**

73 Titular/es:

**SNECMA (25.0%)  
2 Bld du Général Martial Valin  
75015 Paris, FR;  
INSTITUTE OF FUNDAMENTAL  
TECHNOLOGICAL RESEARCH POLISH  
ACADEMY OF SCIENCES (25.0%);  
CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES  
(25.0%) y  
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE (25.0%)**

72 Inventor/es:

**BARRAL, SERGE y  
ZURBACH, STÉPHAN J.**

74 Agente/Representante:

**ELZABURU, S.L.P**

**ES 2 660 213 T3**

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

**DESCRIPCIÓN**

Propulsor de plasma de efecto Hall

**Campo de la invención**

5 La presente invención tiene por objeto un propulsor de plasma de efecto Hall que comprende un canal anular principal de ionización y de aceleración que presenta un extremo aguas abajo abierto, al menos un cátodo, un ánodo anular concéntrico con el canal anular principal, una canalización y un distribuidor para alimentar con gas ionizable el canal y un circuito magnético de creación de un campo magnético dentro de dicho canal anular principal.

En particular, la invención se refiere a los propulsores de plasma de efecto Hall puestos en práctica para la propulsión eléctrica de satélites.

**10 Técnica anterior**

La vida útil de los propulsores de plasma de efecto Hall viene determinada esencialmente por la erosión del canal aislante de cerámica por efecto del bombardeo de los iones. En efecto, por motivo de la topografía del potencial eléctrico dentro del canal, una parte de los iones creados se ve acelerada radialmente hacia las paredes.

15 El alargamiento de las misiones de los satélites de comunicaciones y el incremento de las velocidades de eyección de plasma requeridas (en particular, para los propulsores llamados de gran impulso específico) imponen vidas útiles cada más largas que las cerámicas convencionales basadas en nitruro de boro ya no pueden cumplir.

La gran resistencia frente al bombardeo iónico de ciertos materiales eléctricamente conductores o semiconductores tales como el grafito hacen de ellos, teóricamente, candidatos idóneos para el canal de descarga de los propulsores de efecto Hall.

20 La idea de emplear materiales conductores, y en particular el grafito, fue estudiada en Estados Unidos por Y. Raitses et al. (Universidad de Princeton). Estos estudios han destacado lo ventajoso del grafito en cuanto a vida útil, pero no han tratado de solucionar el problema de bajada de rendimiento ligado a la entrada en cortocircuito del plasma.

Los escasos rendimientos observados con los materiales conductores han impedido hasta la fecha la generalización de su empleo en la construcción de canales de aceleración de propulsores de plasma.

25 De este modo, actualmente, los canales de descarga de los propulsores de efecto Hall se constituyen a partir de cerámica aislante homogénea, las más de las veces basada en nitruro de boro y en sílice (materiales BN-SiO<sub>2</sub>). Las cerámicas basadas en nitruro de boro permiten que los propulsores de efecto Hall alcancen elevadas prestaciones en cuanto a rendimiento, pero presentan altos índices de erosión bajo bombardeo iónico que limitan la vida útil de los propulsores a aproximadamente 10 000 horas, así como su funcionamiento a impulsos específicos más altos.

30 El documento US 2002/008455 A1 describe un ejemplo de propulsor de plasma de efecto Hall.

**Definición y objeto de la invención**

La presente invención tiene como propósito subsanar los citados inconvenientes y, en particular, incrementar la vida útil de los propulsores de plasma de efecto Hall, al propio tiempo que permite un elevado rendimiento energético.

35 Estos propósitos se consiguen, de conformidad con la invención, gracias a un propulsor de plasma de efecto Hall que comprende un canal anular principal de ionización y de aceleración que presenta un extremo aguas abajo abierto, al menos un cátodo, un ánodo anular concéntrico con el canal anular principal, una canalización y un distribuidor para alimentar con gas ionizable el canal y un circuito magnético de creación de un campo magnético dentro de dicho canal anular principal, caracterizado por que el canal anular principal comprende porciones de paredes anulares interna y externa situadas en las proximidades de dicho extremo abierto que comprenden sendos  
40 ensambles de anillos conductores o semiconductores yuxtapuestos en forma de laminillas separados por capas finas de aislante.

Ventajosamente, cada anillo conductor o semiconductor está dividido en segmentos dispuestos según sectores angulares y aislados entre sí.

45 Preferentemente, los segmentos de cada anillo conductor o semiconductor están dispuestos al tresbolillo con respecto a los segmentos de los anillos conductores o semiconductores vecinos.

De acuerdo con una característica preferente de la invención, las capas finas de aislante están dispuestas sobre todas las caras de un anillo conductor o semiconductor, a excepción de la cara que define una parte de la pared interna del canal anular principal.

50 El ensamble de anillos conductores o semiconductores puede abarcar una longitud de las paredes anulares interna y externa inferior a la longitud total del canal anular principal.

De acuerdo con una forma de realización particular, los anillos conductores o semiconductores son de grafito, mientras que las capas finas de aislante son de material dieléctrico, y en particular de nitruro de boro pirolítico.

El espesor de los anillos conductores o semiconductores es del orden del radio de Larmor electrónico.

Su espesor máximo  $a$  se estima mediante la siguiente expresión:  $a < \frac{8}{3} r$ , donde  $r$  es el radio de Larmor de los

5 electrones, así como una condición que determina el ángulo de corte acimutal:  $R \alpha < 5 \text{abs} \left( \frac{E_z}{E_t} \right) r$  con:

- $E_z, E_t$ : campo eléctrico a lo largo del eje y del acimut,
- $R$ : radio de borde de la porción de anillo en contacto con el plasma,
- $\alpha$ : ángulo de la porción de anillo.

10 De acuerdo con un ejemplo de realización, los anillos conductores o semiconductores presentan un espesor comprendido entre 0,7 y 0,9 mm, en tanto que las capas finas de aislante presentan un espesor comprendido entre 0,04 y 0,08 mm.

De acuerdo con la invención, un canal de descarga pseudoaislante está realizado a partir de un apilamiento de anillos o de porciones de anillos hechos de un material conductor o semiconductor y recubiertos con una capa fina de cerámica aislante.

15 Esto permite un incremento de la vida útil del propulsor en un factor de 3 a 4 sin pérdida posible de rendimiento, en cuanto la estructura permite beneficiarse de las ventajas de bajo índice de erosión de los materiales conductores sin padecer sus inconvenientes, y el canal puede comportarse como un aislante eléctrico frente al plasma con una limitación al máximo de las corrientes electrónicas creadas dentro del canal de descarga.

20 Así, la invención optimiza la estructura de los canales de descarga de los propulsores de plasma de efecto Hall poniendo en práctica una partición de paredes conductoras o semiconductoras en segmentos aislados de escasas dimensiones que redundan en una gran disminución de la corriente de cortocircuito, que evita una pérdida sensible de rendimiento.

25 La propulsión de los satélites de telecomunicaciones lleva aparejadas grandes implicaciones económicas, y las mejoras que pueden ser introducidas en las fuentes de plasma de efecto Hall –actualmente reconocidas como las más eficientes para el mantenimiento en posición– revisten un gran interés. La presente invención atiende directamente a la tendencia al incremento de las duraciones de misiones que se demandan a los satélites geoestacionarios, mejorando la duración útil de los propulsores de plasma de efecto Hall.

30 Asimismo, la presente invención permite hacer funcionar propulsores con impulsos específicos (Isp) más elevados, al propio tiempo que conserva una vida útil significativa. Por lo tanto, puede proveer de una considerable ventaja competitiva de la propulsión mediante propulsor de plasma de efecto Hall.

### Breve descripción de los dibujos

Otras características y ventajas de la invención se desprenderán de la siguiente descripción de formas particulares de realización, dadas a título de ejemplo, con referencia a los dibujos que se acompañan, en los cuales:

35 la figura 1 es una vista esquemática en perspectiva seccionada de un propulsor de plasma de efecto Hall en el que tiene aplicación la invención,

la figura 2 es una vista en perspectiva de un cuarto de un canal de descarga con estructura laminada según un ejemplo de realización de la invención,

la figura 3 muestra una variante propuesta y es una vista en perspectiva del conjunto de la estructura laminada de un canal de descarga de un propulsor de plasma de efecto Hall según la invención,

40 la figura 3A muestra una variante propuesta y es un detalle ampliado de un segmento de material conductor o semiconductor recubierto de depósitos aislantes utilizado en la estructura laminada de la figura 3, y

la figura 3B es una sección por la línea IIIB-IIIB de la figura 3A.

### Descripción detallada de formas preferentes de realización

45 Se ve en la figura 1 un ejemplo de propulsor de plasma de efecto Hall, también denominado propulsor de plasma estacionario (PPE), en el cual tiene aplicación la invención y que puede ser llevado a la práctica especialmente para

la propulsión eléctrica de satélites.

Tal tipo de propulsor de efecto Hall comprende los siguientes elementos principales:

- un canal de descarga o canal anular principal de ionización y de aceleración 120,
- un ánodo anular 125 concéntrico con el canal anular principal 120,
- 5 - una canalización 126 y un distribuidor asociado al ánodo 125 y al canal anular principal 120 para alimentar el mismo con un gas ionizable tal como el xenón,
- un cátodo hueco 140,
- un circuito magnético 131 a 136 de creación de un campo magnético dentro del canal anular principal.

10 El ánodo 125 y el distribuidor de gas ionizable permiten inyectar el combustible (tal como el xenón) en el propulsor y recoger los electrones de la descarga de plasma.

El cátodo hueco 140 tiene como función generar los electrones que permiten la creación de un plasma en el propulsor, así como la neutralización del chorro de iones eyectados por el propulsor.

15 El circuito magnético comprende un polo interno 134, un polo externo 136, una culata magnética que une los polos interno 134 y externo 136, con un núcleo ferromagnético 133 y varillas ferromagnéticas periféricas 135, una o varias bobinas 131 dispuestas alrededor del núcleo central 133 y bobinas 132 dispuestas alrededor de las varillas periféricas 135.

El circuito magnético permite el confinamiento del plasma y la creación de un fuerte campo magnético E a la salida del propulsor, que permite la aceleración de los iones a velocidades del orden de hasta 20 km/s.

20 Son posibles diferentes variantes para la realización del circuito magnético, y la presente invención no queda limitada a la forma de realización descrita en la figura 1.

El canal de descarga 120 permite el confinamiento del plasma, y su composición determina las prestaciones del propulsor.

25 Tradicionalmente, el canal de descarga 120 es de cerámica. El empuje del motor recae en la eyección de un chorro de iones a alta velocidad. Ahora bien, al ser este chorro ligeramente divergente, la colisión de los iones de alta energía con la pared del canal conduce a una erosión de la cerámica a la salida del propulsor.

30 Por este motivo, de conformidad con la invención, el canal de descarga 120 comprende al menos una porción 127 de la pared anular interna y al menos una porción 128 de la pared anular externa, situadas en las proximidades del extremo abierto 129 del canal, que no están realizadas en cerámica maciza, sino que comprenden sendos ensambles de anillos conductores o semiconductores 150 yuxtapuestos en forma de laminillas separadas por capas finas de aislante 152 (véase la figura 2).

35 La invención tiene como propósito reducir de manera significativa la erosión del canal de descarga del propulsor. Asimismo, permite reducir las pérdidas energéticas y las inestabilidades de descarga que suelen afectar a los propulsores de efecto Hall que utilizan un canal de descarga de material eléctricamente conductor o semiconductor. Al propio tiempo que utiliza materiales tales como el grafito y los carburos, más resistentes que las cerámicas frente al bombardeo iónico, merced a un ensamble de anillos conductores o semiconductores (por ejemplo, de grafito) separados por capas finas de aislante (por ejemplo, de nitruro de boro), la invención permite a la vez reducir la erosión del canal y disminuir las inestabilidades de descarga.

40 Así, el canal de descarga 120 de un propulsor de plasma según la invención puede comprender a la vez una parte aguas arriba tradicional de cerámica con una pared de fondo 123 y paredes cilíndricas externa 121 e interna 122 y una parte aguas abajo que, situada entre la parte aguas arriba y la abertura 129, comprende paredes cilíndricas externa 128 e interna 127 con una estructura laminada compuesta a partir de anillos conductores o semiconductores 150 yuxtapuestos, que están aislados por capas finas de aislante 152, pero presentan una cara 151 no recubierta de aislante por el lado interno dirigido hacia el espacio interior 124 del canal anular 120.

45 Con objeto de eliminar las ocasionales corrientes de cortocircuito acimutales inducidas por variaciones de potencial a lo largo del acimut (defectos de simetría, ondas acimutales, ...), de manera preferente, se procede además a un posicionamiento de los anillos 150 en varias secciones angulares aisladas que se extienden en sendos sectores angulares  $\Delta\theta$  (figuras 3 y 3A). Así, se puede ver, por ejemplo, entre 10 y 30 segmentos 150a, 150b en cada anillo 150.

50 Ventajosamente, los segmentos 150a de un anillo conductor o semiconductor 150 están dispuestos al tresbolillo con respecto a los segmentos 150b de los anillos vecinos 150 (fig. 3).

Tal como puede verse en la figura 3A, las capas finas de aislante 152, 153, 154, 155 están dispuestas sobre todas las caras de un segmento de un anillo conductor o semiconductor 150, a excepción de la cara 151 que define una parte de la pared interna del canal anular principal 120.

5 A título de ejemplo, el ensamble de anillos conductores 150 abarca una longitud de las paredes anulares interna y externa comprendida entre el 20 y el 50 %, y preferentemente entre el 30 y el 40 % de la longitud total del canal anular principal 120, aunque este margen de valores no es limitativo.

10 El dimensionamiento de los anillos conductores o semiconductores 150 se puede establecer a partir del cálculo de las corrientes electrónicas recibidas y emitidas por las paredes. En primera aproximación, se puede mostrar que la corriente de cortocircuito que circula por las paredes es proporcional a la corriente iónica recogida que, a temperatura electrónica y densidad de plasma constantes, es aproximadamente proporcional a la superficie conductora en contacto con el plasma.

15 Por otro lado, para un campo eléctrico axial dado, la diferencia de potencial acusada por un elemento conductor es aproximadamente proporcional a su extensión axial. Como consecuencia de ello, para un canal de tamaño dado, el conjunto de las pérdidas por efecto Joule por cortocircuito del plasma es aproximadamente proporcional al espesor de los anillos. Asimismo, se puede mostrar que la corriente de cortocircuito se hace despreciable ante las corrientes ligadas a la emisión electrónica secundaria (que son las únicas que existen en el caso de un aislante) cuando el espesor de los anillos es del orden del radio de Larmor electrónico. Esto define el espesor crítico de los anillos que permite obtener un canal pseudoaislante.

20 A título de ejemplo, los anillos conductores 150, por ejemplo de grafito con bajo coeficiente de dilatación, pueden presentar un espesor comprendido entre 0,7 y 0,9 mm y típicamente de 0,8 mm.

25 Las capas finas de aislante 152 a 155, por ejemplo de nitruro de boro pirolítico, pueden presentar un espesor comprendido entre 0,04 y 0,08 mm, típicamente 0,05 mm, y se pueden depositar sobre los segmentos de anillos conductores 150 mediante un procedimiento de deposición química en fase vapor, en orden a recubrir cada segmento de anillo en toda su superficie, exceptuando en el borde 151 en contacto con el plasma.

**REIVINDICACIONES**

- 5 1. Propulsor de plasma de efecto Hall que comprende un canal anular principal de ionización y de aceleración (120) que presenta un extremo aguas abajo abierto (129) y que incluye porciones de paredes anulares interna (127) y externa (128) que, situadas en las proximidades de dicho extremo abierto (129), comprenden sendos ensambles de anillos conductores o semiconductores (150), al menos un cátodo (140), un ánodo anular (125) concéntrico con el canal anular principal (120), una canalización (126) y un distribuidor para alimentar con gas ionizable el canal (120) y un circuito magnético (131 a 136) de creación de un campo magnético dentro de dicho canal anular principal (120),
- 10 caracterizado por que, dentro del canal anular principal (120), dichas porciones de paredes anulares interna (127) y externa (128) situadas en las proximidades de dicho extremo abierto (129) comprenden sendos ensambles de anillos conductores o semiconductores (150) yuxtapuestos en forma de laminillas separadas por capas finas de aislante (152) cuyo espesor está comprendido entre el 4 y el 12 % del de dichos anillos conductores o semiconductores (150).
- 15 2. Propulsor de plasma según la reivindicación 1, caracterizado por que cada anillo conductor o semiconductor (150) está dividido en segmentos dispuestos según sectores angulares y aislados entre sí.
3. Propulsor de plasma según la reivindicación 2, caracterizado por que los segmentos de cada anillo conductor o semiconductor (150) están dispuestos al tresbolillo con respecto a los segmentos de los anillos conductores o semiconductores (150) vecinos.
- 20 4. Propulsor de plasma según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado por que las capas finas de aislante están dispuestas sobre todas las caras de un anillo conductor o semiconductor (150), a excepción de la cara (151) que define una parte de la pared interna del canal anular principal (120).
5. Propulsor de plasma según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado por que el ensamble de anillos conductores (150) abarca una longitud de las paredes anulares interna (127) y externa (128) comprendida entre el 20 y el 50 % de la longitud total del canal anular principal (120).
- 25 6. Propulsor de plasma según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado por que los anillos conductores o semiconductores (150) son de grafito.
7. Propulsor de plasma según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, caracterizado por que las capas finas de aislante (152) son de nitruro de boro pirrolítico.
8. Propulsor de plasma según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, caracterizado por que el espesor de los anillos conductores o semiconductores (150) es del orden del radio de Larmor electrónico.
- 30 9. Propulsor de plasma según la reivindicación 6, caracterizado por que los anillos conductores o semiconductores (150) presentan un espesor comprendido entre 0,7 y 0,9 mm.
10. Propulsor de plasma según las reivindicaciones 4 y 7, caracterizado por que las capas finas de aislante (152) presentan un espesor comprendido entre 0,04 y 0,08 mm.
- 35 11. Propulsor de plasma según las reivindicaciones 4 y 7, caracterizado por que las capas finas de aislante (152) se depositan sobre los segmentos de anillos conductores o semiconductores (150) mediante un procedimiento de deposición química en fase vapor, en orden a recubrir cada segmento de anillo en toda su superficie, exceptuando en la cara (151) en contacto con el plasma que define una parte de la pared interna del canal anular principal (120).

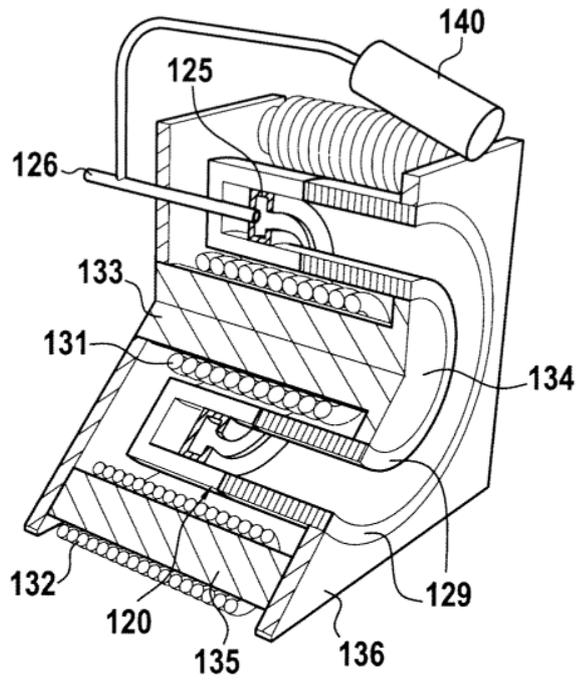


FIG. 1

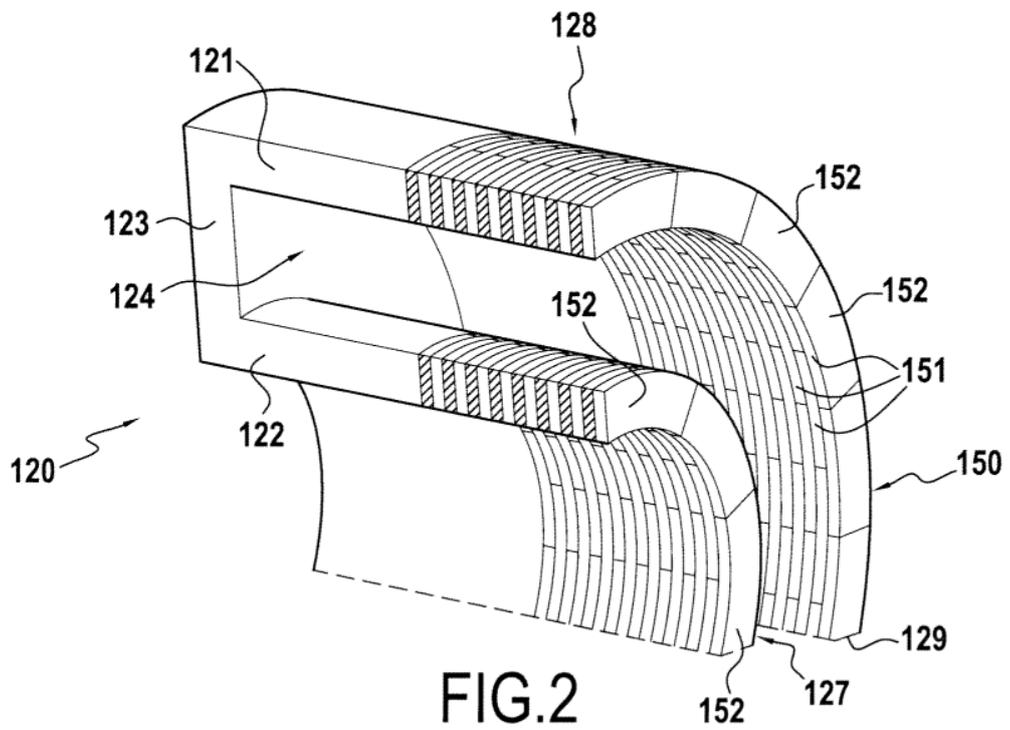


FIG. 2

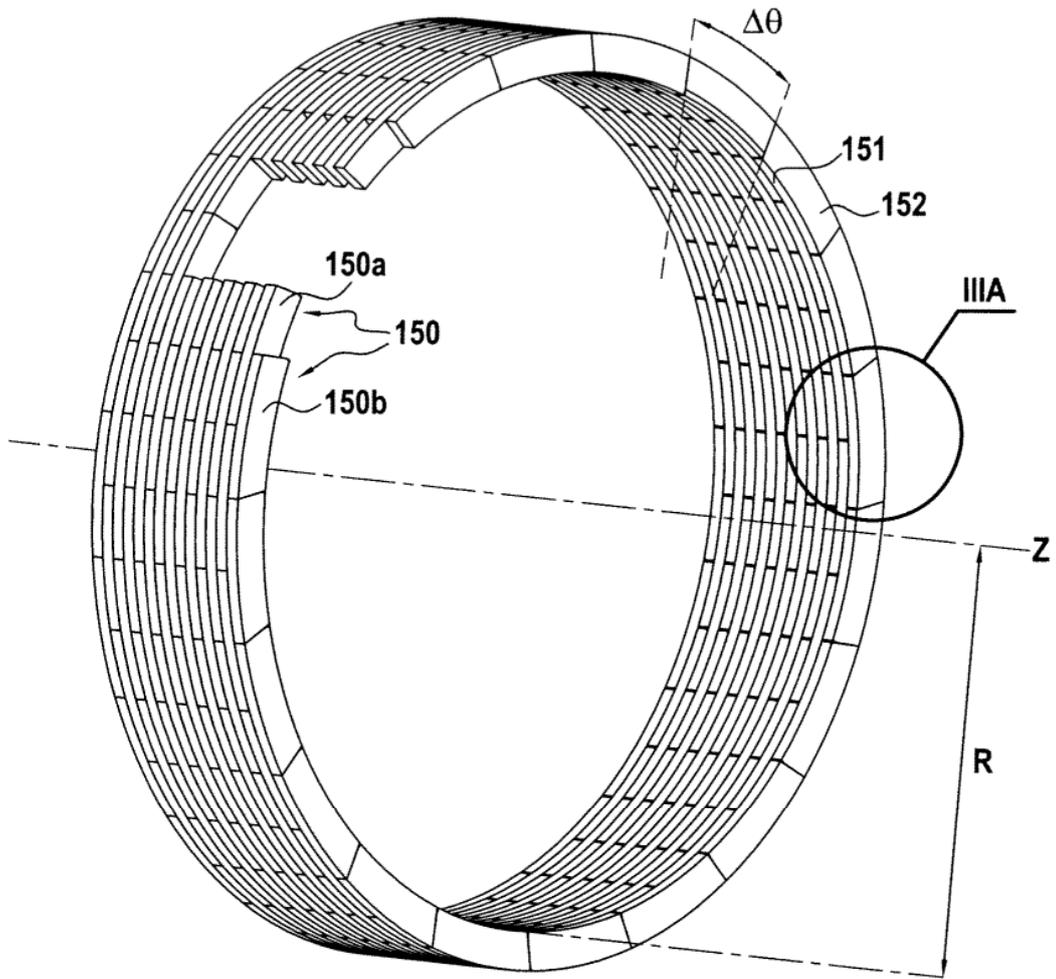


FIG. 3

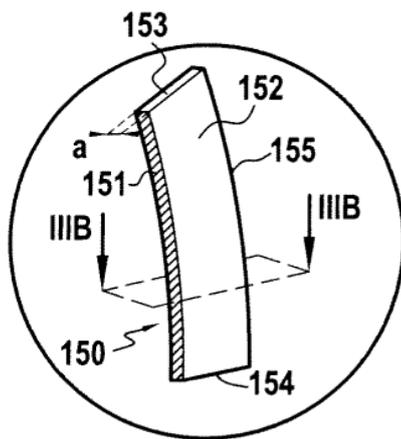


FIG. 3A

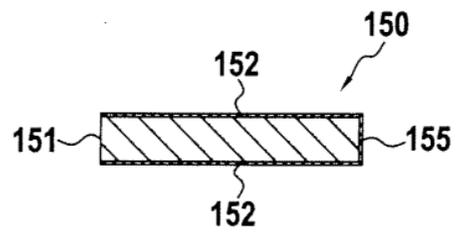


FIG. 3B