



(10) **DE 10 2016 104 490 B3** 2017.05.24

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2016 104 490.3**
(22) Anmeldetag: **11.03.2016**
(43) Offenlegungstag: –
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **24.05.2017**

(51) Int Cl.: **H05H 1/24 (2006.01)**
H01L 41/107 (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
EPCOS AG, 81669 München, DE

(74) Vertreter:
Epping Hermann Fischer,
Patentanwalts-gesellschaft mbH, 80639 München,
DE

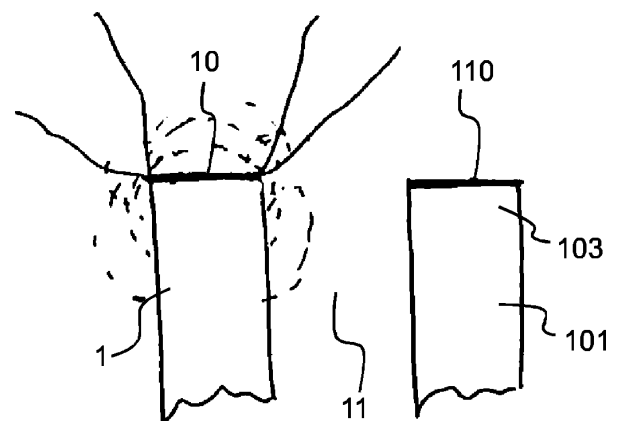
(72) Erfinder:
Weilguni, Michael, Dr., Graz, AT; Kudela, Pavol,
Deutschlandsberg, AT

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	10 2005 032 890	A1
DE	10 2008 057 423	A1
DE	20 2008 008 980	U1
US	7 755 254	B2
EP	1 902 599	B1
JP	2001- 102 195	A

(54) Bezeichnung: **Vorrichtung und Verfahren zur Erzeugung eines nichtthermischen Atmosphärendruck-Plasmas**

(57) Zusammenfassung: Die vorliegende Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Erzeugung eines nichtthermischen Atmosphärendruck-Plasmas, die einen ersten piezoelektrischen Transformator (1), einen zweiten piezoelektrischen Transformator (101) und eine Ansteuerschaltung, die dazu ausgestaltet ist, an jeden der piezoelektrischen Transformatoren (1, 101) eine Eingangsspannung anzulegen, aufweist, wobei die Eingangsspannung, die an den ersten Transformator (1) angelegt wird, gegenüber der Eingangsspannung, die an den zweiten Transformator (101) angelegt wird, um 90° phasenverschoben ist. Ferner betrifft die Erfindung ein Verfahren zur Erzeugung von nichtthermischem Atmosphärendruck-Plasma mittels zumindest eines ersten piezoelektrischen Transformators (1) und eines zweiten piezoelektrischen Transformators (101).



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Erzeugung eines nichtthermischen Atmosphärendruck-Plasmas sowie ein Verfahren zur Plasmaerzeugung.

[0002] Die Vorrichtung weist insbesondere einen ersten und einen zweiten piezoelektrischen Transformator auf, an deren Ausgangsseite ein hohes Potential erzeugt wird, das zur Ionisation eines Prozessgases genutzt werden kann. Das Volumen, auf welches das von einem piezoelektrischen Transformator erzeugte Plasma einwirken kann, ist Prinzip bedingt auf einen Bereich vor der Ausgangsseite des piezoelektrischen Transformators beschränkt. Insbesondere bei industriellen Anwendungen ist es häufig erforderlich, eine größere Fläche zu bearbeiten. Dementsprechend sollten hierfür mehrere piezoelektrische Transformatoren verwendet werden, die möglichst eng beieinander angeordnet werden sollten, ohne dass es dabei zu einer gegenseitigen Beeinträchtigung der Transformatoren kommt.

[0003] Aus EP 1902599 B1 ist es bekannt, mehrere in einem geringen Abstand zueinander angeordnete piezoelektrische Transformatoren mit einer um 180° phasenverschobenen Eingangsspannung zu betreiben. Dabei hat es sich jedoch gezeigt, dass eine gegenseitige Auslöschung der von den Transformatoren erzeugten Plasmen unvermeidlich ist.

[0004] DE 102005032890 A1 zeigt eine piezoelektrische Plasmaerzeugungsvorrichtung, bei der piezoelektrische Transformatoren in Phase bzw. um 180° phasenversetzt zueinander angesteuert werden. Weitere Vorrichtungen zur Erzeugung von Plasma sind aus DE 102008008980 A1, DE 202008008980 U1, JP 2001-102195 A und US 7,755,254 B2 bekannt, wobei diesen Dokumenten keine Angaben zur Phasenverschiebung bei der Ansteuerung von Transformatoren zu entnehmen sind.

[0005] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es nunmehr, eine verbesserte Vorrichtung zur Erzeugung eines nichtthermischen Atmosphärendruck-Plasmas anzugeben, die es insbesondere ermöglicht, mehrere piezoelektrische Transformatoren in geringem Abstand zueinander anzuordnen, ohne dass es zu einer Beeinträchtigung der Transformatoren untereinander kommt. Eine weitere Aufgabe ist es, ein verbessertes Verfahren zur Erzeugung von nichtthermischem Atmosphärendruck-Plasma anzugeben.

[0006] Diese Aufgaben werden durch die Vorrichtung gemäß dem vorliegenden Anspruch 1 sowie durch das Verfahren gemäß dem zweiten unabhängigen Anspruch gelöst.

[0007] Es wird eine Vorrichtung zur Erzeugung eines nichtthermischen Atmosphärendruck-Plasmas vorgeschlagen, die einen ersten piezoelektrischen Transformator, einen zweiten piezoelektrischen Transformator und eine Ansteuerschaltung aufweist. Die Ansteuerschaltung ist dazu ausgestaltet, an jeden der piezoelektrischen Transformatoren eine Eingangsspannung anzulegen, wobei die Eingangsspannung, die an den ersten Transformator angelegt wird, gegenüber der Eingangsspannung, die an den zweiten Transformator angelegt wird, um 90° phasenverschoben ist.

[0008] Die Phasenverschiebung ist hierbei stets relativ angegeben. Dementsprechend kann die Angabe einer Phasenverschiebung von 90° als Betrag der Phasenverschiebung betrachtet werden, sofern nicht explizit auf eine positive Phasenverschiebung von $+90^\circ$ oder eine negative Phasenverschiebung von -90° hingewiesen wird.

[0009] Werden die beiden piezoelektrischen Transformatoren mit einer um 90° zueinander verschobenen Eingangsspannung betrieben, so erfolgt eine Plasmagenerierung stets abwechselnd bei dem ersten piezoelektrischen Transformator und bei dem zweiten piezoelektrischen Transformator. Auf diese Weise kann vermieden werden, dass die beiden Transformatoren gleichzeitig Plasma generieren, wodurch die beiden Plasmagenerierungen einander beeinträchtigen würden. Durch ein abwechselndes Erzeugen des Plasmas mit dem ersten und dem zweiten Transformator kann insgesamt eine verbesserte Plasmagenerierungsrate erzielt werden.

[0010] Der erste und der zweite piezoelektrische Transformator können in einem Abstand von weniger als 5 cm zueinander angeordnet sein. Der geringe Abstand der Transformatoren wird dadurch ermöglicht, dass die beiden Transformatoren einander bei der Plasmagenerierung nicht stören. Die beiden Transformatoren sollten einen Abstand von zumindest 5 mm zueinander aufweisen.

[0011] Die Ansteuerschaltung kann derart ausgestaltet sein, dass die Eingangsspannungen, die an die piezoelektrischen Transformatoren angelegt werden, jeweils die gleiche Frequenz aufweisen. Andernfalls würden

die Eingangsspannungen aufgrund einer sich unterscheidenden Frequenz auseinanderlaufen, sodass eine Phasenverschiebung von 90° nicht im Dauerbetrieb eingehalten werden könnte. Außerdem würde es in diesem Fall eine Schwebung und entsprechende Schwebungseffekte geben. Dadurch, dass die Transformatoren mit der gleichen Frequenz angesteuert werden, kann das Ausbilden einer Schwebung vermieden werden.

[0012] Die Transformatoren können mittels eines Schleifverfahrens auf die gleiche Länge und somit die gleiche Resonanzfrequenz getrimmt werden. Alternativ kann zur Ansteuerung der Transformatoren eine Frequenz gewählt werden, die sich aus dem Mittelwert der Resonanzfrequenzen der piezoelektrischen Transformatoren der Vorrichtung ergibt.

[0013] Die Vorrichtung kann ferner weitere piezoelektrische Transformatoren aufweisen, wobei die Ansteuerschaltung dazu ausgelegt sein kann, die Eingangsspannungen an die Transformatoren derart anzulegen, dass Eingangsspannungen, die an zueinander unmittelbar benachbarten Transformatoren anliegen, jeweils um 90° zueinander phasenverschoben sind.

[0014] Durch die Verwendung weiterer piezoelektrischer Transformatoren kann es ermöglicht werden, mit der Vorrichtung eine große Fläche zu bearbeiten, wobei durch eine Erhöhung der Anzahl der piezoelektrischen Transformatoren die gleichzeitig bearbeitbare Fläche vergrößert wird.

[0015] Die piezoelektrischen Transformatoren können parallel zueinander angeordnet sein und eine einzige Zeile bilden.

[0016] Die piezoelektrischen Transformatoren können parallel zueinander angeordnet sein und ein Array mit zumindest zwei Zeilen und zumindest zwei Spalten bilden. Die Ansteuerschaltung kann dazu ausgelegt sein, die Eingangsspannungen an die Transformatoren derart anzulegen, dass die Eingangsspannungen, die an den Transformatoren anliegen, die auf ein und derselben Diagonale des Arrays angeordnet sind, jeweils um 0° zueinander phasenverschoben sind.

[0017] Der erste und der zweite piezoelektrische Transformator können derart angeordnet sein, dass ihre ausgangsseitigen Stirnseiten einander gegenüberliegen. Dabei kann ein zu bearbeitender Gegenstand, beispielsweise eine Folie, durch einen Spalt, der zwischen den ausgangsseitigen Stirnseiten der beiden Transformatoren ausgebildet ist, hindurchgeführt werden. Dementsprechend können zwei einander gegenüberliegende Oberflächen des Gegenstandes gleichzeitig mit von der Vorrichtung erzeugten Plasma beaufschlagt werden.

[0018] Alternativ oder ergänzend kann die Vorrichtung eine erste Gruppe von piezoelektrischen Transformatoren, die den ersten piezoelektrischen Transformator und weitere piezoelektrische Transformatoren aufweist, die parallel zueinander angeordnet sind und eine einzige Zeile bilden, und eine zweite Gruppe von piezoelektrischen Transformatoren, die den zweiten piezoelektrischen Transformator und weitere piezoelektrische Transformatoren aufweist, die parallel zueinander angeordnet sind und eine einzige Zeile bilden, aufweisen. Die erste Gruppe von piezoelektrischen Transformatoren und die zweite Gruppe von piezoelektrischen Transformatoren können einander gegenüberliegend angeordnet sein, wobei die Ansteuerschaltung dazu ausgelegt ist, die Eingangsspannungen an die Transformatoren einer Zeile jeweils derart anzulegen, dass Eingangsspannungen, die an zueinander unmittelbar benachbarten Transformatoren anliegen, jeweils um 90° zueinander phasenverschoben sind, und dass ferner die Eingangsspannungen, die an einander gegenüberliegenden Transformatoren anliegen, jeweils um 90° zueinander phasenverschoben sind.

[0019] Alternativ oder ergänzend kann die Vorrichtung eine erste Gruppe von piezoelektrischen Transformatoren, die den ersten piezoelektrischen Transformator und weitere piezoelektrische Transformatoren aufweist, die parallel zueinander angeordnet sind und ein Array mit zumindest zwei Spalten und zumindest zwei Zeilen bilden, und eine zweite Gruppe von piezoelektrischen Transformatoren, die den zweiten piezoelektrischen Transformator und weitere piezoelektrische Transformatoren aufweist, die parallel zueinander angeordnet sind und ein Array mit zumindest zwei Spalten und zumindest zwei Zeilen bilden, aufweisen. Die erste Gruppe von piezoelektrischen Transformatoren und die zweite Gruppe von piezoelektrischen Transformatoren können einander gegenüberliegend angeordnet sein, wobei die Ansteuerschaltung dazu ausgelegt ist, die Eingangsspannungen an die Transformatoren jeweils derart anzulegen, dass Eingangsspannungen, die an zueinander unmittelbar benachbarten Transformatoren anliegen, jeweils um 90° zueinander phasenverschoben sind, dass die Eingangsspannungen, die an den Transformatoren anliegen, die auf ein und derselben Diagonale des Arrays angeordnet sind, jeweils um 0° zueinander phasenverschoben sind, und dass ferner die Eingangsspannungen, die an einander gegenüberliegenden Transformatoren anliegen, jeweils um 90° zueinander phasenverschoben sind.

[0020] Gemäß einem weiteren Aspekt betrifft die vorliegende Erfindung ein Verfahren zur Erzeugung eines nichtthermischen Atmosphärendruck-Plasmas mittels zumindest eines ersten piezoelektrischen Transformators und eines zweiten piezoelektrischen Transformators, wobei an dem ersten piezoelektrischen Transformator und an dem zweiten piezoelektrischen Transformator jeweils eine Eingangsspannung angelegt wird, die zueinander um 90° phasenverschoben ist.

[0021] Das Verfahren kann insbesondere mit der oben beschriebenen Vorrichtung durchgeführt werden. Dementsprechend kann jedes funktionelle und strukturelle Merkmal, das im Zusammenhang mit der Vorrichtung offenbart wurde, auch auf das Verfahren zutreffen.

[0022] Im Folgenden wird die vorliegende Erfindung anhand der Figuren näher erläutert.

[0023] Fig. 1 zeigt einen piezoelektrischen Transformator in perspektivischer Ansicht.

[0024] Fig. 2A bis Fig. 2C zeigen eine Plasmagenerierung mit zwei piezoelektrischen Transformatoren, wobei in den Figuren jeweils die an die Transformatoren angelegten Eingangsspannungen in ihrer Phasenverschiebung zueinander variiert sind.

[0025] Fig. 3 und Fig. 4 zeigen den Verlauf der an den ausgangsseitigen Stirnseiten der Transformatoren erzeugten Ausgangsspannung.

[0026] Fig. 5 zeigt eine Vorrichtung zur Plasmaerzeugung, bei der piezoelektrische Transformatoren in einer einzigen Zeile angeordnet sind.

[0027] Fig. 6 zeigt ein Array aus piezoelektrischen Transformatoren.

[0028] Fig. 7 zeigt eine Vorrichtung zur Plasmaerzeugung, bei der die piezoelektrischen Transformatoren einander gegenüberliegen.

[0029] Fig. 1 zeigt einen piezoelektrischen Transformator **1** in einer perspektivischen Ansicht. Der piezoelektrische Transformator **1** kann insbesondere in einer Vorrichtung zur Erzeugung von nichtthermischem Atmosphärendruck-Plasma eingesetzt werden.

[0030] Ein piezoelektrischer Transformator **1** ist eine Bauform eines Resonanztransformators, welcher auf Piezoelektrizität basiert und im Gegensatz zu den herkömmlichen magnetischen Transformatoren ein elektromechanisches System darstellt. Der piezoelektrische Transformator **1** ist beispielsweise ein Transformator vom Rosen-Typ.

[0031] Der piezoelektrische Transformator **1** weist einen Eingangsbereich **2** und einen Ausgangsbereich **3** auf, wobei der Ausgangsbereich **3** sich in einer longitudinalen Richtung z an den Eingangsbereich **2** anschließt. Im Eingangsbereich **2** weist der piezoelektrische Transformator **1** Elektroden **4** auf, an die eine Wechselspannung angelegt werden kann. Die Elektroden **4** erstrecken sich in der longitudinalen Richtung z des piezoelektrischen Transformators **1**. Die Elektroden **4** sind in einer Stapelrichtung x, die senkrecht zu der longitudinalen Richtung z ist, abwechselnd mit einem piezoelektrischen Material **5** gestapelt. Das piezoelektrische Material **5** ist dabei in Stapelrichtung x polarisiert.

[0032] Die Elektroden **4** sind im Innern des piezoelektrischen Transformators **1** angeordnet und werden auch als Innenelektroden bezeichnet. Der piezoelektrische Transformator **1** weist eine erste Seitenfläche **6** und eine zweite Seitenfläche **7**, die der ersten Seitenfläche **6** gegenüberliegt, auf. Auf der ersten Seitenfläche **6** ist eine erste Außenelektrode **8** angeordnet. Auf der zweiten Seitenfläche **7** ist eine zweite Außenelektrode (nicht gezeigt) angeordnet. Die innenliegenden Elektroden **4** sind in Stapelrichtung x abwechselnd entweder mit der ersten Außenelektrode **8** oder der zweiten Außenelektrode elektrisch kontaktiert.

[0033] Ferner weist der piezoelektrische Transformator **1** eine dritte Seitenfläche **20** und eine vierte Seitenfläche **21** auf, die einander gegenüberliegen und die senkrecht zu der ersten Seitenfläche **6** und der zweiten Seitenfläche **7** angeordnet sind. Die Flächennormalen der dritten und der vierten Seitenflächen **20**, **21** zeigen jeweils in Stapelrichtung x.

[0034] Der Eingangsbereich **2** kann mit einer geringen Wechselspannung angesteuert werden, die zwischen den Elektroden **4** angelegt wird. Aufgrund des piezoelektrischen Effekts wird die eingangsseitig angelegte

Wechselspannung zunächst in eine mechanische Schwingung umgewandelt. Die Frequenz der mechanischen Schwingung ist dabei wesentlich von der Geometrie und dem mechanischen Aufbau des piezoelektrischen Transformators **1** abhängig.

[0035] Der Ausgangsbereich **3** weist piezoelektrisches Material **9** auf und ist frei von innenliegenden Elektroden. Das piezoelektrische Material **9** im Ausgangsbereich ist in der longitudinalen Richtung z polarisiert. Bei dem piezoelektrischen Material **9** des Ausgangsbereichs **3** kann es sich um das gleiche Material wie bei dem piezoelektrischen Material **5** des Eingangsbereichs **2** handeln, wobei sich die piezoelektrischen Materialien **5** und **9** in ihrer Polarisationsrichtung unterscheiden können. Im Ausgangsbereich **3** ist das piezoelektrische Material **9** zu einer einzigen monolithischen Schicht geformt, die vollständig in der longitudinalen Richtung z polarisiert ist. Dabei weist das piezoelektrische Material **9** im Ausgangsbereich **3** nur eine einzige Polarisationsrichtung auf.

[0036] Wird an die Elektroden **4** im Eingangsbereich **2** eine Wechselspannung angelegt, so bildet sich innerhalb des piezoelektrischen Materials **5**, **9** eine mechanische Welle aus, die durch den piezoelektrischen Effekt im Ausgangsbereich **3** eine Ausgangsspannung erzeugt. Der Ausgangsbereich **3** weist eine ausgangsseitige Stirnseite **10** auf. Im Ausgangsbereich **3** wird somit eine elektrische Spannung zwischen der Stirnseite **10** und dem Ende der Elektroden **4** des Eingangsbereichs **2** erzeugt. An der ausgangsseitigen Stirnseite **10** wird dabei eine Hochspannung erzeugt. Dabei entsteht auch zwischen der ausgangsseitigen Stirnseite und einer Umgebung des piezoelektrischen Transformators eine hohe Potentialdifferenz, die ausreicht, um ein starkes elektrisches Feld zu erzeugen, dass ein Prozessgas ionisiert.

[0037] Auf diese Weise erzeugt der piezoelektrische Transformator **1** hohe elektrische Felder, die in der Lage sind, Gase oder Flüssigkeiten durch elektrische Anregung zu ionisieren. Dabei werden Atome oder Moleküle des jeweiligen Gases bzw. der jeweiligen Flüssigkeit ionisiert und bilden ein Plasma. Es kommt immer dann zu einer Ionisation, wenn die elektrische Feldstärke an der Oberfläche des piezoelektrischen Transformators **1** die Zündfeldstärke des Plasmas überschreitet. Als Zündfeldstärke eines Plasmas wird dabei die Feldstärke bezeichnet, die zur Ionisation der Atome oder Moleküle erforderlich ist.

[0038] Die Fig. 2A bis Fig. 2C zeigen schematisch die Plasmaerzeugung mittels einer Vorrichtung, die einen ersten piezoelektrischen Transformator **1** und einen zweiten piezoelektrischen Transformator **101** aufweist. Ferner weist die Vorrichtung eine Ansteuerschaltung auf, die es ermöglicht, an jeden der beiden Transformatoren **1**, **101** eine Eingangsspannung anzulegen.

[0039] Der erste Transformator **1** und der zweite Transformator **101** sind parallel zueinander angeordnet. Insbesondere ist der Ausgangsbereich **3** des ersten Transformators **1** unmittelbar benachbart zu einem Ausgangsbereich **103** des zweiten Transformators **101** angeordnet. Die Flächennormalen der ausgangsseitigen Stirnseite **10** des ersten Transformators und einer ausgangsseitigen Stirnseite **110** des zweiten Transformators **101** sind zueinander parallel. Zwischen dem ersten Transformator **1** und dem zweiten Transformator **101** befindet sich ein Spalt **11**.

[0040] Durch die Verwendung mehrerer piezoelektrischer Transformatoren **1**, **101** in einer Vorrichtung zur Erzeugung eines nichtthermischen Atmosphärendruck-Plasmas wird es ermöglicht, gleichzeitig eine größere Fläche mit einem Plasma zu bearbeiten. Insbesondere bei industriellen Anwendungen ist es für eine effiziente Prozessgestaltung wesentlich, dass große Flächen in einer kurzen Bearbeitungszeit mit nichtthermischem Atmosphärendruck-Plasma beaufschlagt werden können.

[0041] Fig. 2A zeigt eine nicht-erfindungsgemäße Anordnung, bei der an die beiden Transformatoren **1**, **101** jeweils eine Eingangsspannung angelegt wird, wobei die an dem ersten Transformator **1** anliegende Eingangsspannung und die an dem zweiten Transformator **101** anliegende Eingangsspannung nicht zueinander phasenverschoben sind. An jeden der beiden Transformatoren **1**, **101** wird dabei eine sinusförmige Eingangsspannung angelegt. Dementsprechend weist der zeitliche Verlauf des an den ausgangsseitigen Stirnseiten **10**, **110** erzeugten Potentials ebenfalls einen sinusförmigen Verlauf auf, wobei an beiden Transformatoren **1**, **101** zum gleichen Zeitpunkt ein maximales Potential erzeugt wird.

[0042] Durch gestrichelte Linien ist in Fig. 2A der Feldverlauf der von den beiden Transformatoren **1**, **101** erzeugten Potentiale angedeutet. Die gestrichelten Linien sind dabei jeweils Äquipotentiallinien.

[0043] Fig. 2A betrachtet den Potentialverlauf zu einem Zeitpunkt, an dem an beiden Transformatoren **1**, **101** an der jeweiligen ausgangsseitigen Stirnseite **10**, **110** ein maximales Potential erzeugt wird. Es ergibt sich ein

Potentialverlauf, bei dem das Potential in dem Spalt **11** zwischen den beiden Transformatoren **1**, **101** annähernd konstant bleibt. Ein hoher Feldgradient stellt sich dagegen an den Kanten der ausgangsseitigen Stirnseiten **10**, **110** ein, die von dem Spalt **11** wegweisen. Hier liegen die gestrichelt eingezeichneten Äquipotentiallinien eng beieinander.

[0044] Zur Zündung eines Plasmas ist ein hoher Feldgradient erforderlich. Dementsprechend ergibt sich bei einer phasengleichen Ansteuerung der beiden piezoelektrischen Transformatoren **1**, **101** bei der Plasmagenerierung das folgende Bild: Im Bereich des Spalts **11** zwischen den beiden Transformatoren **1**, **101** wird auf Grund der Nivellierung des Potentials kein Plasma gezündet. Lediglich an den Kanten der ausgangsseitigen Stirnseiten **10**, **110**, die von dem Spalt **11** wegweisen, kommt es zu einer Plasmazündung, da nur hier ein ausreichend hoher Feldgradient vorliegt.

[0045] Die mit dieser Ansteuerung der piezoelektrischen Transformatoren **1**, **101** erzeugbare Plasmamenge ist nicht wesentlich höher als die mit einem einzigen piezoelektrischen Transformator **1** erreichbare Menge an Plasma.

[0046] Fig. 2B zeigt eine weitere nicht-erfindungsgemäße Ansteuerung der beiden piezoelektrischen Transformatoren **1**, **101**. Hierbei wird an jeden der beiden piezoelektrischen Transformatoren **1**, **101** jeweils eine sinusförmige Eingangsspannung angelegt, die zueinander um 180° phasenverschoben sind.

[0047] Dementsprechend liegt an der ausgangseitigen Stirnseite **10** des ersten piezoelektrischen Transformators **1** ein maximal positives Potential vor, wenn zum gleichen Zeitpunkt an der ausgangseitigen Stirnseite **110** des zweiten piezoelektrischen Transformators **101** ein maximal negatives Potential vorliegt.

[0048] In diesem Fall stellt sich ein hoher Feldgradient insbesondere in dem Spalt **11** zwischen den beiden piezoelektrischen Transformatoren **1**, **101** ein. Dementsprechend kommt es zu einer Plasmazündung am ersten piezoelektrischen Transformator **1**, bei der ein Plasmastrahl generiert wird, der stark zum zweiten piezoelektrischen Transformator **101** hingehichtet ist. Bei dem zweiten piezoelektrischen Transformator **101** kommt es zu einer Plasmazündung, bei der ein Plasmastrahl generiert wird, der stark zum ersten piezoelektrischen Transformator **1** hingehichtet ist.

[0049] An den Kanten der ausgangsseitigen Stirnseiten **10**, **110**, die von dem Spalt **11** wegweisen, stellt sich im Vergleich zu dem Spalt **11** ein geringerer Feldgradient ein. Daher kommt es an diesen Kanten nicht zu einer Plasmazündung. Insgesamt ist daher die in diesem Fall erzeugte Plasmamenge nicht wesentlich höher als die in der gleichen Zeit mit einem einzigen piezoelektrischen Transformator **1** erzeugbare Plasmamenge.

[0050] Fig. 2C betrachtet nunmehr eine Ansteuerung, bei der an den ersten piezoelektrischen Transformator **1** eine Eingangsspannung angelegt wird, die um 90° phasenverschoben ist gegenüber einer Eingangsspannung, die an den zweiten piezoelektrischen Transformator **101** angelegt wird. Die beiden Eingangsspannungen weisen jeweils einen sinusförmigen Verlauf auf.

[0051] In diesem Fall erreicht das an der ausgangsseitigen Stirnseite **10** des ersten piezoelektrischen Transformators **1** erzeugte Potential sein Maximum, wenn der zweite piezoelektrische Transformator **101** quasi feldfrei ist. Dementsprechend wird die Plasmagenerierung durch den ersten piezoelektrischen Transformator **1** von dem zweiten piezoelektrischen Transformator **101** nicht wesentlich beeinflusst.

[0052] Ferner erreicht das an der ausgangsseitigen Stirnseite **110** des zweiten piezoelektrischen Transformators **101** erzeugte Potential ein Maximum, wenn der erste piezoelektrische Transformator **1** quasi feldfrei ist. Dementsprechend wird auch die Plasmagenerierung durch den zweiten piezoelektrischen Transformator **101** von dem ersten piezoelektrischen Transformator **1** nicht wesentlich beeinflusst.

[0053] Die in Fig. 2C beschriebene Konfiguration führt dementsprechend zu einer Plasmagenerierungsrate, die wesentlich größer ist als eine mit einem einzigen piezoelektrischen Transformator **1** erreichbare Plasmagenerierungsrate. Ferner wird das erzeugte Plasma in eine Richtung nach vorne gleichmäßig über einen großen Raumwinkel erzeugt.

[0054] Fig. 3 zeigt den zeitlichen Verlauf des an der ausgangsseitigen Stirnseite **10** des ersten piezoelektrischen Transformators **1** erzeugten Potentials sowie des an der ausgangsseitigen Stirnseite **110** des zweiten piezoelektrischen Transformators **101** erzeugten Potentials. Die Kurve U_1 zeigt dabei den zeitlichen Verlauf des an der ausgangsseitigen Stirnseite **10** des ersten piezoelektrischen Transformators **1** erzeugten Potenti-

als und die Kurve U_2 zeigt entsprechend den zeitlichen Verlauf des an der ausgangsseitigen Stirnseite **110** des zweiten piezoelektrischen Transformators **101** erzeugten Potentials. Die an den zweiten piezoelektrischen Transformator **101** angelegte Eingangsspannung ist um $+90^\circ$ gegenüber der an den ersten piezoelektrischen Transformator **1** angelegten Eingangsspannung phasenverschoben.

[0055] Plasma und Ozon können von dem piezoelektrischen Transformator **1** durch eine Dielektrische Barriereentladung (DBD = Dielectric Barrier Discharge) erzeugt werden. Die Plasmagenerierung in Folge einer Dielektrischen Barriereentladung hängt weitgehend von der Änderungsgeschwindigkeit des an der ausgangsseitigen Stirnseite **10**, **110** erzeugten Potentials ab. Sind nun, wie in **Fig. 3** gezeigt, die an zwei unmittelbar zueinander benachbarten piezoelektrischen Transformatoren **1**, **101** erzeugten Potential um 90° zueinander verschoben, so zeigen die Potentiale jeweils abwechselnd eine maximale Änderungsgeschwindigkeit.

[0056] Beispielsweise weist die Kurve U_1 zum Zeitpunkt t_1 eine maximale Anstiegsgeschwindigkeit auf. Die Kurve U_2 weist dagegen zum Zeitpunkt t_1 eine nur minimale Änderung auf. Dementsprechend wird zum Zeitpunkt t_1 am ersten piezoelektrischen Transformator **1** ein Plasma gezündet und am zweiten piezoelektrischen Transformator **101** kein Plasma gezündet. Da somit die beiden Transformatoren **1**, **101** stets abwechselnd zueinander Plasma generieren, stören sie gegenseitig die Plasmagenerierung nicht.

[0057] **Fig. 4** zeigt ebenfalls den Verlauf der an den ausgangsseitigen Stirnseiten **10**, **110** des ersten und des zweiten piezoelektrischen Transformatoren **1**, **101** erzeugten Potentiale, wobei nunmehr die Eingangsspannung des zweiten piezoelektrischen Transformators **101** um -90° gegenüber der Eingangsspannung des ersten piezoelektrischen Transformators **1** phasenverschoben ist. Wiederum stellt sich die bereits in **Fig. 3** erläuterte Konfiguration ein, bei der die beiden Transformatoren **1**, **101** stets abwechselnd zueinander Plasma generieren, da sie jeweils dann ein Maximum der Anstiegsgeschwindigkeit der ausgangsseitigen Potentiale erreichen, wenn der jeweils andere Transformator **1**, **101** ein nahezu konstantes Potential zeigt.

[0058] Somit ermöglicht es eine um 90° versetzte Ansteuerung der beiden Transformatoren **1**, **101** sowohl den geometrischen Feldgradienten als auch den zeitlichen Verlauf der Änderungsgeschwindigkeit der erzeugten Felder derart zu optimieren, dass die von den beiden Transformatoren **1**, **101** erzeugte Plasmamenge maximiert werden kann.

[0059] **Fig. 5** zeigt eine Vorrichtung zur Erzeugung eines nichtthermischen Atmosphärendruck-Plasmas, die neben dem ersten piezoelektrischen Transformator **1** und dem zweiten piezoelektrischen Transformator **101** einen dritten Transformator **201** und einen vierten Transformator **301** aufweist. Ferner kann die Vorrichtung noch weitere piezoelektrische Transformatoren aufweisen. Die piezoelektrischen Transformatoren **1**, **101**, **201**, **301** sind dabei parallel zueinander angeordnet. Die Flächennormalen der ausgangsseitigen Stirnseiten der piezoelektrischen Transformatoren sind parallel zueinander.

[0060] Ferner sind die piezoelektrischen Transformatoren **1**, **101**, **201**, **301** in einem geringen Abstand zueinander angeordnet. Die piezoelektrischen Transformatoren **1**, **101**, **201**, **301** können in einem Abstand von mehr als 5 mm und weniger als 5 cm zueinander angeordnet sein. Die piezoelektrischen Transformatoren **1**, **101**, **201**, **301** sind derart angeordnet, dass sie eine Zeile bilden. Diese Anordnung von piezoelektrischen Transformatoren **1**, **101**, **201**, **301** in einer einzigen Zeile ermöglicht es, beispielsweise Folien auf Fließbändern effektiv mit Plasma zu beaufschlagen.

[0061] Der erste Transformator **1** ist unmittelbar zu dem zweiten Transformator **101** benachbart. Der zweite Transformator **101** ist unmittelbar zu dem ersten Transformator **1** und zu dem dritten Transformator **201** benachbart, usw.

[0062] Die Vorrichtung weist ferner eine Ansteuerschaltung auf, die an jeden der piezoelektrischen Transformatoren **1**, **101**, **201**, **301** eine Eingangsspannung anlegt. Dabei werden die Eingangsspannungen derart angelegt, dass an jeweils zueinander benachbarte piezoelektrische Transformatoren Eingangsspannungen angelegt werden, die um jeweils 90° zueinander phasenverschoben sind.

[0063] Als Beispiel wird nunmehr eine Ansteuerung des ersten bis eines vierten piezoelektrischen Transformatoren **1**, **101**, **201**, **301** betrachtet.

[0064] Gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel könnte die Ansteuerschaltung an den ersten und den dritten piezoelektrischen Transformator **1**, **201** jeweils eine identische Eingangsspannung, das heißt Eingangsspannungen, die nicht gegeneinander phasenverschoben sind, anlegen und an dem zweiten und vierten piezoelek-

trischen Transformator **101**, **301** jeweils eine Eingangsspannung anlegen, die um 90° gegenüber der an dem ersten und dritten Transformator **1**, **101** anliegenden Eingangsspannung phasenverschoben ist.

[0065] Gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel weist die Eingangsspannung des ersten Transformators **1** eine Phasenverschiebung von 0° , die Eingangsspannung des zweiten Transformators **101** und des vierten Transformators **301** jeweils eine Phasenverschiebung von $+90^\circ$ und die Eingangsspannung des dritten Transformators **201** eine Phasenverschiebung von $+180^\circ$ auf. Weitere mögliche Phasenverschiebungen der an dem ersten bis vierten piezoelektrischen Transformator **1**, **101**, **201**, **301** angelegten Eingangsspannungen können der untenstehenden Tabelle entnommen werden. Die Phasenverschiebungen sind dabei stets relativ zueinander zu sehen. Dementsprechend sind auch sämtliche Permutationen mit positiven und negativen Vorzeichen sowie um n° verschobene Phasenverschiebungen möglich.

	Erster Transformator	zweiter Transformator	Dritter Transformator	Vierter Transformator
Beispiel 1	0°	$+90^\circ$	0°	$+90^\circ$
Beispiel 2	0°	$+90^\circ$	$+180^\circ$	$+90^\circ$
Beispiel 3	0°	$+90^\circ$	0°	-90°
Beispiel 4	0°	$+90^\circ$	$+180^\circ$	$+270^\circ$

[0066] In der Tabelle sind jeweils die Phasenverschiebungen der an den ersten bis vierten piezoelektrischen Transformator **1**, **101**, **201**, **301** angelegten Eingangsspannungen aufgeführt. Die Phasenverschiebungen sind dabei stets relativ zueinander zu sehen. Dementsprechend sind auch sämtliche Permutationen mit positiven und negativen Vorzeichen möglich. Ferner sind sämtliche Verschiebungen inkludiert, bei denen alle Phasenverschiebungen um einen beliebigen Betrag n° verschoben werden.

[0067] Fig. 6 zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel der Vorrichtung. Dabei sind die ausgangsseitigen Stirnseiten **10**, **110** der piezoelektrischen Transformatoren **1**, **101**, **201**, **301** der Vorrichtung in Draufsicht gezeigt. Die piezoelektrischen Transformatoren sind parallel zueinander angeordnet und bilden ein Array **1**, **101**, **201**, **301**, das mehrere Zeilen und mehrere Spalten aufweist. Beispielsweise sind der erste und der dritte Transformator **1**, **201** in einer Zeile angeordnet.

[0068] Der erste und der zweite Transformator **1**, **101** sind in einer Spalte angeordnet. Der erste und der vierte Transformator **1**, **301** sind entlang derselben Diagonale angeordnet. Auch der zweite und der dritte Transformator **101**, **201** sind entlang derselben Diagonale angeordnet.

[0069] Die Transformatoren **1**, **101**, **201**, **301** werden derart angesteuert, dass unmittelbar zueinander benachbarte piezoelektrische Transformatoren **1**, **101** jeweils mit einer Eingangsspannung versorgt werden, die um 90° zueinander phasenverschoben ist. Die piezoelektrischen Transformatoren **1**, **301** bzw. **101**, **201**, die auf einer Diagonale liegen, werden jeweils mit einer Eingangsspannung versorgt, die nicht gegeneinander phasenverschoben ist. Dadurch kann das Zünden von Plasma entlang der Diagonalen verhindert werden.

[0070] Fig. 7 zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel einer Vorrichtung zur Erzeugung eines nichtthermischen Atmosphärendruck-Plasmas. Der erste piezoelektrische Transformator **1** und der zweite piezoelektrische Transformator **101** sind hierbei einander gegenüberliegend angeordnet. Insbesondere weist die ausgangsseitige Stirnseite **10** des ersten piezoelektrischen Transformators **1** zur ausgangsseitigen Stirnseite **110** des zweiten piezoelektrischen Transformators **101** hin.

[0071] Auch in diesem Fall werden die beiden piezoelektrischen Transformatoren **1**, **101** von einer Ansteuerung mit einer Eingangsspannung derart versorgt, dass die an dem ersten piezoelektrischen Transformator **1** anliegende Eingangsspannung um 90° gegenüber der an dem zweiten piezoelektrischen Transformator **101** anliegenden Eingangsspannung um 90° phasenverschoben ist.

[0072] Die in Fig. 7 gezeigte Vorrichtung eignet sich insbesondere dazu, zwei Seiten einer Folie gleichzeitig mit Plasma zu behandeln. Dabei kann die Folie durch einen zwischen den beiden ausgangsseitigen Stirnseiten **10**, **110** der piezoelektrischen Transformatoren **1**, **101** gebildeten Zwischenraum **12** hindurchgeführt werden. Eine Oberseite der Folie kann dabei dem ersten piezoelektrischen Transformator **1** zugewandt sein und eine Unterseite der Folie kann dem zweiten piezoelektrischen Transformator **101** zugewandt sein. Der erste piezoelektrische Transformator **1** erzeugt ein Plasma, mit dem die Oberseite der Folie behandelt wird, und der

zweite piezoelektrische Transformator **101** erzeugt ein Plasma, mit dem die Unterseite der Folie mit Plasma behandelt wird.

[0073] Auch die in **Fig. 5** und **Fig. 6** gezeigten Ausführungsbeispiele, bei denen die piezoelektrischen Transformatoren **1** zu einer einzigen Zeile oder zu einem Array aufweisend mehrere Spalten und mehrere Zeilen angeordnet sind, können in einer gegenüberliegenden Anordnung ausgeführt werden. Dabei kann eine erste Gruppe von piezoelektrischen Transformatoren entweder eine Zeile oder ein Array bilden und gegenüber einer zweiten Gruppe von piezoelektrischen Transformatoren angeordnet sein, die ebenfalls eine Zeile oder ein Array bilden. Die Transformatoren werden dabei mit einer Eingangsspannung versorgt, wobei zu beachten ist, dass unmittelbar zueinander benachbarte Transformatoren jeweils mit einer zueinander um 90° versetzten Eingangsspannung versorgt werden sollten, dass einander gegenüberliegende Transformatoren ebenfalls mit einer Eingangsspannung versorgt werden sollten, die um 90° zueinander versetzt sind und dass die Transformatoren, die auf einer Diagonalen angeordnet sind, jeweils mit phasengleichen Eingangsspannungen versorgt werden.

Bezugszeichenliste

1	piezoelektrischer Transformator
2	Eingangsbereich
3	Ausgangsbereich
4	Elektrode
5	piezoelektrisches Material
6	erste Seitenfläche
7	zweite Seitenfläche
8	erste Außenelektrode
9	piezoelektrisches Material
10	ausgangsseitige Stirnseite
11	Spalt
12	Zwischenraum
101	zweiter piezoelektrischer Transformator
103	Ausgangsbereich
110	ausgangsseitige Stirnseite
201	dritter piezoelektrischer Transformator
301	vierter piezoelektrischer Transformator
x	Stapelrichtung
z	longitudinale Richtung

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Erzeugung eines nichtthermischen Atmosphärendruck-Plasmas aufweisend einen ersten piezoelektrische Transformator (**1**), einen zweiten piezoelektrische Transformator (**101**) und eine Ansteuerschaltung, die dazu ausgestaltet ist, an jeden der piezoelektrischen Transformatoren (**1**, **101**) eine Eingangsspannung anzulegen, wobei die Eingangsspannung, die an den ersten Transformator (**1**) angelegt wird, gegenüber der Eingangsspannung, die an den zweiten Transformator (**101**) angelegt wird, um 90° phasenverschoben ist.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei der erste und der zweite piezoelektrische Transformator (**1**, **101**) in einem Abstand von weniger als 5 cm zueinander angeordnet sind.

3. Vorrichtung gemäß einem der vorherigen Ansprüche, wobei die Ansteuerschaltung derart ausgestaltet ist, dass die Eingangsspannungen, die an die piezoelektrischen Transformatoren (**1**, **101**) angelegt werden, jeweils die gleiche Frequenz aufweisen.

4. Vorrichtung gemäß einem der vorherigen Ansprüche, aufweisend weitere piezoelektrische Transformatoren (**201**, **301**), wobei die Ansteuerschaltung dazu ausgelegt ist, die Eingangsspannungen an die Transformatoren (**1**, **101**, **201**, **301**) derart anzulegen, dass Eingangsspannungen, die an zueinander unmittelbar benachbarten Transformatoren (**1**, **101** bzw. **201**, **301**) anliegen, jeweils um 90° zueinander phasenverschoben sind.

5. Vorrichtung nach Anspruch 4, wobei die piezoelektrischen Transformatoren (**1**, **101**, **201**, **301**) parallel zueinander angeordnet sind und eine einzige Zeile bilden.

6. Vorrichtung nach Anspruch 4,
wobei die piezoelektrischen Transformatoren (**1**, **101**, **201**, **301**) parallel zueinander angeordnet sind und ein Array mit zumindest zwei Zeilen und zumindest zwei Spalten bilden, und
wobei die Ansteuerschaltung dazu ausgelegt ist, die Eingangsspannungen an die Transformatoren (**1**, **101**, **201**, **301**) derart anzulegen, dass die Eingangsspannungen, die an den Transformatoren (**1**, **301** bzw. **101**, **201**) anliegen, die auf ein und derselben Diagonale des Arrays angeordnet sind, jeweils um 0° zueinander phasenverschoben sind.

7. Vorrichtung gemäß einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei der erste und der zweite piezoelektrische Transformator (**1**, **101**) derart angeordnet sind, dass ihre ausgangsseitigen Stirnseiten (**10**, **110**) einander gegenüberliegen.

8. Vorrichtung gemäß einem der Ansprüche 1 bis 4,
wobei eine erste Gruppe von piezoelektrischen Transformatoren den ersten piezoelektrischen Transformator (**1**) und weitere piezoelektrische Transformatoren aufweist, die parallel zueinander angeordnet sind und eine einzige Zeile bilden, und
wobei eine zweite Gruppe von piezoelektrischen Transformatoren, den zweiten piezoelektrischen Transformator (**101**) und weitere piezoelektrische Transformatoren aufweist, die parallel zueinander angeordnet sind und eine einzige Zeile bilden, wobei die erste Gruppe von piezoelektrischen Transformatoren und die zweite Gruppe von piezoelektrischen Transformatoren einander gegenüberliegend angeordnet ist,
wobei die Ansteuerschaltung dazu ausgelegt ist, die Eingangsspannungen an die Transformatoren einer Zeile jeweils derart anzulegen, dass Eingangsspannungen, die an zueinander unmittelbar benachbarten Transformatoren anliegen, jeweils um 90° zueinander phasenverschoben sind, und dass ferner die Eingangsspannungen, die an einander gegenüberliegenden Transformatoren anliegen, jeweils um 90° zueinander phasenverschoben sind.

9. Vorrichtung gemäß einem der Ansprüche 1 bis 4,
wobei eine erste Gruppe von piezoelektrischen Transformatoren den ersten piezoelektrischen Transformator (**1**) und weitere piezoelektrische Transformatoren aufweist, die parallel zueinander angeordnet sind und ein Array mit zumindest zwei Spalten und zumindest zwei Zeilen bilden, und
wobei eine zweite Gruppe von piezoelektrischen Transformatoren den zweiten piezoelektrischen Transformator (**101**) und weitere piezoelektrische Transformatoren aufweist, die parallel zueinander angeordnet sind und ein Array mit zumindest zwei Spalten und zumindest zwei Zeilen bilden,
wobei die erste Gruppe von piezoelektrischen Transformatoren und die zweite Gruppe von piezoelektrischen Transformatoren einander gegenüberliegend angeordnet ist,
wobei die Ansteuerschaltung dazu ausgelegt ist, die Eingangsspannungen an die Transformatoren jeweils derart anzulegen, dass Eingangsspannungen, die an zueinander unmittelbar benachbarten Transformatoren anliegen, jeweils um 90° zueinander phasenverschoben sind,
dass die Eingangsspannungen, die an den Transformatoren anliegen, die auf ein und derselben Diagonale des Arrays angeordnet sind, jeweils um 0° zueinander phasenverschoben sind, und dass ferner die Eingangsspannungen, die an einander gegenüberliegenden Transformatoren anliegen, jeweils um 90° zueinander phasenverschoben sind.

10. Verfahren zur Erzeugung von nichtthermischem Atmosphärendruck-Plasma mittels zumindest eines ersten piezoelektrischen Transformators (**1**) und eines zweiten piezoelektrischen Transformators (**101**), wobei an den ersten piezoelektrischen Transformator (**1**) und an den zweiten piezoelektrischen Transformator (**101**) jeweils eine Eingangsspannung angelegt wird, die zueinander um 90° phasenverschoben sind.

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1

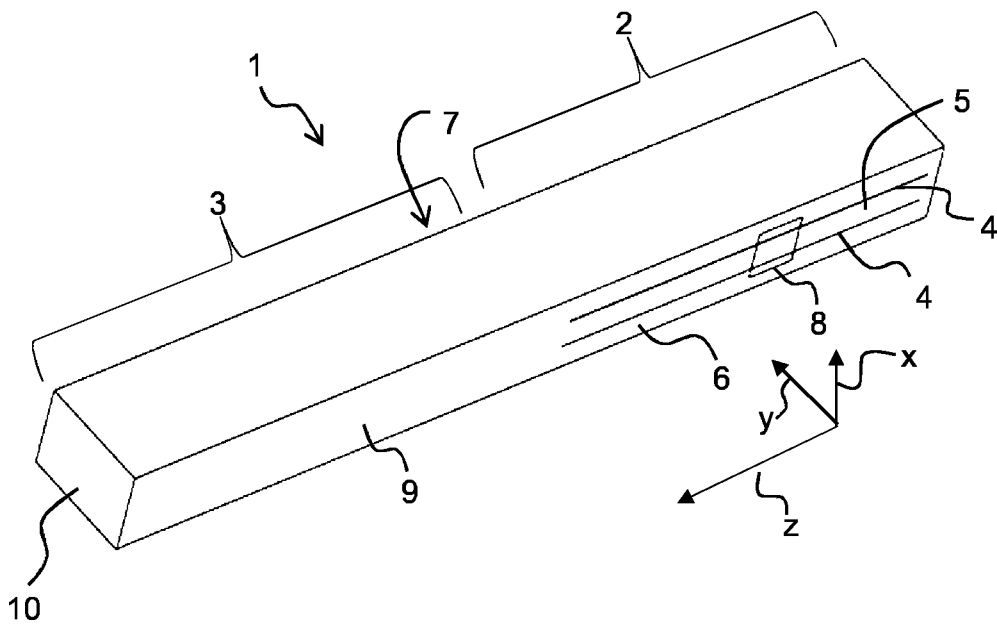


Fig. 2A

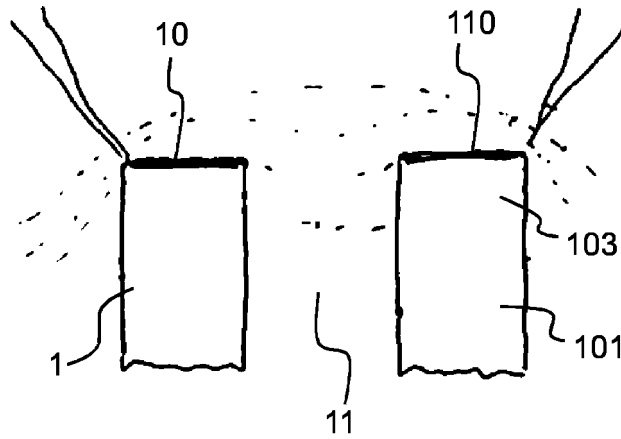


Fig. 2B

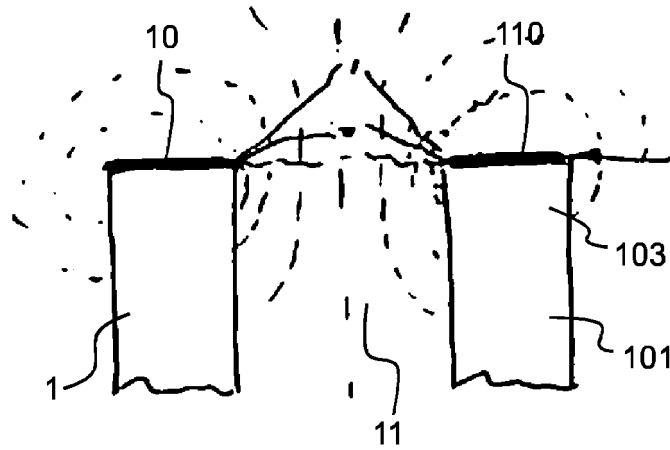


Fig. 2C

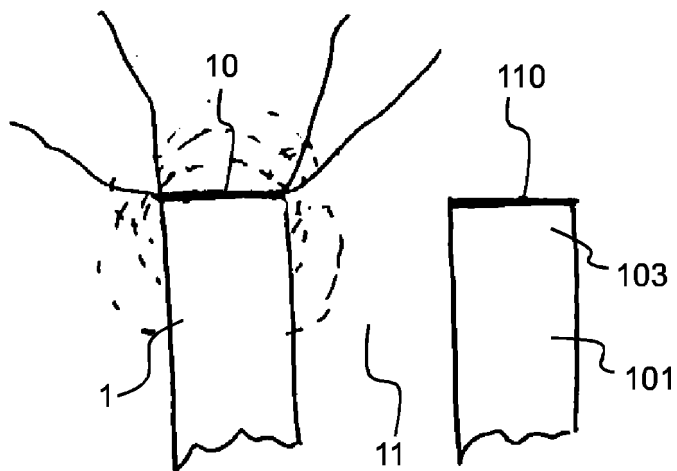


Fig. 3

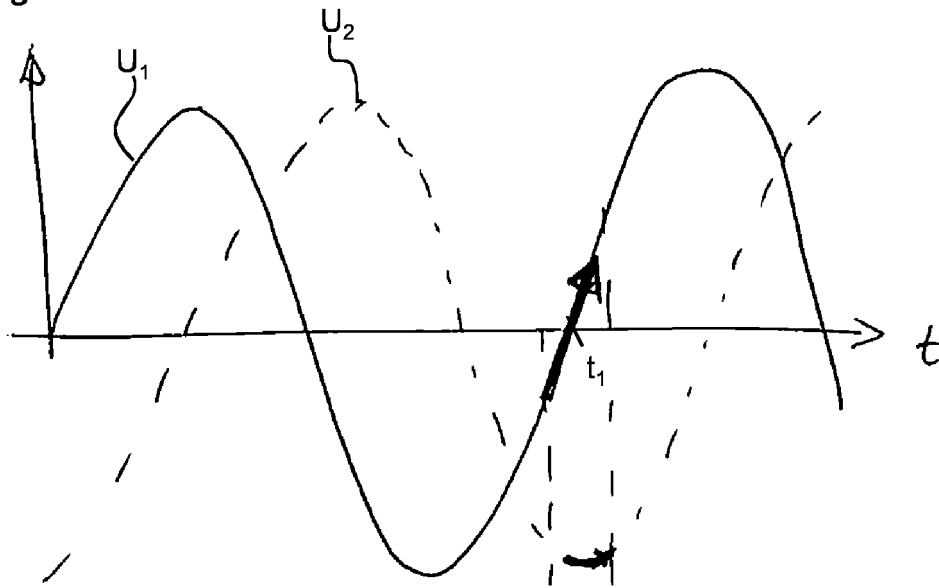


Fig. 4

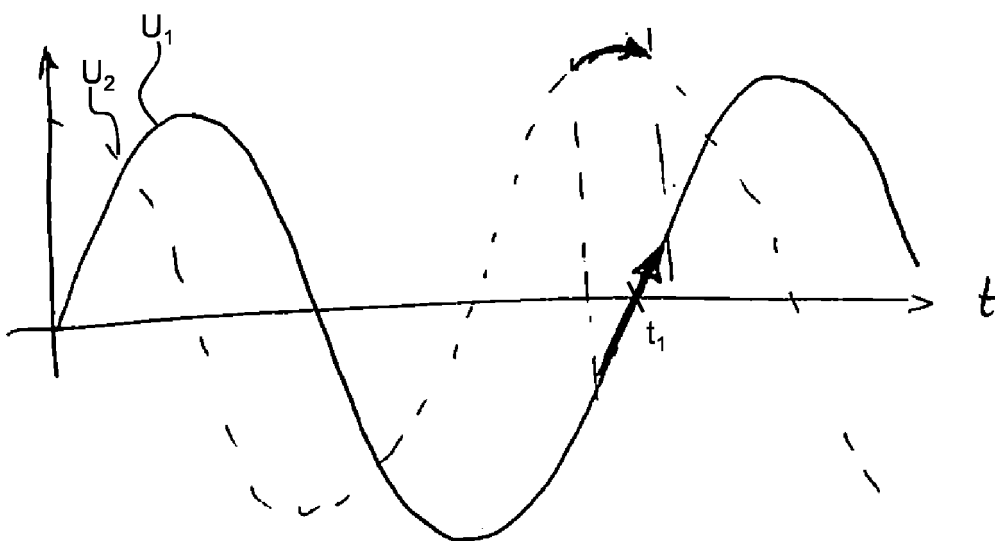


Fig. 5

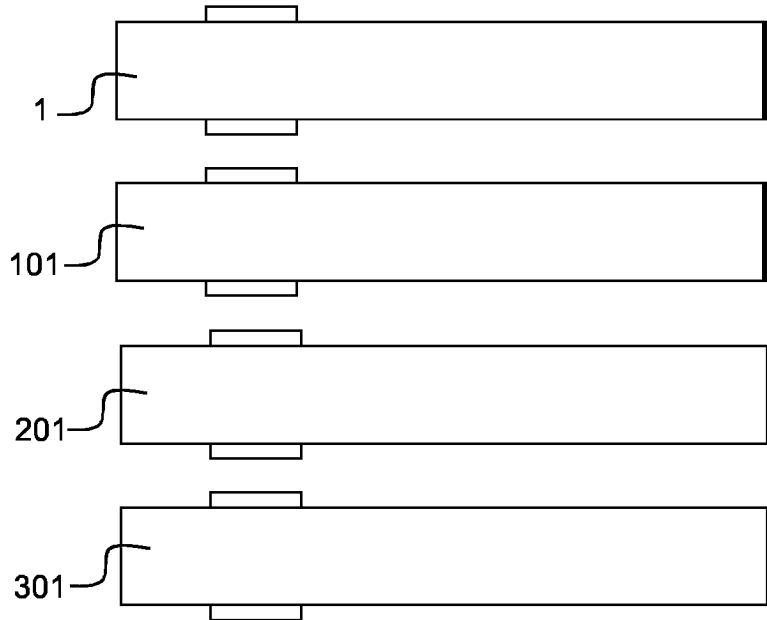


Fig. 6

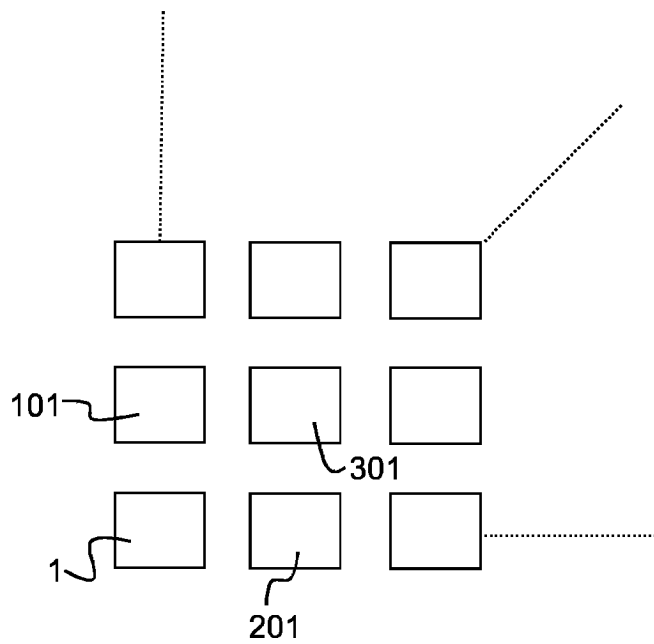


Fig. 7

