(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) **EP 2 540 143 B1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT**

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
03.01.2018 Patentblatt 2018/01

(21) Anmeldenummer: **11702036.2**

(22) Anmeldetag: **02.02.2011**

(51) Int Cl.:
H05H 5/02 *(2006.01)* ***H05H 5/04*** *(2006.01)*
H05H 5/06 *(2006.01)*

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/EP2011/051462

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2011/104077 (01.09.2011 Gazette 2011/35)

(54) BESCHLEUNIGER FÜR GELADENE TEILCHEN

ACCELERATOR FOR CHARGED PARTICLES

ACCÉLÉRATEUR DE PARTICULES CHARGÉES

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR

(30) Priorität: **24.02.2010 DE 102010008991**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
02.01.2013 Patentblatt 2013/01

(73) Patentinhaber: **Siemens Aktiengesellschaft**
80333 München (DE)

(72) Erfinder: **HEID, Oliver**
91052 Erlangen (DE)

(56) Entgegenhaltungen:

- **BOSCOLO I ET AL: "A 1-MW, 1-mm continuous-wave FELtron for toroidal plasma heating", IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE USA, Bd. 20, Nr. 3, Juni 1992 (1992-06), Seiten 256-262, XP002634621, ISSN: 0093-3813, DOI: 10.1109/27.142827**
- **BOSCOLO I ET AL: "A tunable Bragg cavity for an efficient millimeter FEL driven by electrostatic accelerators", APPLIED PHYSICS B (PHOTOPHYSICS AND LASER CHEMISTRY) GERMANY, Bd. B57, Nr. 3, September 1993 (1993-09), Seiten 217-225, XP002634622, ISSN: 0721-7269**
- **BRAUTTI G ET AL: "TUBELESS VACUUM INSULATED COCKROFT-WALTON ACCELERATOR", NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH, SECTION - A:ACCELERATORS, SPECTROMETERS, DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT, Bd. A328, Nr. 1 / 02, 15. April 1993 (1993-04-15), Seiten 59-63, XP000384484, ELSEVIER, AMSTERDAM, NL ISSN: 0168-9002, DOI: 10.1016/0168-9002(93)90602-E**
- **Y.BELCHENKO ET AL: "Initial High Voltage Tests and Beam Injection Experiments on BINP Proton Tandem-Accelerator", PROCEEDINGS OF RUSSIAN PARTICLE ACCELERATOR CONFERENCE 2006, 10. September 2006 (2006-09-10), - 14. September 2006 (2006-09-14), Seiten 135-137, XP002634623, Novosibirsk, Russia**
- **BOSCOLO I ET AL: "FELTRON: A HIGH-POWER MICROWAVE POWER SOURCE FOR HIGH-GRADIENT LINEAR COLLIDERS", NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH, SECTION - A:ACCELERATORS, SPECTROMETERS, DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT, Bd. A309, Nr. 3, 15. November 1991 (1991-11-15), Seiten 585-593, XP000272962, ELSEVIER, AMSTERDAM, NL ISSN: 0168-9002, DOI: 10.1016/0168-9002(91)90267-T**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

Printed by Jouve, 75001 PARIS (FR)

(Forts. nächste Seite)

- **BOSCOLO I ET AL: "FELTRON, a microwave source for high gradient TeV collider", EPAC92.THIRD EUROPEAN PARTICLE ACCELERATOR CONFERENCE. BERLIN, GERMANY, 24. März 1992 (1992-03-24), - 28. März 1992 (1992-03-28), Seiten 1188-1190, XP002634624, Editions Frontieres Gif sur Yvette, France ISBN: 2-86332-114-5**

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft einen Beschleuniger für geladene Teilchen mit einem Kondensatorstapel aus konzentrisch zueinander angeordneten Elektroden, wie er insbesondere bei der Erzeugung elektromagnetischer Strahlung eingesetzt wird.

[0002] Teilchenbeschleuniger dienen dazu, geladenen Teilchen auf hohe Energien zu beschleunigen. Neben ihrer Bedeutung für die Grundlagenforschung haben Teilchenbeschleuniger auch eine immer wichtigere Bedeutung in der Medizin und für viele industrielle Zwecke.

[0003] Bisher werden zur Herstellung eines Teilchenstrahls im MV-Bereich Linearbeschleuniger und Cyclotrons verwendet, die meist sehr komplexe und aufwändige Geräte sind.

[0004] Derartige Beschleuniger kommen bei Freien Elektronen Lasern (FEL) zum Einsatz. Ein mit dem Beschleuniger beschleunigter, schneller Elektronenstrahl wird einer periodischen Ablenkung unterworfen um Synchrotronstrahlung zu erzeugen.

[0005] Derartige Beschleuniger können auch bei Röntgenquellen eingesetzt werden, bei denen Röntgenstrahlung erzeugt wird, indem ein Laserstrahl mit einem relativistischen Elektronenstrahl interagiert, wodurch Röntgenstrahlen aufgrund inverser Compton-Streuung emittiert werden.

[0006] Eine andere Form von bekannten Teilchenbeschleunigern sind sogenannte elektrostatische Teilchenbeschleuniger mit einer Gleichspannungs-Hochspannungsquelle. Dabei werden die zu beschleunigenden Teilchen einem statischen elektrischen Feld ausgesetzt.

[0007] Bekannt sind z.B. Kaskadenbeschleuniger (auch Cockcroft-Walton-Beschleuniger), bei denen mittels einer Greinacherschaltung, welche mehrfach hintereinander geschaltet (kaskadiert) wird, eine hohe Gleichspannung durch Vervielfachung und Gleichrichtung einer Wechselspannung erzeugt und damit ein starkes elektrisches Feld bereitgestellt.

[0008] In I.Boscolo et al "A 1-MW, 1-mm Continuous-Wave FELtron for Toroidal Plasma Heating", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.20, No.3, June 1992, pp 256-262, und in I.Boscolo et al. "A Tunable Bragg Cavity for an Efficient Millimeter FEL Driven by Electrostatic Accelerators", Appl.Phys., B57, pp 217-225 (1993), wird jeweils ein Beschleuniger mit einem Kondensatorstapel beschrieben, dessen Elektroden gleiche Abstände zueinander aufweisen.

[0009] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen Beschleuniger zur Beschleunigung von geladenen Teilchen anzugeben, der bei kompakter Bauweise eine besonders effiziente Teilchenbeschleunigung auf hohe Teilchenenergien ermöglicht und der dadurch zur Erzeugung elektromagnetischer Strahlung eingesetzt werden kann.

[0010] Die Erfindung wird durch die Merkmale der unabhängigen Ansprüche gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen finden sich in den Merkmalen der abhängigen Ansprüche.

[0011] Der erfindungsgemäße Beschleuniger zur Beschleunigung von geladenen Teilchen weist auf:

einen Kondensatorstapel

- mit einer ersten Elektrode, welche auf ein erstes Potential gebracht werden kann,
- mit einer zweiten Elektrode, die zur ersten Elektrode konzentrisch angeordnet ist und auf ein zweites, vom ersten Potential unterschiedliches Potential gebracht werden kann,
- mit zumindest einer Zwischenelektrode, die konzentrisch zwischen der ersten Elektrode und der zweiten Elektrode angeordnet ist, und die auf ein Zwischenpotential gebracht werden kann, das sich zwischen dem ersten Potential und dem zweiten Potential befindet.

[0012] Es ist eine Schaltvorrichtung, mit der die Elektroden des Kondensatorstapels - also die erste Elektrode, die zweite Elektrode und die Zwischenelektroden - verbunden sind und welche derart ausgebildet ist, dass bei Betrieb der Schaltvorrichtung die konzentrisch zueinander angeordneten Elektroden des Kondensatorstapels auf anwachsende Potentialstufen gebracht werden.

[0013] Es ist ein erster Beschleunigungskanal vorhanden, der gebildet wird durch erste Öffnungen in den Elektroden des Kondensatorstapels, sodass entlang des ersten Beschleunigungskanals geladene Teilchen durch die Elektroden beschleunigt werden können. Es ist auch ein zweiter Beschleunigungskanal vorhanden, der gebildet wird durch zweite Öffnungen in den Elektroden des Kondensatorstapels, sodass entlang des zweiten Beschleunigungskanals geladene Teilchen durch die Elektroden beschleunigt werden können.

[0014] Weiterhin ist eine Vorrichtung vorhanden, mit der eine Beeinflussung des beschleunigten Teilchenstrahls im Inneren des Kondensatorstapels durchgeführt wird, wodurch von dem Teilchenstrahl ausgesendete Photonen erzeugt werden. Durch die Vorrichtung entsteht eine Interaktion mit dem beschleunigten Teilchenstrahl, welche die Energie, die Geschwindigkeit und/oder die Verlaufsrichtung ändert. Hierdurch kann die elektromagnetische Strahlung, insbesondere kohärente elektromagnetische Strahlung, die von dem Teilchenstrahl ausgeht, erzeugt werden.

[0015] Der Kondensatorstapel kann insbesondere mehrere konzentrisch zueinander angeordnete Zwischenelektroden umfassen, welche durch die Schaltvorrichtung verbunden sind, derart, dass bei Betrieb der Schaltvorrichtung die Zwi-

schenelektroden auf eine Abfolge von anwachsenden Potentialstufen zwischen dem ersten Potential und dem zweiten Potential gebracht werden. Die Potentialstufen der Elektroden des Kondensatorstapels sind anwachsend gemäß der Reihenfolge ihrer konzentrischen Anordnung. Die Hochspannungselektrode kann dabei die bei der konzentrischen Anordnung am weitesten Innen liegende Elektrode sein, während die äußerste Elektrode z.B. eine Masseelektrode sein kann. Zwischen der ersten und zweiten Elektrode wird ein beschleunigendes Potential ausgebildet.

[0016] Der Kondensatorstapel und die Schaltvorrichtung stellen also eine Gleichspannungs-Hochspannungsquelle dar, da die zentrale Elektrode auf ein hohes Potential gebracht werden kann. Die durch die Hochspannungsquelle bereitgestellte Potentialdifferenz erlaubt es, die Vorrichtung als Beschleuniger zu betreiben. Die elektrische Potentialenergie wird in kinetische Energie der Partikel umgewandelt, indem das hohe Potential zwischen Teilchenquelle und Ziel angelegt wird. Der konzentrische Elektrodenstapel ist durch zwei Reihen von Löchern durchbohrt.

[0017] Geladene Teilchen werden von einer Quelle bereitgestellt, durch den ersten Beschleunigungskanal zur zentralen Elektrode hin beschleunigt. Anschließend, nach Interaktion mit der Vorrichtung im Zentrum des Kondensatorstapels, z.B. innerhalb der innersten Elektrode, werden die geladenen Teilchen durch den zweiten Beschleunigungskanal von der zentralen Elektrode weg geführt und können wieder nach außen gelangen. Die Abbremsung des Strahls in dem elektrischen Feld gewinnt die zur Beschleunigung aufgewendete Energie zurück, so dass im Verhältnis zur aufgewendeten elektrischen Leistung sehr große Strahlströme und damit eine große Luminanz erzielt werden kann.

[0018] Es ist insgesamt möglich, eine Teilchenenergie im MV-Bereich bei kompakter Bauweise zu erreichen und einen kontinuierlichen Strahl bereitzustellen. Eine Quelle, die sich im Wesentlichen auf Erdpotential befinden kann, kann beispielsweise negativ geladene Teilchen bereitstellen, die als Teilchenstrahl injiziert werden und durch den ersten Beschleunigungskanal zur zentralen Elektrode hin beschleunigt werden.

[0019] Die konzentrische Anordnung ermöglicht insgesamt eine kompakte Bauweise und dabei eine günstige Form, die zentrale Elektrode zu isolieren.

[0020] Zur günstigen Ausnutzung des Isolationsvolumens, also des Volumens zwischen der inneren und der äußeren Elektrode, sind eine oder mehrere konzentrische Zwischenelektroden auf geeignete Potentiale gebracht. Die Potentialstufen sind sukzessive ansteigend und können derart gewählt werden, dass sich im Inneren des gesamten Isolationsvolumens eine im weitgehenden gleichmäßige Feldstärke ergibt.

[0021] Die eingebrachte/n Zwischenelektrode/n erhöhen zudem die Durchschlagsfeldstärkegrenze, sodass höhere Gleichspannungen erzeugt werden können als ohne Zwischenelektroden. Dies beruht darauf, dass die Durchbruchsfeldstärke in Vakuum in etwa umgekehrt proportional zur Quadratwurzel der Elektrodenabstände ist. Die eingebrachten/n Zwischenelektrode/n, mit denen das elektrische Feld im Inneren der Gleichspannungs-Hochspannungsquelle gleichmäßiger wird, tragen gleichzeitig zu einer vorteilhaften Erhöhung der möglichen, erreichbaren Feldstärke bei.

[0022] In einer Ausgestaltung ist die Vorrichtung dazu ausgebildet, einen Laserstrahl bereitzustellen, der derart in Wechselwirkung mit dem beschleunigten Teilchenstrahl tritt, dass die ausgesendeten Photonen aus einer inversen Compton-Streuung des Laserstrahls an den geladenen Teilchen des beschleunigten Teilchenstrahls hervorgehen. Die ausgesendeten Photonen sind kohärent. Der Laserstrahl kann vorteilhaft durch Ausbildung eines Fokus innerhalb der Lasercavity gewonnen werden.

[0023] Die Energie des Laserstrahls, die Beschleunigung der Teilchen und/oder die Teilchenart können derart aufeinander abgestimmt sein, dass die ausgesendeten Photonen im Röntgenstrahlbereich liegen. Auf diese Weise kann der Beschleuniger als kompakte kohärente Röntgenquelle betrieben werden.

[0024] Der Teilchenstrahl kann ein Elektronenstrahl sein. Hierzu kann eine Elektronenquelle z.B. außerhalb der äußersten Elektrode des Kondensatorstapels angeordnet werden.

[0025] In einer anderen Ausgestaltung ist die Vorrichtung dazu ausgebildet, ein Magnet-Querfeld, z.B. mit einem Dipolmagnet, zur Verlaufsrichtung des Teilchenstrahls zu erzeugen. Hierdurch wird eine Ablenkung des beschleunigten Teilchenstrahls bewirkt, sodass die Photonen als Synchrotronstrahlung von dem Teilchenstrahl ausgesendet werden. Der Beschleuniger kann dadurch als Synchrotronstrahlungsquelle und insbesondere als Freier Elektronenlaser durch kohärente Überlagerung der einzelnen Strahlungskeulen.

[0026] Die Vorrichtung kann insbesondere ein Magnet-Querfeld erzeugen, das entlang einer Strecke im Inneren des Kondensatorstapels eine periodische Ablenkung des beschleunigten Teilchenstrahls bewirkt, z.B. durch eine Serie von Dipolmagneten. Hierdurch kann der Beschleuniger besonders effizient kohärente Photonen erzeugen.

[0027] Die von dem Teilchenstrahl ausgesendete elektromagnetische Strahlung kann durch einen Kanal durch den Elektrodenstapel hindurch austreten.

[0028] In einer vorteilhaften Ausgestaltung sind die Elektroden des Kondensatorstapels zueinander durch Vakuumisolation isoliert. Auf diese Weise lässt sich eine möglichst effiziente, d.h. platzsparende und robuste Isolation der Hochspannungselektrode erreichen. Im Isolationsvolumen befindet sich folglich Hochvakuum. Eine Verwendung von isolierenden Materialien hätte den Nachteil, dass die Materialien bei Belastung durch ein elektrisches Gleichfeld zur Anschoppung von internen Ladungen - die insbesondere durch ionisierende Strahlung beim Betrieb des Beschleunigers hervorgerufen werden - neigen. Die angeschoppten, wandernden Ladungen rufen in allen physischen Isolatoren eine stark inhomogene elektrische Feldstärke hervor, die dann zur lokalen Überschreitung der Durchschlagsgrenze und damit

Ausbildung von Funkenkanälen führt. Eine Isolation durch Hochvakuum vermeidet derartige Nachteile. Die im stabilen Betrieb ausnutzbare elektrische Feldstärke lässt sich dadurch vergrößern. Die Anordnung ist damit im Wesentlichen - bis auf wenige Komponenten wie z.B. die Aufhängung der Elektroden - frei von Isolatormaterialien.

[0029] Bei einem Beschleuniger hat die Verwendung von Vakuum zudem den Vorteil, dass kein eigenes Strahlrohr vorgesehen werden muss, das seinerseits wenigstens teilweise eine Isolatoroberfläche aufweist würde. Auch hier wird vermieden, dass kritische Probleme der Wandentladung entlang der Isolatoroberflächen auftreten würden, da der Beschleunigungskanal nun keine Isolatoroberflächen aufweisen muss. Ein Beschleunigungskanal wird lediglich durch in einer Linie hintereinander liegenden Öffnungen in den Elektroden gebildet.

[0030] In einer vorteilhaften Ausführungsform umfasst die Schaltvorrichtung eine Hochspannungskaskade, insbesondere eine Greinacher-Kaskade oder eine Cockcroft-Walton-Kaskade. Mit einer derartigen Vorrichtung kann mithilfe einer vergleichsweise geringen Wechselspannung die erste Elektrode, die zweite Elektrode sowie die Zwischenelektroden zur Erzeugung der Gleichspannung geladen werden. Diese Ausführungsform beruht auf der Idee einer Hochspannungserzeugung, wie sie beispielsweise durch eine Greinacher-Gleichrichterkaskade ermöglicht wird.

[0031] Bei einer Ausführungsvariante ist der Kondensatorstapel durch einen Spalt, der durch die Elektroden verläuft, in zwei voneinander getrennte Kondensatorketten aufgeteilt. Durch eine Trennung der konzentrischen Elektroden des Kondensatorstapels in zwei voneinander getrennte Kondensatorketten können die zwei Kondensatorketten in vorteilhafterweise für die Ausbildung einer kaskadierten Schaltvorrichtung wie einer Greinacher- oder Cockcroft-Walton-Kaskade verwendet werden. Jede Kondensatorkette stellt dabei eine Anordnung ihrerseits konzentrisch zueinander angeordneten (Teil-)Elektroden dar.

[0032] Bei einer Ausbildung des Elektrodenstapels als Kugelschalenstapel kann die Trennung z.B. durch einen Schnitt entlang des Äquators erfolgen, der dann zu zwei Halbkugelstapel führt.

[0033] Die einzelnen Kondensatoren der Ketten können bei einer derartigen Schaltung jeweils auf die Spitze-Spitze-Spannung der primären Eingangswechselspannung, die zum Laden der Hochspannungsquelle dient, geladen werden. Die oben genannte Potentialäquilibrierung, eine gleichmäßige elektrische Feldverteilung und damit eine optimale Ausnutzung der Isolationsstrecke lässt sich auf einfache Weise erreichen.

[0034] In vorteilhafter Weise kann die Schaltvorrichtung, welche eine Hochspannungskaskade umfasst, die zwei voneinander getrennten Kondensatorketten miteinander verbinden und insbesondere in dem Spalt angeordnet sein. Die Eingangswechselspannung für die Hochspannungskaskade kann zwischen den beiden äußersten Elektroden der Kondensatorketten angelegt werden, da diese z.B. von außen zugänglich sein können. Die Diodenketten einer Gleichrichterschaltung lassen sich dann in dem äquatorialen Spalt - und dadurch auf Platz sparende Weise - anbringen.

[0035] Die Elektroden des Kondensatorstapels können derart geformt sein, dass sie auf einer Ellipsoid-Oberfläche, insbesondere einer Kugeloberfläche, oder auf einer Zylinder-Oberfläche liegen. Diese Formen sind physisch günstig. Besonders günstig ist die Wahl der Form der Elektroden wie bei einer Hohlkugel bzw. dem Kugelkondensator. Ähnliche Formen wie z.B. bei einem Zylinder sind auch möglich, wobei letzterer allerdings üblicherweise eine vergleichsweise inhomogene elektrische Feldverteilung aufweist.

[0036] Die geringe Induktivität der schalenartigen Potentialelektroden erlaubt die Anwendung hoher Betriebsfrequenzen, so dass die Spannungsabsenkung bei Stromentnahme trotz relativ geringer Kapazität der einzelnen Kondensatoren begrenzt bleibt.

[0037] Ausführungsbeispiele der Erfindung werden anhand der folgenden Zeichnung näher erläutert, ohne jedoch darauf beschränkt zu sein. Darin zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung einer Greinacherschaltung, wie sie aus dem Stand der Technik bekannt ist.

Fig. 2 eine schematische Darstellung eines Schnitts durch eine Gleichspannungs-Hochspannungsquelle mit einer Teilchenquelle im Zentrum,

Fig. 3 eine schematische Darstellung eines Schnitts durch eine Gleichspannungs-Hochspannungsquelle nach Fig. 2 mit zum Zentrum hin abnehmenden Elektrodenabstand,

Fig. 4 eine schematische Darstellung eines Schnitts durch eine Gleichspannungs-Hochspannungsquelle, die als freier Elektronenlaser ausgebildet ist,

Fig. 5 eine schematische Darstellung eines Schnitts durch eine Gleichspannungs-Hochspannungsquelle, die als kohärente Röntgenquelle ausgebildet ist,

Fig. 6 eine schematische Darstellung des Elektrodenaufbaus mit einem Stapel zylinderförmig angeordneter Elektroden,

Fig. 7 eine Darstellung der Dioden der Schaltvorrichtung, die als vakuumkolbenfreie Elektronenröhren ausgebildet sind,

Fig. 8 ein Diagramm, das den Ladungsvorgang in Abhängigkeit von Pumpzyklen zeigt, und

Fig. 9 die vorteilhafte Kirchhoff-Form der Elektrodenenden.

[0038] Gleiche Teile sind in den Figuren mit denselben Bezugszeichen versehen.

[0039] Am Schaltbild in der Fig. 1 soll das Prinzip einer Hochspannungskaskade 9, die gemäß einer Greinacherschaltung aufgebaut ist, verdeutlicht werden.

[0040] An einem Eingang 11 wird eine Wechselspannung U angelegt. Die erste Halbwelle lädt über die Diode 13 den Kondensator 15 auf die Spannung U auf. Bei der darauf folgenden Halbwelle der Wechselspannung addiert sich die Spannung U vom Kondensator 13 mit der Spannung U am Eingang 11, so dass der Kondensator 17 über die Diode 19 nun auf die Spannung 2U aufgeladen wird. Dieser Prozess wiederholt sich in den darauf folgenden Dioden und Kondensatoren, so dass in der in Fig. 1 abgebildeten Schaltung insgesamt am Ausgang 21 die Spannung 6U erzielt wird. Die Fig. 2 zeigt auch deutlich, wie durch die dargestellte Schaltung jeweils der erste Satz 23 von Kondensatoren eine erste Kondensatorkette und der zweite Satz 25 von Kondensatoren eine zweite Kondensatorkette bildet.

[0041] Fig. 2 zeigt einen schematischen Schnitt durch eine Hochspannungsquelle 31 mit einer zentralen Elektrode 37, einer äußeren Elektrode 39 und einer Reihe von Zwischenelektroden 33, die durch eine Hochspannungskaskade 35, deren Prinzip in Fig. 1 erläutert wurde, verschaltet sind und durch diese Hochspannungskaskade 35 geladen werden können.

[0042] Die Elektroden 39, 37, 33 sind hohlkugelförmig ausgebildet und konzentrisch zueinander angeordnet. Die maximale elektrische Feldstärke, die angelegt werden kann, ist proportional zur Kurvatur der Elektroden. Daher ist eine Kugelschalengeometrie besonders günstig.

[0043] Im Zentrum liegt die Hochspannungselektrode 37, die äußerste Elektrode 39 kann eine Masseelektrode sein. Durch einen äquatorialen Schnitt 47 sind die Elektroden 37, 39, 33 in zwei voneinander, durch einen Spalt getrennte Halbkugelstapel geteilt. Der erste Halbkugelstapel bildet eine erste Kondensatorkette 41, der zweite Halbkugelstapel eine zweite Kondensatorkette 43.

[0044] Dabei werden an die äußersten Elektroden-Schalenhälften 39', 39" jeweils die Spannung U einer Wechselspannungsquelle 45 angelegt. Die Dioden 49 zur Bildung der Schaltung sind im Bereich des Großkreises der Halbhohlkugeln angeordnet, d. h. im äquatorialen Schnitt 47 der jeweiligen Hohlkugeln. Die Dioden 49 bilden die Querverbindungen zwischen den beiden Kondensatorketten 41, 43, die den beiden Sätzen 23, 25 an Kondensatoren aus Fig. 1 entsprechen.

[0045] In der hier dargestellten Hochspannungsquelle 31 führt durch die zweite Kondensatorkette 43 ein Beschleunigungskanal 51, welcher von einer z.B. im Inneren liegenden Teilchenquelle 53 ausgeht und eine Extraktion des Teilchenstroms ermöglicht. Der Teilchenstrom geladener Teilchen erfährt von der hohlkugelförmigen Hochspannungselektrode 37 eine hohe Beschleunigungsspannung.

[0046] Die Hochspannungsquelle 31 bzw. der Teilchenbeschleuniger weist den Vorteil auf, dass der Hochspannungsgenerator und der Teilchenbeschleuniger ineinander integriert sind, da dann alle Elektroden und Zwischenelektroden im kleinstmöglichen Volumen untergebracht werden können.

[0047] Um die Hochspannungselektrode 37 zu isolieren, ist die gesamte Elektrodenanordnung durch eine Vakuumisolation isoliert. Unter anderem können dadurch besonders hohe Spannungen der Hochspannungselektrode 37 erzeugt werden, was eine besonders hohe Teilchenenergie zur Folge hat. Es ist aber auch prinzipiell eine Isolierung der Hochspannungselektrode mittels fester oder flüssiger Isolation denkbar.

[0048] Die Verwendung von Vakuum als Isolator und die Verwendung eines Zwischenelektrodenabstandes in der Größenordnung von 1 cm ermöglichen es, elektrische Feldstärken von Werten von über 20 MV/m zu erreichen. Darüber hinaus hat die Verwendung von Vakuum den Vorteil, dass der Beschleuniger während des Betriebs nicht unterbelastet werden muss, da die bei der Beschleunigung auftretende Strahlung bei Isolatormaterialien zu Problemen führen kann. Dies erlaubt den Bau kleinerer und kompakterer Maschinen.

[0049] Fig. 3 zeigt eine Weiterbildung der in Fig. 2 gezeigten Hochspannungsquelle, bei der der Abstand der Elektroden 39, 37, 33 zum Zentrum hin abnimmt. Durch eine derartige Ausgestaltung lässt sich die Abnahme der an der äußeren Elektrode 39 angelegten Pump-Wechselspannung zum Zentrum hin kompensieren, sodass dennoch zwischen benachbarten Elektrodenpaaren eine im Wesentlichen gleiche Feldstärke herrscht. Durch diese erfindungsgemäße Maßnahme lässt sich eine weitgehend konstante Feldstärke entlang des Beschleunigungskanals 51 erreichen. Diese Ausgestaltung lässt sich ebenso auf die nachfolgend erläuterten Anwendungen und Ausgestaltungen anwenden.

[0050] Fig. 4 zeigt eine Weiterbildung der in Fig. 2 gezeigten Hochspannungsquelle zum freien Elektronenlaser 61. Die Schaltvorrichtung 35 aus Fig. 2 ist der Übersichtlichkeit halber nicht dargestellt, ist aber bei der in Fig. 4 gezeigten Hochspannungsquelle identisch. Ebenso kann der Aufbau einen zum Zentrum hin abnehmenden Elektrodenabstand

wie in Fig. 3 gezeigt aufweisen.

[0051] In dem hier dargestellten Beispiel weist auch die erste Kondensatorkette 41 einen Beschleunigungskanal 53 auf, der durch die Elektroden 33, 37, 39 führt.

[0052] Im Inneren der zentralen Hochspannungselektrode 37 ist anstelle der Teilchenquelle eine Magnetvorrichtung 55 angeordnet, mit der der Teilchenstrahl periodisch abgelenkt werden kann. Es können dann Elektronen außerhalb der Hochspannungsquelle 61 erzeugt werden, entlang des Beschleunigungskanals 53 durch die erste Kondensatorkette 41 zu der zentralen Hochspannungselektrode 37 beschleunigt werden. Bei Durchgang durch die Magnetvorrichtung 55 wird kohärente Synchrotronstrahlung 57 erzeugt, und der Beschleuniger kann als freier Elektronenlaser 61 betrieben werden. Durch den Beschleunigungskanal 51 der zweiten Kondensatorkette 43 wird der Elektronenstrahl wieder abgebremst und die zur Beschleunigung aufgewendete Energie kann zurück gewonnen werden.

[0053] Die äußerste Kugelschale 39 kann weitgehend geschlossen bleiben und so die Funktion eines geerdeten Gehäuses übernehmen.

[0054] Die unmittelbar darunter liegende Halbkugelschale kann dann die Kapazität eines LC-Schwingkreises und Teil des Antriebsanschlusses der Schaltvorrichtung sein.

[0055] Für eine derartige Beschleunigung kann der Beschleuniger eine 10 MV Hochspannungsquelle vorsehen, welche N = 50 Stufen aufweist, d.h. also insgesamt 100 Dioden und Kondensatoren. Bei einem inneren Radius von r = 0,05 m und einer Vakuumisolation mit einer Durchbruchfeldstärke von 20 MV/m beträgt der äußere Radius 0,55 m. In jeder Halbkugel finden 50 Zwischenräume mit einem Abstand von 1 cm zwischen benachbarten Kugelschalen.

[0056] Eine geringere Anzahl von Stufen reduziert die Anzahl der Ladezyklen und die effektive interne Quellenimpedanz, erhöht jedoch die Anforderungen an die Pump-Ladespannung.

[0057] Die im äquatorialen Spalt angeordneten Dioden, die die beiden Hemisphären-Stapel miteinander verbinden, können z.B. in einem spiralartigen Muster angeordnet werden. Die totale Kapazität kann gemäß Gleichung (3.4) 74 pF betragen, die gespeicherte Energie 3.7 kJ. Ein Ladestrom von 2 mA benötigt eine Betriebsfrequenz von ungefähr 100 kHz.

[0058] Fig. 5 zeigt eine Abwandlung des in Fig. 4 gezeigten Beschleunigers zum einer Quelle 61' für kohärente Röntgenstrahlung.

[0059] Im Inneren der zentralen Hochspannungselektrode 37 ist anstelle der Teilchenquelle eine Laservorrichtung 59 angeordnet, mit der ein Laserstrahl 58 erzeugt und auf den Teilchenstrahl gerichtet werden kann. Durch Interaktion mit dem Teilchenstrahl werden Photonen 57' aufgrund inverser Compton-Streuung erzeugt, die von dem Teilchenstrahl ausgesendet werden.

[0060] Fig. 6 illustriert eine Elektrodenform, bei dem hohlzylinderförmige Elektroden 33, 37, 39 konzentrisch zueinander angeordnet sind. Durch einen Spalt wird der Elektrodenstapel in zwei voneinander getrennte Kondensatorketten aufgeteilt, welche mit einer analog zu Fig. 2 aufgebauten Schaltvorrichtung verschaltet werden können.

[0061] Fig. 7 zeigt eine Ausgestaltung der Dioden der Schaltvorrichtung gezeigt. Die konzentrischen angeordneten, halbkugelschalartigen Elektroden 39, 37, 33 sind der Übersichtlichkeit halber nur angedeutet dargestellt.

[0062] Die Dioden sind hier als Elektronenröhren 63 gezeigt, mit einer Kathode 65 und einer gegenüberliegenden Anode 67. Da die Schaltvorrichtung in der Vakuumisolation angeordnet ist, entfällt das Vakuumgefäß der Elektronenröhren, das sonst zum Betrieb der Elektronen notwenig wäre. Die Elektronenröhren 63 können über thermische Heizung oder über Licht gesteuert werden.

[0063] Im Folgenden werden eine nähere Ausführungen zu Komponenten der Hochspannungsquelle bzw zu dem Teilchenbeschleuniger gemacht.

Sphärischer Kondensator

[0064] Die Anordnung folgt dem in Fig. 1 gezeigten Prinzip, die Hochspannungselektrode im Inneren des Beschleunigers und die konzentrische Masseelektrode an der Außenseite des Beschleunigers anzuordnen.

[0065] Ein Kugelkondensator mit innerem Radius r und äußerem Radius R hat die Kapazität

$$C = 4\pi\epsilon_0 \frac{r\,R}{R - r} \quad . \tag{3.1}$$

[0066] Die Feldstärke bei Radius ρ ist dann

$$E = \frac{r\,R}{(R - r)\,\rho^2} U \tag{3.2}$$

[0067] Diese Feldstärke ist quadratisch abhängig vom Radius und nimmt zur inneren Elektrode hin somit stark zu.

Bei der Inneren Elektrodenfläche ρ = r ist das Maximum

$$\hat{E} = \frac{R}{r(R-r)} U \qquad (3.3)$$

erreicht. Aus Sicht der Durchbruchsfestigkeit ist dies unvorteilhaft.

[0068] Ein hypothetischer sphärischer Kondensator mit einem homogenen elektrischen Feld hätte die Kapazität

$$\bar{C} = 4\pi\epsilon_0 \frac{R^2 + r\,R + r^2}{R - r} \,. \qquad (3.4)$$

[0069] Dadurch, dass im Kaskadenbeschleuniger die Elektroden der Kondensatoren der Greinacherkaskade als Zwischenelektroden auf klar definiertem Potential eingefügt sind, wird die Feldstärkeverteilung über den Radius linear angeglichen, da für dünnwandige Hohlkugeln die elektrische Feldstärke ungefähr gleich dem flachen Fall

$$E \longrightarrow \frac{U}{(R-r)} \,. \qquad (3.5)$$

mit minimaler maximaler Feldstärke ist.

[0070] Die Kapazität zweier benachbarter Zwischenelektroden ist

$$C_k = 4\pi\epsilon_0 \frac{r_k\, r_{k+1}}{r_{k+1} - r_k} \,. \qquad (3.6)$$

[0071] Halbkugelförmige Elektroden und gleicher Elektrodenabstand d = (R-r)/N führt zu r_k= r +kd und zu Elektrodenkapazitäten

$$C_{2\,k} = C_{2\,k+1} = 2\pi\epsilon_0 \frac{r^2 + rd + (2rd + d^2)\,k + d^2\,k^2}{d} \,. \qquad (3.7)$$

Gleichrichter

[0072] Moderne Avalanche-Halbleiter-Dioden (engl: "soft avalanche semiconductor diodes") haben sehr geringe parasitäre Kapazitäten und weisen kurze Erholzeiten auf. Eine Schaltung in Serie benötigt keine Widerstände zur Potentialäquilibrierung. Die Betriebsfrequenz kann vergleichsweise hoch gewählt werden, um die relativ kleinen Interelektroden-Kapazitäten der beiden Greinacher-Kondensatorstapel zu nutzen.

[0073] Bei einer Pump-Spannung zum Laden der Greinacher-Kaskade kann eine Spannung von U_{in}≈100kV, also 70 kV_{eff}, verwendet werden. Die Dioden müssen Spannungen von 200 kV aushalten. Dies kann dadurch erreicht werden, dass Ketten von Dioden mit einer geringeren Toleranz verwendet werden. Es können beispielsweise zehn 20 kV Dioden verwendet werden. Dioden können z.B. Dioden der Firma Philips mit der Bezeichnung BY724, Dioden der Firma EDAL mit der Bezeichnung BR757-200A oder Dioden der Firma Fuji mit der Bezeichnung ESJA5320A sein.

[0074] Schnelle Sperr-Erholzeiten (reverse recovery time), z.B. t_{rr}≈100 ns für BY724, minimieren Verluste. Die Abmessung der Diode BY724 von 2,5 mm x 12,5 mm erlaubt es, alle 1000 Dioden für die Schaltvorrichtung in einer einzigen äquatorialen Ebene für den weiter unten näher spezifizierten, kugelförmigen Tandembeschleuniger unterzubringen.

[0075] Anstelle von Festkörperdioden können auch Elektronenröhren eingesetzt werden, bei denen die Elektronenemission zur Gleichrichtung verwendet wird. Die Kette von Dioden kann durch eine Vielzahl ein maschenartig zueinander angeordneten Elektroden der Elektronenröhren gebildet werden, die mit den Halbkugelschalen verbunden sind. Jede Elektrode agiert einerseits als Kathode, andererseits als Anode.

Diskreter Kondensator-Stapel

[0076] Die zentrale Idee besteht darin, die konzentrischen nacheinander angeordneten Elektroden auf einer Äquatorebene durchzuschneiden. Die beiden resultierenden Elektroden-Stapel stellen die Kaskaden-Kondensatoren dar. Es

ist lediglich notwendig, die Kette von Dioden an gegenüberliegende Elektroden über die Schnittebene hinweg anzuschließen. Es ist anzumerken, dass der Gleichrichter die Potentialunterschiede der nacheinander angeordneten Elektroden automatisch auf etwa 2 U_{in} stabilisiert, was konstante Elektrodenabstände nahelegt. Die Antriebsspannung wird zwischen den beiden äußeren Hemisphären angelegt.

Ideale Kapazitätsverteilung

[0077] Wenn die Schaltung nur die Kapazitäten der Abb. 3 enthält, liefert der stationäre Betrieb eine Betriebsfrequenz f eine Ladung

$$Q = \frac{I_{out}}{f} \quad (3.8)$$

pro Vollwelle in die Last durch den Kondensator C_0. Jedes der Kondensatorpaare C_{2k} und C_{2k+1} übertragen somit eine Ladung (k+1)Q.

[0078] Die Ladungspumpe stellt eine Generator-Quellen-Impedanz

$$R_G = \frac{1}{2f} \sum_{k=0}^{N-1} \left(\frac{2k^2 + 3k + 1}{C_{2k}} + \frac{2k^2 + 4k + 2}{C_{2k+1}} \right) , \quad (3.9)$$

dar. Dadurch reduziert ein Laststrom I_{out} die DC-Ausgangsspannung gemäß

$$U_{out} = 2\,N\,U_{in} - R_G\,I_{out} . \quad (3.10)$$

[0079] Der Laststrom verursacht eine AC-Restwelligkeit am DC-Ausgang mit dem Spitze-zu-Spitze-Wert

$$\delta U = \frac{I_{out}}{f} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{k+1}{C_{2k}} , \quad (3.11)$$

[0080] Wenn alle Kondensatoren gleich $C_k = C$ sind, ist die effektive Quellenimpedanz

$$R_G = \frac{8N^3 + 9N^2 + N}{12\,fC} \quad (3.12)$$

und der Spitze-zu-Spitze-Wert der AC-Welligkeit wird

$$\delta U = \frac{I_{out}}{fC} \frac{N^2 + N}{2} , \quad (3.13)$$

[0081] Für einen gegebenen Gesamtenergie-Speicher innerhalb des Gleichrichters reduziert ein kapazitives Ungleichgewicht zugunsten des Niederspannungsteils die Werte R_G und R_R geringfügig im Vergleich zur üblichen Wahl von gleichen Kondensatoren.

[0082] Fig. 7 zeigt das Aufladen einer ungeladenen Kaskade von N = 50 konzentrischen Halbkugeln, aufgetragen über die Anzahl von Pump-Zyklen.

Streukapazitäten

[0083] Jeglicher Ladungsaustausch zwischen den zwei Säulen reduziert die Effizienz der Vervielfacher-Schaltung, siehe Fig. 1, z.B. aufgrund der Streukapazitäten c_j und der Sperrverzögerungsladungsverluste (engl: "reverse recovery charge loss") q_j durch die Dioden D_j.

[0084] Die Grundgleichungen für die Kondensatorspannungen $U_k^{\pm}$ an der positiven und negativen Extrema der Spitzenantriebspannung U, wobei der Dioden-Durchlassspannungsabfall vernachlässigt wird, sind:

$$U_{2k}^{+} = u_{2k+1} \tag{3.14}$$

$$U_{2k}^{-} = u_{2k} \tag{3.15}$$

$$U_{2k+1}^{+} = u_{2k+1} \tag{3.16}$$

$$U_{2k+1}^{-} = u_{2k+2} \tag{3.17}$$

bis zum Index 2N - 2 und

$$U_{2N-1}^{+} = u_{2N-1} - U \tag{3.18}$$

$$U_{2N-1}^{-} = U \,. \tag{3.19}$$

[0085] Mit dieser Nomenklatur ist die durchschnittliche Amplitude der DC-Ausgangsspannung

$$U_{\mathrm{out}} = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{2N-1} u_k \,. \tag{3.20}$$

[0086] Der Spitze-zu-Spitze-Wert der Welligkeit der DC-Spannung ist

$$\delta U = \sum_{k=0}^{2N-1} (-1)^{k+1} u_k \,. \tag{3.21}$$

[0087] Mit Streukapazitäten c_i parallel zu den Dioden D_i sind die Grundgleichungen für die Variablen $u_{-1} = 0$, $U_{2N} = 2$ U, und das tridiagonale Gleichungssystem ist

$$C_{k-1}u_{k-1} - (C_{k-1} + C_k)u_k + (C_k - c_k)u_{k+1} = \begin{cases} Q & \forall\, k \text{ even} \\ 0 & \forall\, k \text{ odd} \,. \end{cases} \tag{3.22}$$

[0088] Sperrverzögerungsladungen (engl: "reverse recovery charges") Endliche Sperrverzögerungszeiten t_{rr} der begrenzten Dioden verursachen einen Ladungsverlust von

$$q_D = \eta Q_D \tag{3.23}$$

mit $\eta = f\, t_{rr}$ und Q_D für die Ladung pro Vollwelle in Vorwärtsrichtung. Gl. (3.22) wird dann zu

$$C_{k-1}u_{k-1} - (C_{k-1} + (1-\eta)C_k)\,u_k + ((1-\eta)C_k - c_k)\,u_{k+1} = \begin{cases} Q & \forall k \text{ even} \\ 0 & \forall k \text{ odd} \end{cases}, \tag{3.24}$$

Kontinuierlicher Kondensatorstapel

Kapazitive Übertragungsleitung

[0089] In Greinacher-Kaskaden nehmen die Gleichrichterdioden im Wesentlichen die AC-Spannung auf, verwandeln sie in DC-Spannung und akkumulieren diese zu einer hohen DC-Ausgangsspannung. Die AC-Spannung wird von den beiden Kondensator-Säulen auf die Hochspannungselektrode geleitet, und durch die Gleichrichter-Ströme und Streukapazitäten zwischen den beiden Säulen gedämpft.

[0090] Für eine hohe Anzahl N von Stufen kann diese diskrete Struktur durch eine kontinuierliche Übertragungsleitung-Struktur angenähert werden.

[0091] Für die AC-Spannung stellt der Kondensatoraufbau einen longitudinale Impedanz mit einer längenspezifischen Impedanz $\mathfrak{Z}$ dar. Streukapazitäten zwischen den beiden Säulen führen eine längenspezifische Shunt-Admittanz $\mathfrak{Y}$ ein. Der Spannungsstapelung der Gleichrichter-Dioden bewirkt eine zusätzliche spezifische Stromlast $\mathfrak{J}$, die proportional ist zum DC-Laststrom I_{out} und zur Dichte der Anzapfungen entlang der Übertragungsleitung.

[0092] Die Grundgleichungen für die AC-Spannung U (x) zwischen den Säulen und dem AC-Längsstrom I (x) sind

$$I' = \mathfrak{Y}U + \mathfrak{J} \tag{3.25}$$

$$U' = \mathfrak{Z}I . \tag{3.26}$$

[0093] Die allgemeine Gleichung ist eine erweiterte Telegraphengleichung

$$U'' - \frac{\mathfrak{Z}'}{\mathfrak{Z}}U' - \mathfrak{Z}\mathfrak{Y}U = \mathfrak{Z}\mathfrak{J} . \tag{3.27}$$

[0094] Im Allgemeinen ist die Spitze-zu-Spitze-Welligkeit am DC-Ausgang gleich der Differenz der AC-Spannungsamplitude an beiden Enden der Übertragungsleitung

$$\delta U = U(x_0) - U(x_1) . \tag{3.28}$$

[0095] Zwei Randbedingungen sind für eine eindeutige Lösung dieser Differentialgleichung zweiter Ordnung erforderlich.

[0096] Eine der Randbedingungen kann U (x_0) = U_{in} sein, gegeben durch die AC-Antriebsspannung zwischen den DC-Niederspannungsenden der beiden Säulen. Die andere natürliche Randbedingung bestimmt den AC-Strom am DC-Hochspannungsende x = x_1. Die Randbedingung für eine konzentrierte terminale AC-Impedanz Z_1 zwischen den Säulen ist

$$U'(x_1) = \frac{\mathfrak{Z}(x_1)}{Z_1}U(x_1) . \tag{3.29}$$

[0097] Im unbelasteten Fall $Z_1 = \infty$ ist die Randbedingung U'(x_1) = 0. Konstanter Elektrodenabstand

[0098] Für einen konstanten Elektrodenabstand t ist der spezifische Laststrom

$$\mathfrak{I} = \frac{\pi I_{out}}{t} , \qquad (3.30)$$

so dass die Verteilung der AC-Spannung geregelt ist durch

$$U'' - \frac{\mathfrak{Z}'}{\mathfrak{Z}} U' - 2\mathfrak{Y} U = 2\mathfrak{I} , \qquad (3.31)$$

[0099] Die durchschnittliche DC Ausgangsspannung ist dann

$$U_{out} = \frac{2 U_{in}}{t} \int_0^{Nt} U(x)\, dx \qquad (3.32)$$

und die DC-Spitze-zu-Spitze-Welligkeit der DC-Spannung ist

$$\delta U = U(Nt) - U(0) . \qquad (3.33)$$

Optimaler Elektrodenabstand

[0100] Der optimale Elektrodenabstand sorgt für eine konstante elektrische Gleichstrom-Feldstärke 2 E bei dem geplanten DC Laststrom. Der spezifische AC-Laststrom entlang der Übertragungsleitung ist positionsabhängig

$$\mathfrak{I} = \frac{\pi E I_{out}}{U} , \qquad (3.34)$$

[0101] Die AC-Spannung folgt

$$UU'' - \frac{\mathfrak{Z}'}{\mathfrak{Z}} UU' - 2\mathfrak{Y} U^2 = 2\mathfrak{Z}\pi E I_{out} , \qquad (3.35)$$

[0102] Die Elektrodenabstände ergeben sich aus den lokalen AC-Spannungsamplituden t(x) = U(x)/E.

[0103] Die DC-Ausgangsspannung bei dem geplanten DC-Laststroms ist U_{out} = 2Ed. Eine Verringerung der Last erhöht stets die Spannungen zwischen den Elektroden, daher kann ein Betrieb mit wenig oder ohne Last das zulässige E und die maximale Belastbarkeit der Gleichrichtersäulen überschreiten. Es kann daher empfehlenswert sein, das Design für einen unbelasteten Betrieb zu optimieren.

[0104] Für jede gegebene Elektrodenverteilung, die anders ist als diejenige bei Auslegung für einen geplanten DC-Laststroms, ist die AC-Spannung entlang der Übertragungsleitung und damit die DC-Ausgangsspannung geregelt durch die Gl. (3.27).

Lineare Kaskade

[0105] Für eine lineare Kaskade mit flachen Elektroden der Breite w, Höhe h und einem Abstand s zwischen den Säulen sind Übertragungsleitung-Impedanzen

$$\mathfrak{Z} = \frac{2}{\varepsilon_0 \omega\, w/h} , \qquad \mathfrak{Y} = \frac{\varepsilon_0 \omega\, w}{s} , \qquad (3.36)$$

Lineare Kaskade - Konstanter Elektrodenabstand

[0106] Die inhomogene Telegraphengleichung ist

$$U'' - \frac{2}{hs} U = \frac{I_{\text{out}}}{f \epsilon_0 w h t} , \qquad (3.37)$$

[0107] Unter Annahme einer Leitung, die sich von x = 0 bis x = d = Nt erstreckt und die durch U_{in} = U (0) betrieben wird, und einer Ausbreitungskonstante von γ^2 = 2/(h*s), lautet die Lösung

$$U(x) = \frac{\cosh \gamma x}{\cosh \gamma d} U_{\text{in}} + \left(\frac{\cosh \gamma x}{\cosh \gamma d} - 1 \right) \frac{Ns}{2 f \epsilon_0 dw} I_{\text{out}} , \qquad (3.38)$$

[0108] Die Dioden zapfen im Wesentlichen die AC-Spannung an, richten sie gleich und akkumulieren sie entlang der Übertragungsleitung. Die durchschnittliche DC-Ausgangsspannung ist somit

$$U_{\text{out}} = \frac{2}{t} \int_0^d U(x) \, dx , \qquad (3.39)$$

oder - explizit -

$$U_{\text{out}} = 2N \frac{\tanh \gamma d}{\gamma d} U_{\text{in}} + \left(\frac{\tanh \gamma d}{\gamma d} - 1 \right) \frac{N^2 s}{f \epsilon_0 dw} I_{\text{out}} , \qquad (3.40)$$

[0109] Eine Reihenerweiterung bis zur dritten Ordnung nach γd gibt

$$U_{\text{out}} \approx 2N U_{\text{in}} \left(1 - \frac{2 d^2}{3 hs} \right) - \frac{2 N^2}{3 f} \frac{d}{\epsilon_0 hw} I_{\text{out}} \qquad (3.41)$$

und

$$\delta U \approx \frac{d^2}{hs} U_{\text{in}} + \frac{N}{f} \frac{d}{2 \epsilon_0 hw} I_{\text{out}} , \qquad (3.42)$$

[0110] Die Laststrom-bezogenen Effekte entsprechen Gl. (3.12) und (3.13).

Lineare Kaskade - Optimaler Elektrodenabstand

[0111] Die Grundgleichung ist hier

$$UU'' - \frac{2}{hs} U^2 = \frac{E I_{\text{out}}}{f \epsilon_0 wh} , \qquad (3.43)$$

[0112] Es scheint, dass diese Differentialgleichung keine geschlossene analytische Lösung hat. Die implizite Lösung,

die U'(0) = 0 erfüllt, ist

$$x = \int_{U(0)}^{U(x)} \frac{du}{\sqrt{\frac{2}{hs}\left(u^2 - U^2(0)\right) + \frac{2I_{out}}{f\epsilon_0 wh}\log\frac{u}{U(0)}}} . \qquad (3.44)$$

Radiale Kaskade

[0113] Unter der Annahme eines Stapels konzentrischer Zylinderelektroden mit einer Radius-unabhängigen Höhe h und einem axialen Spalt s zwischen den Säulen wie in Fig. 4 gezeigt sind die radial-spezifischen Impedanzen

$$\mathfrak{Z} = \frac{1}{t\pi\epsilon_0\omega rh} , \qquad \mathfrak{Y} = \frac{2\pi\epsilon_0\omega r}{s} . \qquad (3.45)$$

Radiale Kaskade - Konstanter Elektrodenabstand

[0114] Mit einem äquidistanten radialen Elektrodenabstand t = (R-r)/N hat die Grundgleichung

$$U'' + \frac{1}{\rho}U' - \frac{2}{hs}U = \frac{I_{out}}{\epsilon_0\omega ht\,\rho} \qquad (3.46)$$

die allgemeine Lösung

$$U(\rho) = A\,\mathrm{K}_0(\gamma\rho) + B\,\mathrm{I}_0(\gamma\rho) + \frac{I_{out}}{4\gamma f\,\epsilon_0 ht}\mathrm{L}_0(\gamma\rho) , \qquad (3.47)$$

mit $\gamma^2 = 2/(h^*s)$. K_0 und I_0 sind die modifizierte Bessel-Funktionen und L_0 ist die modifizierte STRUVE Funktion L_0 nullter Ordnung.

[0115] Die Randbedingungen U'(r) = 0 am inneren Radius r und U (R) = U_{in} am äußeren Radius R bestimmen die beiden Konstanten

$$A = \frac{U_{in}\mathrm{I}_1(\gamma r) - \frac{I_{out}}{4\gamma f\,\epsilon_0 ht}\left[\mathrm{I}_1(\gamma r)\mathrm{L}_0(\gamma R) - \mathrm{I}_0(\gamma R)\left(\mathrm{L}_1(\gamma r) + \frac{2}{\pi}\right)\right]}{\mathrm{I}_0(\gamma R)\mathrm{K}_1(\gamma r) + \mathrm{I}_1(\gamma r)\mathrm{K}_0(\gamma R)} \qquad (3.48)$$

$$B = \frac{U_{in}\mathrm{K}_1(\gamma r) - \frac{I_{out}}{4\gamma f\,\epsilon_0 ht}\left[\mathrm{K}_1(\gamma r)\mathrm{L}_0(\gamma R) + \mathrm{K}_0(\gamma R)\left(\mathrm{L}_1(\gamma r) + \frac{2}{\pi}\right)\right]}{\mathrm{I}_0(\gamma R)\mathrm{K}_1(\gamma r) + \mathrm{I}_1(\gamma r)\mathrm{K}_0(\gamma R)} \qquad (3.49)$$

sodass

$$U(\rho) = U_{in}\frac{I_0(\gamma\rho)K_1(\gamma r)+I_1(\gamma r)K_0(\gamma\rho)}{I_0(\gamma R)K_1(\gamma r)+I_1(\gamma r)K_0(\gamma R)} + \frac{I_{out}}{4\gamma f\epsilon_0 ht}\left[L_0(\gamma\rho)-L_0(\gamma R)\frac{I_0(\gamma\rho)K_1(\gamma r)+I_1(\gamma r)K_0(\gamma\rho)}{I_0(\gamma R)K_1(\gamma r)+I_1(\gamma r)K_0(\gamma R)} - \left(L_1(\gamma r)+\frac{2}{\pi}\right)\frac{I_0(\gamma\rho)K_0(\gamma R)-I_0(\gamma R)K_0(\gamma\rho)}{I_0(\gamma R)K_1(\gamma r)+I_1(\gamma r)K_0(\gamma R)}\right]. \quad (3.50)$$

[0116] K_1 und I_1 sind die modifizierte Bessel-Funktionen und L_1 die modifizierte Struve-Funktion $L_1 = L'_0 - 2/\pi$, alle erster Ordnung.

[0117] Die DC-Ausgangsspannung ist

$$U_{out} = \frac{2}{t}\int_r^R U(\rho)\,d\rho\,. \quad (3.51)$$

Radiale Kaskade - Optimaler Elektrodenabstand

[0118] Der optimale lokale Elektrodenabstand ist $t(\rho) = U(\rho)/E$, und die Grundgleichung wird zu

$$UU'' + \frac{1}{\rho}UU' - \frac{2}{hs}U^2 = \frac{E\,I_{out}}{\epsilon_0\omega h\,\rho} \quad (3.52)$$

[0119] Es scheint, dass diese Differentialgleichung keine geschlossene analytische Lösung hat, sie kann aber numerisch gelöst werden.

Elektrodenformen

Äquipotentialflächen

[0120] Eine kompakte Maschine benötigt eine Maximierung der elektrischen Durchschlagfeldstärke. Generell glatte Oberflächen mit geringer Krümmung sollten für die Kondensatorelektroden gewählt werden. Die elektrische Durchschlagfeldstärke E skaliert in grober Näherung mit der inversen Quadratwurzel des Elektrodenabstands, so dass eine große Zahl von knapp beabstandeten Äquipotentialflächen mit geringeren Spannungsunterschieden gegenüber einigen wenigen großen Abständen mit großen Spannungsunterschieden vorzuziehen sind.

Minimale E-Feld Elektrodenkanten

[0121] Für einen im wesentlich ebenen Elektrodenaufbau mit äquidistantem Abstand und einer linearen Spannungsverteilung ist die optimale Kantenform als KIRCHHOFF-Form bekannt(siehe unten),

$$x = \frac{A}{2\pi}\ln\frac{1+\cos\vartheta}{1-\cos\vartheta} - \frac{1+A^2}{4\pi}\ln\frac{1+2A\cos\vartheta+A^2}{1-2A\cos\vartheta+A^2} \quad (3.53)$$

$$y = \frac{b}{2} + \frac{1-A^2}{2\pi}\left(\arctan\frac{2A}{1-A^2} - \arctan\frac{2A\sin\vartheta}{1-A^2}\right). \quad (3.54)$$

in Abhängigkeit der Parameter $\vartheta \in [0, \pi/2]$. Die Elektrodenform ist in Fig. 8 gezeigt. Die Elektroden verfügen über einen normalisierten Einheitsabstand und eine asymptotische Dicke 1 - A weit weg von der Kante, die sich stirnseitig zu einer vertikalen Kante mit der Höhe

$$b = 1 - A - \frac{2 - 2A^2}{\pi} \arctan A \,. \qquad (3.55)$$

verjüngt.

[0122] Der Parameter 0 < A < 1 stellt auch die inverse E-Feldüberhöhung aufgrund der Anwesenheit der Elektroden dar. Die Dicke der Elektroden kann beliebig klein sein, ohne bemerkbare E-Feldverzerrungen einzuführen.

[0123] Eine negative Krümmung, z. B. an den Mündungen entlang des Strahlpfades, reduzieren die E-Feld Amplitude weiter.

[0124] Dieses positive Ergebnis ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass die Elektroden nur eine lokale Störung eines bereits existierenden E-Feldes herbeiführen.

[0125] Die optimale Form für freistehende Hochspannungselektroden sind ROGOWSKI- und BORDA-Profile, mit einem Spitzenwert in der E-Feld Amplitude von dem Zweifachen der unverzerrten Feldstärke.

Antriebsspannungsgenerator

[0126] Der Antriebsspannungsgenerator muss über eine hohe Wechselspannung bei hoher Frequenz bereitstellen. Die übliche Vorgehensweise ist es, eine mittlere AC-Spannung durch einen hoch isolierten Ausgangstransformator zu verstärken.

[0127] Störende interne Resonanzen, die von unvermeidbaren Wicklungskapazitäten und Streuinduktivitäten verursacht werden, machen den Entwurf eines Designs für einen solchen Transformator zu einer Herausforderung.

[0128] Eine Alternative kann eine Ladungspumpe sein, d.h. ein periodisch betriebener Halbleiter-Marx-Generator sein. Eine solche Schaltung liefert eine Ausgangsspannung mit einem Wechsel zwischen Masse und einer hohen Spannung einer einzigen Polarität, und lädt den ersten Kondensator der Kondensatorkette effizient auf.

Durchschlagsfestigkeit im Vakuum

$d^{-0.5}$-Gesetz

[0129] Es gibt eine Fülle von Hinweisen - aber keine endgültige Erklärung -, dass für die Elektrodenabstände über d $\approx 10^{-3}$ m die Durchbruchspannung ungefähr proportional zur Quadratwurzel des Abstandes ist. Das Durchbruch-E-Feld skaliert daher gemäß

$$E_{max} \approx \sigma d^{-0.5} \qquad (A.1)$$

mit konstantem A in Abhängigkeit vom Elektrodenmaterial (siehe unten). Es scheint, dass für die Felder von E ≈ 20 MV/m momentan verfügbare Elektrodenoberflächenmaterialien eine Elektrodenabstandsentfernung von d ≤ 10^{-2} m erfordern.

Oberflächenmaterialien

[0130] Der Überschlag zwischen den Elektroden im Vakuum hängt stark von der Materialoberfläche ab. Die Ergebnisse der CLIC Studie (A. Descoeudres et al. " DC Breakdown experiments for CLIC", Proceedings of EPAC08, Genoa, Italy, p.577, 2008) zeigen die Durchbruch-Koeffizienten

material	σ in $\left[\frac{MV}{\sqrt{m}}\right]$	
steel	3.85	
SS 316LN	3.79	3.16
Ni	3.04	
V		2.84
Ti		2.70
Mo		1.92
Monel	1.90	
Ta		1.34

(fortgesetzt)

material	σ in	$\left[\frac{MV}{m}\right]$
Al		1.30 0.45
Cu	1.17	0.76

Abhängigkeit von der Elektrodenfläche

[0131] Es gibt Anzeichen dafür, dass die Elektrodenfläche einen wesentlichen Einfluss auf die Durchbruch-Feldstärke hat. So gilt:

$$E_{max} \approx 58 \cdot 10^6 \frac{V}{m} \left(\frac{A_{eff}}{1\,cm^2} \right)^{-0.25} \qquad (A.2)$$

für Kupfereletroden-Oberflächen und $2*10^{-2}$ mm Elektrodenabstand. Für planare Elektroden aus rostfreiem Stahl mit 10^{-3} m Abstand gilt:

$$E_{max} \approx 57.38 \cdot 10^6 \frac{V}{m} \left(\frac{A_{eff}}{1\,cm^2} \right)^{-0.12} \qquad (A.3)$$

Form des elektrostatischen Feldes

Dielektrischer Nutzungsgrad

[0132] Es ist allgemein anerkannt, dass homogene E-Felder die größten Spannungen zulassen. Der dielektrische SCHWAIGER Nutzungsgrad-Faktor η ist als das Inverse der lokalen E-Feldüberhöhung aufgrund von Feldinhomogenitäten definiert, d.h. das Verhältnis des E-Feldes einer idealen flachen Elektrodenanordnung und das Spitzen-Oberflächen-E-Feld der Geometrie unter Betrachtung gleicher Referenzspannungen und Abständen.

[0133] Er stellt die Nutzung des Dielektrikums in Bezug auf E-Feld-Amplituden dar. Für kleine Abstände $d < 6*10^{-3}$m scheinen inhomogene E-Felder die Durchbruchspannung zu erhöhen.

Krümmung der Elektrodenoberfläche

[0134] Da die E-Feld Inhomogenitäts-Maxima an den Elektrodeoberflächen auftreten, ist das relevante Maß für die Elektrodenform die mittlere Krümmung H = (k1+k2)/2.

[0135] Es gibt verschiedene Oberflächen, die das Ideal von verschwindenden, lokalen mittleren Krümmungen über große Flächen erfüllen. Zum Beispiel sind Katenoide Rotationsflächen mit H = 0 dar.

[0136] Jede rein geometrische Maßnahme wie η oder H kann nur eine Annäherung an das tatsächliche Durchbruch-Verhalten darstellen. Lokale E-Feld-Inhomogenitäten haben einen nichtlokalen Einfluss auf die Durchbruchgrenze und können sogar die allgemeine Gesamtfeldstärke verbessern.

Konstante E-Feld Elektrodenoberflächen

[0137] Fig. 8 zeigt KIRCHHOFF Elektrodenkanten bei A = 0,6 für ein vertikales E-Feld. Die Felderhöhung innerhalb des Elektrodenstapels ist $1/A = 1.\overline{6}$. Die Stirnseiten sind flach.

[0138] Eine Elektrodenoberfläche stellt eine Äquipotenziallinie des elektrischen Feldes analog zu einer freien Oberfläche einer strömenden Flüssigkeit dar. Eine spannungsfreie Elektrode folgt der Strömungsfeldlinie. Mit der komplexen räumlichen Koordinate z = x + iy erfüllt jede analytische Funktion w(z) die POISSON-Gleichung. Die Randbedingung für die freie Strömungsflache ist äquivalent mit einer konstanten Größe der (konjugierten) Ableitung v einer möglichen Funktion w

$$\bar{v} = \frac{dw}{dz}, \qquad (A.4)$$

[0139] Jede mögliche Funktion w($\bar{v}$) über eine Strömungsgeschwindigkeit $\bar{v}$ oder eine Hodographen-Ebene führt zu einer z-Abbildung der Ebene

$$z = \int \frac{dw}{\bar{v}} = \int \frac{1}{\bar{v}} \frac{dw}{d\bar{v}} d\bar{v} , \qquad (A.5)$$

[0140] Ohne Beschränkung der Allgemeinheit kann die Größe der Ableitung auf der Elektrodenoberfläche auf Eins normiert werden, und die Höhe DE kann im Vergleich zu AF als A bezeichnet werden (siehe Abb. 6). In der $\bar{v}$-Ebene bildet die Kurve CD dann auf arc i → 1 auf dem Einheitskreis ab.

[0141] Die Punkte in Fig. 8 A und F entsprechen 1/A, B dem Ursprung, C i, D und E entsprechen 1. Das komplette Strömungsbild wird im ersten Quadranten des Einheitskreises abgebildet. Die Quelle der Strömungslinien ist 1/A, die der Senke 1.

[0142] Zwei Spiegelungen an der imaginären Achse und dem Einheitskreis erweitern dieses Strömungsmuster über die gesamte komplexe $\bar{v}$-Ebene. Die Potenzialfunktion ω wird somit durch vier Quellen auf $\bar{v}$-Positionen + A, -A, 1/A, -1/A und zwei Senken der Stärke 2 auf ± 1 definiert.

$$w = \log(\bar{v} - A) + \log(\bar{v} + A) + \log\left(\bar{v} - \frac{1}{A}\right) + \log\left(\bar{v} + \frac{1}{A}\right) - 2\log(\bar{v} - 1) - 2\log(\bar{v} + 1) . \qquad (A.6)$$

[0143] Dessen Ableitung ist

$$\frac{dw}{d\bar{v}} = \frac{1}{\bar{v} - A} + \frac{1}{\bar{v} + A} + \frac{1}{\bar{v} - \frac{1}{A}} + \frac{1}{\bar{v} + \frac{1}{A}} - \frac{2}{\bar{v} - 1} - \frac{2}{\bar{v} + 1} \qquad (A.7)$$

und so

$$z - z_0 = \int \frac{1}{\bar{v}} \left(\frac{1}{\bar{v} - A} + \frac{1}{\bar{v} + A} + \frac{1}{\bar{v} - \frac{1}{A}} + \frac{1}{\bar{v} + \frac{1}{A}} - \frac{2}{\bar{v} - 1} - \frac{2}{\bar{v} + 1} \right) d\bar{v} \qquad (A.8)$$

[0144] An der freien Grenze CD ist Strömungsgeschwindigkeit $\bar{v}$=e$^{1\varphi}$, damit ist d$\bar{v}$= i $\bar{v}$|dφ und

$$z - z_0 = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{-\vartheta} \frac{i}{e^{i\varphi} - A} + \frac{i}{e^{i\varphi} + A} + \frac{i}{e^{i\varphi} - \frac{1}{A}} + \frac{i}{e^{i\varphi} + \frac{1}{A}} - \frac{2i}{e^{i\varphi} - 1} - \frac{2i}{e^{i\varphi} + 1} d\varphi \qquad (A.9)$$

mit z_0 = i b der Punkt C. Eine analytische Integration liefert Gl. (3.54).

Bezugszeichenliste

[0145]

9 Hochspannungskaskade

11	Eingang
13	Diode
15	Kondensator
17	Kondensator
19	Diode
21	Ausgang
23	erster Satz von Kondensatoren
25	zweiter Satz von Kondensatoren
31	Hochspannungsquelle
33	Zwischenelektrode
35	Hochspannungskaskade
37	zentrale Elektrode
39	äußere Elektrode
39', 39"	Elektroden-Schalenhälfte
41	erster Kondensatorkette
43	zweite Kondensatorkette
45	Wechselspannungsquelle
47	äquatorialer Schnitt
49	Diode
51	Beschleunigungskanal durch die zweite Kondensatorkette
52	Teilchenquelle
61	freier Elektronenlaser
61'	Quelle für kohärente Röntgenstrahlung
53	Beschleunigungskanal durch die erste Kondensatorkette
55	Magnetvorrichtung
57	Synchrotronstrahlung
57'	Photonen aus inverser Compton-Streuung
58	Laserstrahl
59	Laservorrichtung
63	Elektronenröhren
65	Kathode
67	Anode
81	Hochspannungsquelle

Patentansprüche

1. Beschleuniger (61, 61') zur Beschleunigung von geladenen Teilchen, aufweisend:

einen Kondensatorstapel

- mit einer ersten Elektrode (37), welche auf ein erstes Potential bringbar ist,
- mit einer zweiten Elektrode (39), die zur ersten Elektrode (37) konzentrisch angeordnet ist und auf ein zweites, vom ersten Potential unterschiedliches Potential bringbar ist,
- mit zumindest einer Zwischenelektrode (33), die konzentrisch zwischen der ersten Elektrode (37) und der zweiten Elektrode (39) angeordnet ist, und die auf ein Zwischenpotential bringbar ist, das sich zwischen dem ersten Potential und dem zweiten Potential befindet,

eine Schaltvorrichtung (35), mit der die Elektroden (33, 37, 39) des Kondensatorstapels verbunden sind und welche derart ausgebildet ist, dass bei Betrieb der Schaltvorrichtung (35) die konzentrisch zueinander angeordneten Elektroden (33, 37, 39) des Kondensatorstapels auf anwachsende Potentialstufen bringbar sind,
einen ersten Beschleunigungskanal (51), der gebildet wird durch erste Öffnungen in den Elektroden (33, 37, 39) des Kondensatorstapels, sodass entlang des ersten Beschleunigungskanals (51) geladene Teilchen durch die Elektroden (33, 37, 39) beschleunigbar sind,
einen zweiten Beschleunigungskanal (53), der gebildet wird durch zweite Öffnungen in den Elektroden (33, 37, 39) des Kondensatorstapels, sodass entlang des zweiten Beschleunigungskanals (35) geladene Teilchen durch die Elektroden (33, 37, 39) beschleunigbar sind,
eine im Zentrum des Kondensatorstapels angeordnete Vorrichtung (55, 59), mit der eine Beeinflussung des

beschleunigten Teilchenstrahls im Inneren des Kondensatorstapels durchführbar ist, wodurch von dem Teilchenstrahl ausgesendete Photonen (57, 57') erzeugt werden, wobei durch die Vorrichtung (55, 59) eine Interaktion mit dem beschleunigten Teilchenstrahl entsteht, welche die Energie, die Geschwindigkeit und/oder die Verlaufsrichtung ändert,
dadurch gekennzeichnet, dass
ein Abstand der Elektroden (39, 37, 33) zum Zentrum hin abnimmt.

2. Beschleuniger (61, 61') nach Anspruch 1, wobei die Vorrichtung (59) ausgebildet ist, einen Laserstrahl (58) bereitzustellen, der derart in Wechselwirkung mit dem beschleunigten Teilchenstrahl tritt, dass die ausgesendeten Photonen (57') aus einer inversen Compton-Streuung des Laserstrahls (58) an den geladenen Teilchen des beschleunigten Teilchenstrahls hervorgehen.

3. Beschleuniger (61, 61') nach Anspruch 2, wobei der Laserstrahl (58) und die Beschleunigung der Teilchen derart aufeinander abgestimmt sind, dass die ausgesendeten Photonen im Röntgenstrahlbereich liegen.

4. Beschleuniger (61, 61') nach Anspruch 1, wobei die Vorrichtung (55) ausgebildet ist, ein Magnet-Querfeld zum Teilchenstrahl zu erzeugen, um eine Ablenkung des beschleunigten Teilchenstrahls zu bewirken, sodass die Photonen als Synchrotronstrahlung (57) von dem Teilchenstrahl ausgesendet werden.

5. Beschleuniger (61, 61') nach Anspruch 4, wobei das Magnet-Querfeld derart ausgebildet ist, um über eine Strecke im Inneren des Kondensatorstapels eine periodische Ablenkung des beschleunigten Teilchenstrahls zu bewirken.

6. Beschleuniger (61, 61') nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei
der Kondensatorstapel mehrere konzentrisch zueinander angeordnete Zwischenelektroden (33) umfasst, welche durch die Schaltvorrichtung (35) verbunden sind, derart, dass bei Betrieb der Schaltvorrichtung (35) die Zwischenelektroden (33) auf eine Abfolge von anwachsenden Potentialstufen bringbar sind.

7. Beschleuniger (61, 61') nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei die Elektroden (33, 37, 39) des Kondensatorstapels zueinander durch Vakuumisolation isoliert sind.

8. Beschleuniger (61, 61') nach einem der vorstehenden Ansprüche,
wobei die Schaltvorrichtung eine Hochspannungskaskade (35) umfasst, insbesondere eine Greinacher-Kaskade oder eine Cockcroft-Walton-Kaskade.

9. Beschleuniger (61, 61') nach einem der vorstehenden Ansprüche,
wobei der Kondensatorstapel durch einen Spalt (47), der durch die Elektroden (33, 37, 39) verläuft, in zwei voneinander getrennte Kondensatorketten (41, 43) aufgeteilt ist.

10. Beschleuniger (61, 61') nach Anspruch 9,
wobei die Schaltvorrichtung eine Hochspannungskaskade (35), insbesondere eine Greinacher-Kaskade oder eine Cockcroft-Walton-Kaskade, umfasst, welche die zwei voneinander getrennten Kondensatorketten (41, 43) miteinander verbindet und welche insbesondere in dem Spalt (47) angeordnet ist.

Claims

1. Accelerator (61, 61') for accelerating charged particles, comprising:

a capacitor stack

- with a first electrode (37), which can be brought to a first potential,
- with a second electrode (39), which is concentrically arranged with respect to the first electrode (37) and can be brought to a second potential that differs from the first potential,
- with at least one intermediate electrode (33), which is concentrically arranged between the first electrode (37) and the second electrode (39) and which can be brought to an intermediate potential situated between the first potential and the second potential,

a switching device (35), to which the electrodes (33, 37, 39) of the capacitor stack are connected and which is

embodied such that, during operation of the switching device (35), the electrodes (33, 37, 39) of the capacitor stack concentrically arranged with respect to one another can be brought to increasing potential levels,
a first acceleration channel (51), which is formed by first openings in the electrodes (33, 37, 39) of the capacitor stack such that charged particles can be accelerated by the electrodes (33, 37, 39) along the first acceleration channel (51),
a second acceleration channel (53), which is formed by second openings in the electrodes (33, 37, 39) of the capacitor stack such that charged particles can be accelerated by the electrodes (33, 37, 39) along the second acceleration channel (35),
a device (55, 59) arranged in the center of the capacitor stack, by means of which it is possible to influence the accelerated particle beam in the interior of the capacitor stack, as a result of which photons (57, 57') that are emitted by the particle beam are created, wherein, as a result of the device (55, 59), an interaction with the accelerated particle beam is created, which interaction changes the energy, the speed and/or the direction of propagation, **characterized in that** a spacing of the electrodes (39, 37, 33) decreases toward the center.

2. Accelerator (61, 61') according to Claim 1, wherein
the device (59) is embodied to provide a laser beam (58), which interacts with the accelerated particle beam such that the emitted photons (57') emerge from inverse Compton scattering of the laser beam (58) at the charged particles of the accelerated particle beam.

3. Accelerator (61, 61') according to Claim 2, wherein the laser beam (58) and the acceleration of the particles are tuned to one another such that the emitted photons lie in the X-ray spectrum.

4. Accelerator (61, 61') according to Claim 1, wherein
the device (55) is embodied to generate a transverse magnetic field to the particle beam in order to bring about a deflection of the accelerated particle beam such that the photons are emitted from the particle beam as synchrotron radiation (57).

5. Accelerator (61, 61') according to Claim 4, wherein
the transverse magnetic field is designed to bring about a periodic deflection of the accelerated particle beam over a path in the interior of the capacitor stack.

6. Accelerator (61, 61') according to one of the preceding claims, wherein
the capacitor stack comprises a plurality of intermediate electrodes (33) concentrically arranged with respect to one another, which are connected by the switching device (35) such that, when the switching device (35) is in operation, the intermediate electrodes (33) can be brought to a sequence of increasing potential levels.

7. Accelerator (61, 61') according to one of the preceding claims, wherein the electrodes (33, 37, 39) of the capacitor stack are insulated from one another by the vacuum.

8. Accelerator (61, 61') according to one of the preceding claims,
wherein the switching device comprises a high-voltage cascade (35), more particularly a Greinacher cascade or a Cockcroft-Walton cascade.

9. Accelerator (61, 61') according to one of the preceding claims,
wherein the capacitor stack is subdivided into two separate capacitor chains (41, 43) by a gap (47) which runs through the electrodes (33, 37, 39).

10. Accelerator (61, 61') according to Claim 9,
wherein the switching device comprises a high-voltage cascade (35), more particularly a Greinacher cascade or a Cockcroft-Walton cascade, which interconnects the two mutually separated capacitor chains (41, 43) and which, in particular, is arranged in the gap (47).

Revendications

1. Accélérateur (61, 61') pour l'accélération de particules chargées, comprenant :

un empilement de condensateurs

- avec une première électrode (37), laquelle est apte à être amenée à un premier potentiel,
- avec une deuxième électrode (39) qui est disposée de manière concentrique par rapport à la première électrode (37) et est apte à être amenée à un deuxième potentiel différent du premier potentiel,
- avec au moins une électrode intermédiaire (33) qui est disposée de manière concentrique entre la première électrode (37) et la deuxième électrode (39), et qui est apte à être amenée à un potentiel intermédiaire qui se situe entre le premier potentiel et le deuxième potentiel,

un dispositif de commutation (35) avec lequel les électrodes (33, 37, 39) de l'empilement de condensateurs sont reliées, et lequel est conçu de telle sorte que, lors du fonctionnement du dispositif de commutation (35), les électrodes disposées de manière concentrique les unes par rapport aux autres (33, 37, 39) de l'empilement de condensateurs soient aptes à être amenées à des niveaux de potentiel croissants,
un premier canal d'accélération (51) qui est formé de premières ouvertures dans les électrodes (33, 37, 39) de l'empilement de condensateurs de sorte que, le long du premier canal d'accélération (51), des particules chargées soient aptes à être accélérées à travers les électrodes (33, 37, 39),
un deuxième canal d'accélération (53) qui est formé de deuxièmes ouvertures dans les électrodes (33, 37, 39) de l'empilement de condensateurs de sorte que, le long du deuxième canal d'accélération (35), des particules chargées soient aptes à être accélérées à travers les électrodes (33, 37, 39),
un dispositif (55, 59) disposé au centre de l'empilement de condensateurs, avec lequel il peut être mis en oeuvre une influence du faisceau de particules accéléré à l'intérieur de l'empilement de condensateurs, ce qui permet à des photons (57, 57') émis par le faisceau de particules d'être produits, dans lequel une interaction avec le faisceau de particules accéléré apparaît à travers le dispositif (55, 59), laquelle modifie l'énergie, la vitesse et/ou la direction de trajet,
caractérisé en ce
qu'une distance des électrodes (39, 37, 33) diminue en allant vers le centre.

2. Accélérateur (61, 61') selon la revendication 1, dans lequel le dispositif (59) est conçu pour fournir un faisceau laser (58) qui entre en interaction avec le faisceau de particules accéléré de telle sorte que les photons émis (57') résultent d'une diffusion Compton inverse du faisceau laser (58) sur les particules chargées du faisceau de particules accéléré.

3. Accélérateur (61, 61') selon la revendication 2, dans lequel le faisceau laser (58) et l'accélération des particules sont harmonisés de telle sorte que les photons émis se situent dans le domaine des rayons X.

4. Accélérateur (61, 61') selon la revendication 1, dans lequel le dispositif (55) est conçu pour produire un champ magnétique transversal au faisceau de particules, afin de provoquer une déviation du faisceau de particules accéléré de sorte que les photons soient émis sous forme de rayonnement synchrotron (57) par le faisceau de particules.

5. Accélérateur (61, 61') selon la revendication 4, dans lequel le champ magnétique transversal est conçu de sorte à provoquer une déviation périodique du faisceau de particules accéléré sur une ligne à l'intérieur de l'empilement de condensateurs.

6. Accélérateur (61, 61') selon l'une des revendications précédentes, dans lequel
l'empilement de condensateurs comporte plusieurs électrodes intermédiaires (33) disposées de manière concentrique les unes par rapport aux autres, lesquelles sont reliées par le dispositif de commutation (35) de telle sorte que, lors du fonctionnement du dispositif de commutation (35), les électrodes intermédiaires (33) soient aptes à être amenées à une succession de niveaux de potentiel croissants.

7. Accélérateur (61, 61') selon l'une des revendications précédentes, dans lequel les électrodes (33, 37, 39) de l'empilement de condensateurs sont isolées les unes des autres par une isolation par le vide.

8. Accélérateur (61, 61') selon l'une des revendications précédentes,
dans lequel le dispositif de commutation comporte une cascade haute tension (35), en particulier une cascade de Greinacher ou une cascade de Cockcroft-Walton.

9. Accélérateur (61, 61') selon l'une des revendications précédentes,
dans lequel l'empilement de condensateurs est divisé en deux séries de condensateurs séparées l'une de l'autre (41, 43) par un interstice (47) qui s'étend à travers les électrodes (33, 37, 39).

10. Accélérateur (61, 61') selon la revendication 9,

dans lequel le dispositif de commutation comporte une cascade haute tension (35), en particulier une cascade de Greinacher ou une cascade de Cockcroft-Walton, laquelle relie l'une à l'autre les deux séries de condensateurs séparées l'une de l'autre (41, 43) et laquelle est disposée en particulier dans l'interstice (47).

FIG 1

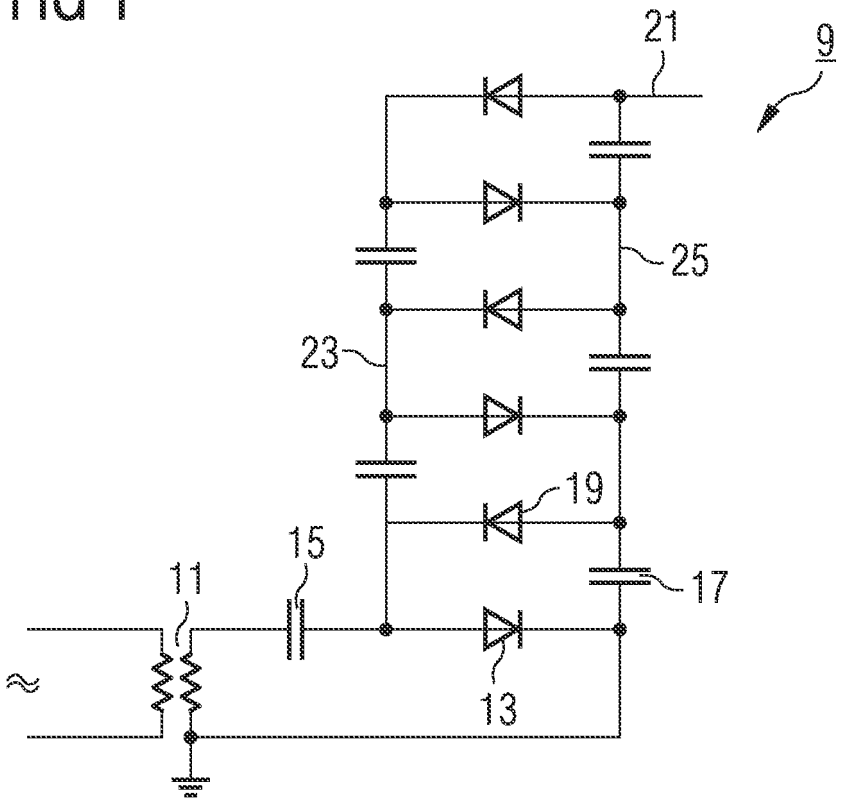


FIG 2

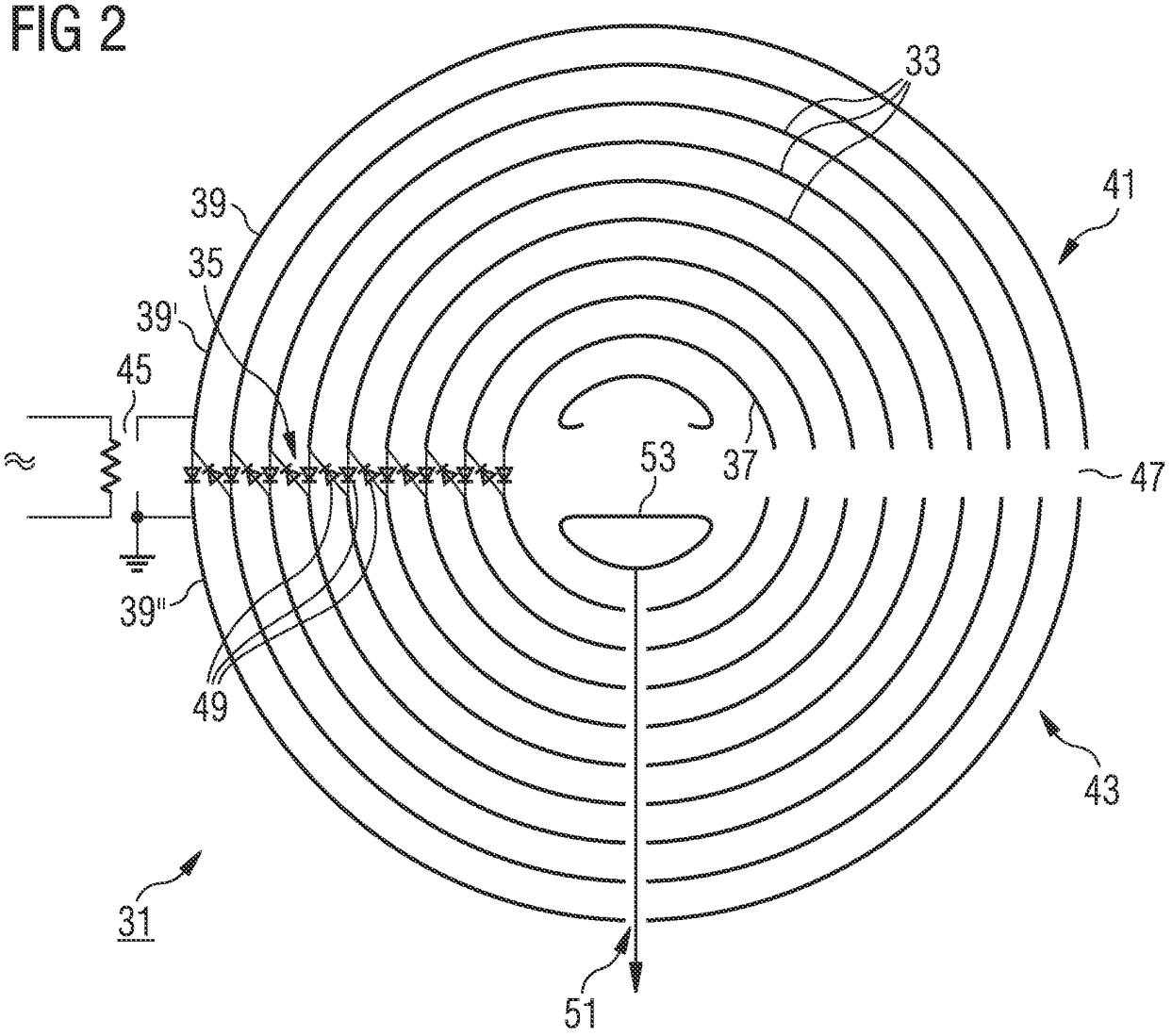


FIG 3

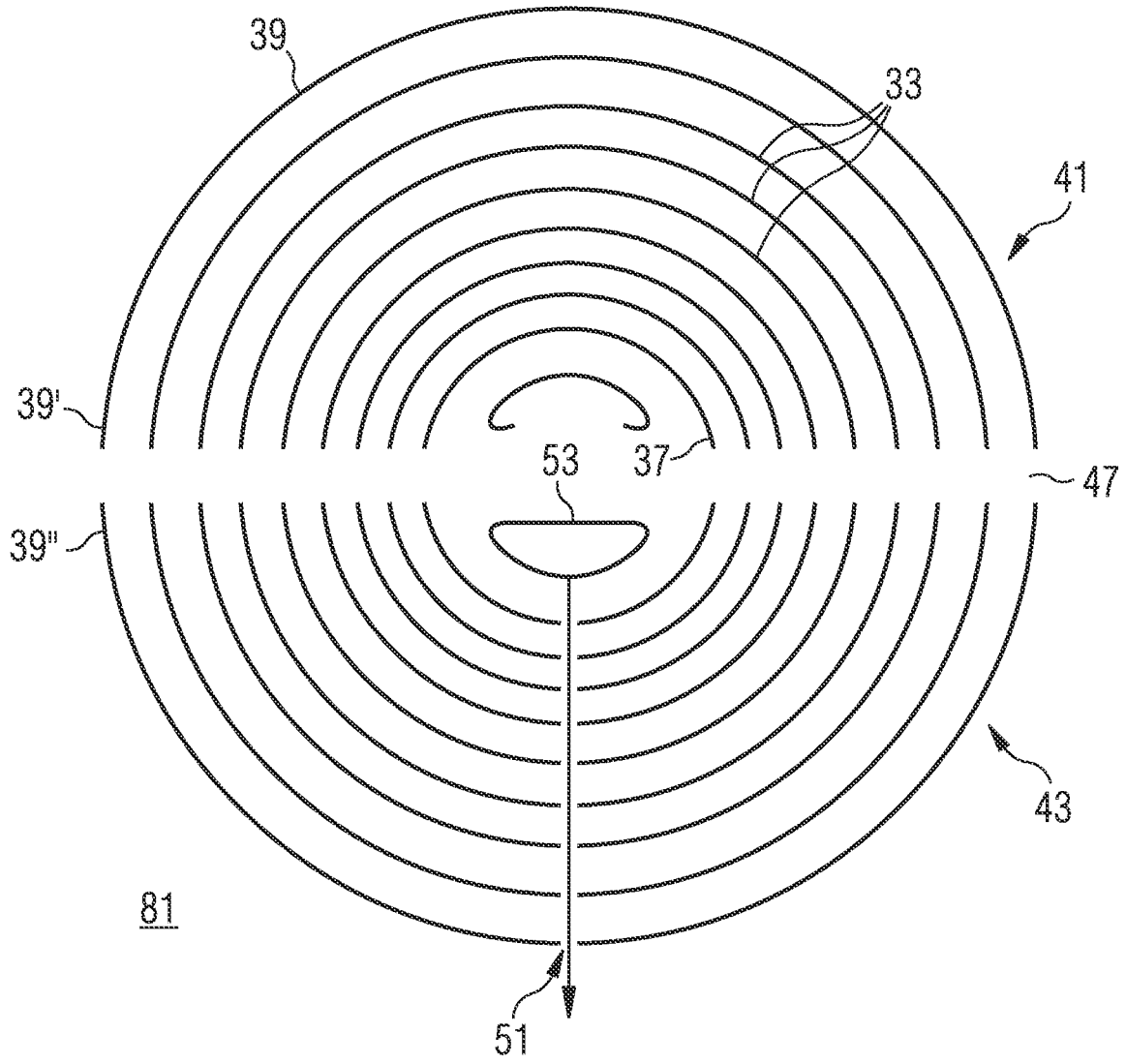


FIG 4

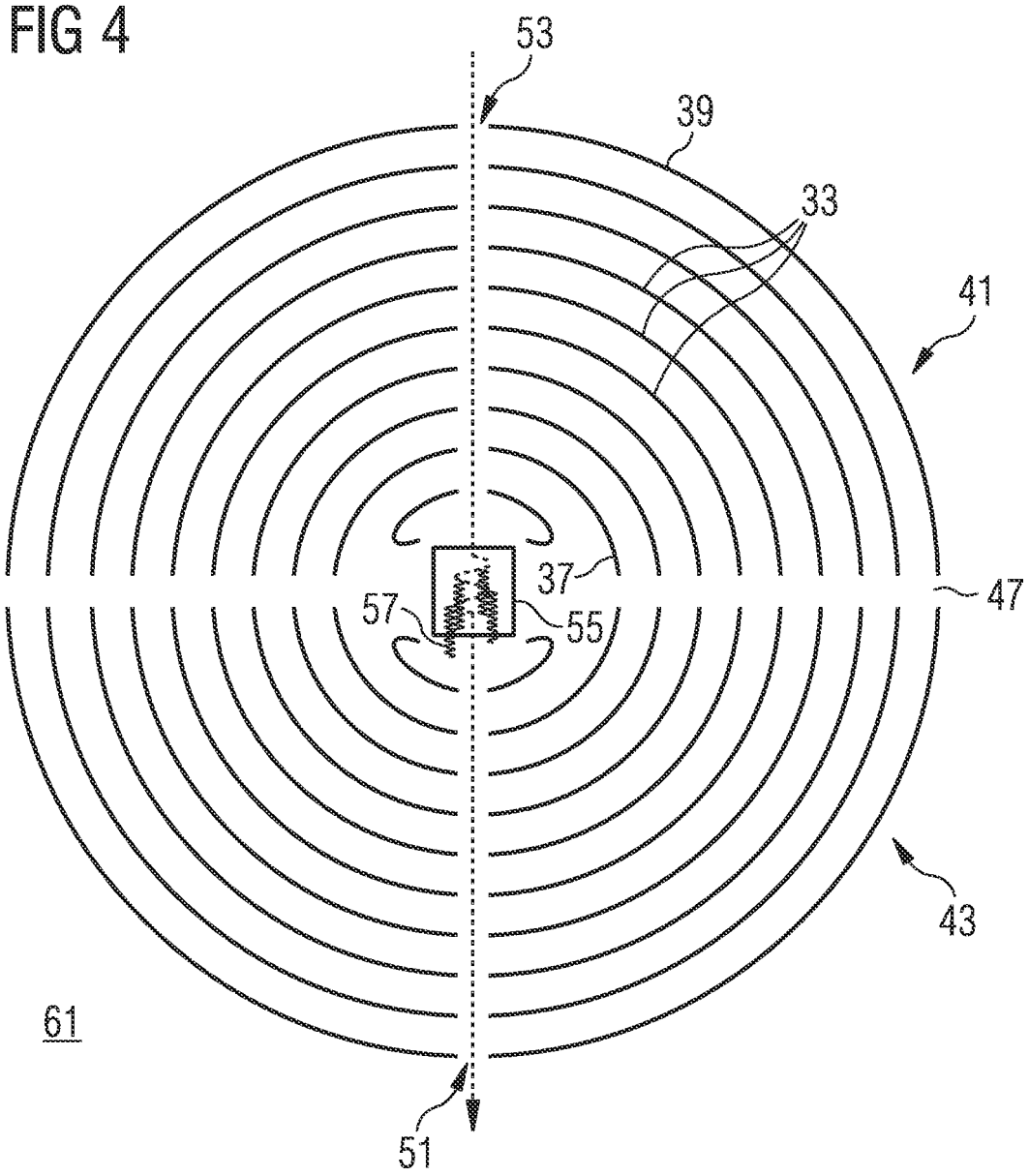


FIG 5

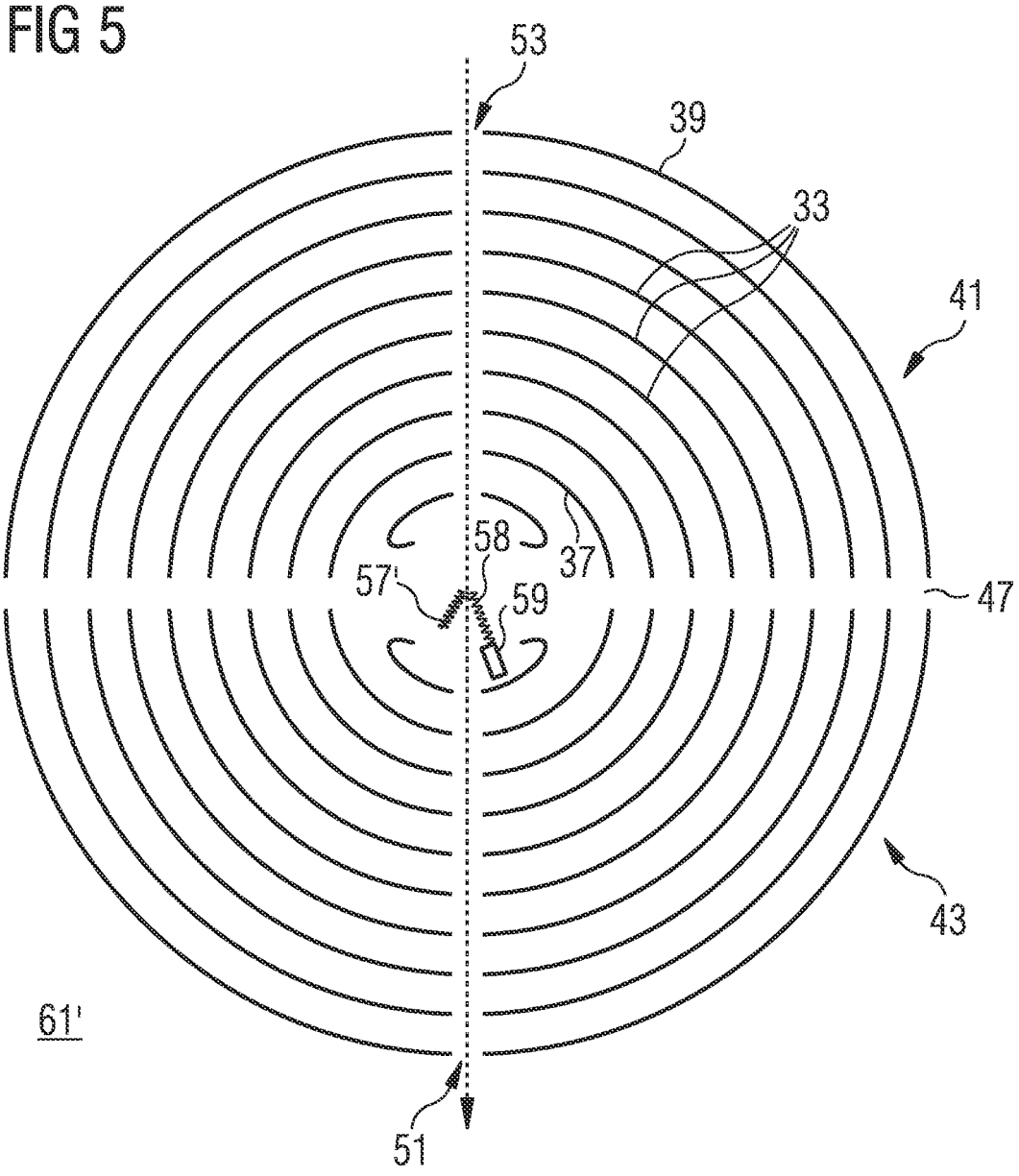


FIG 6

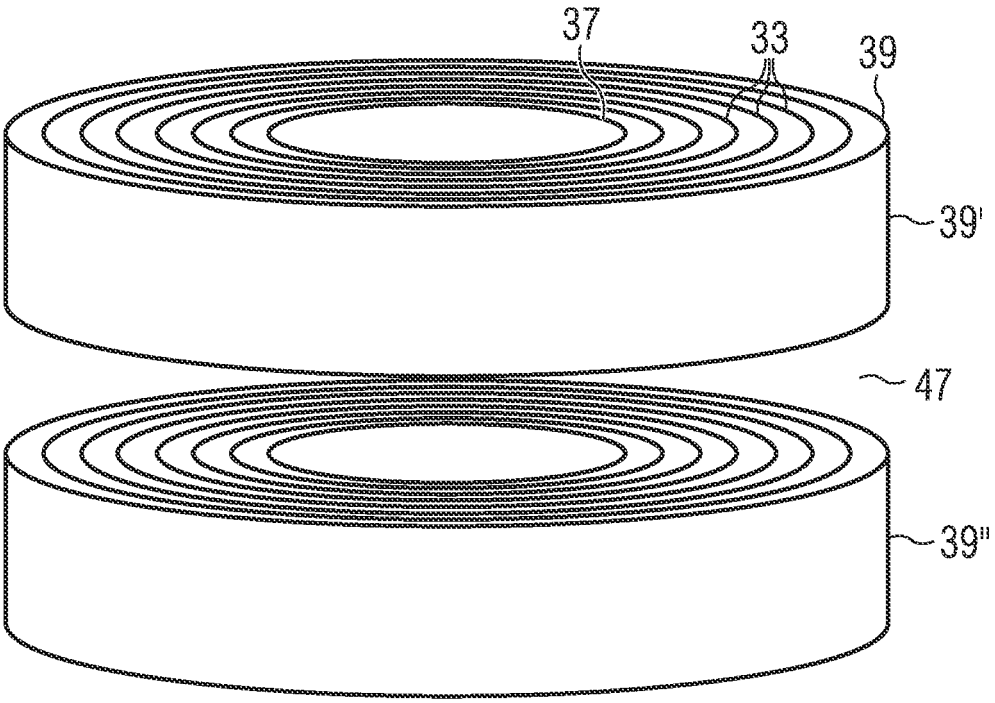


FIG 7

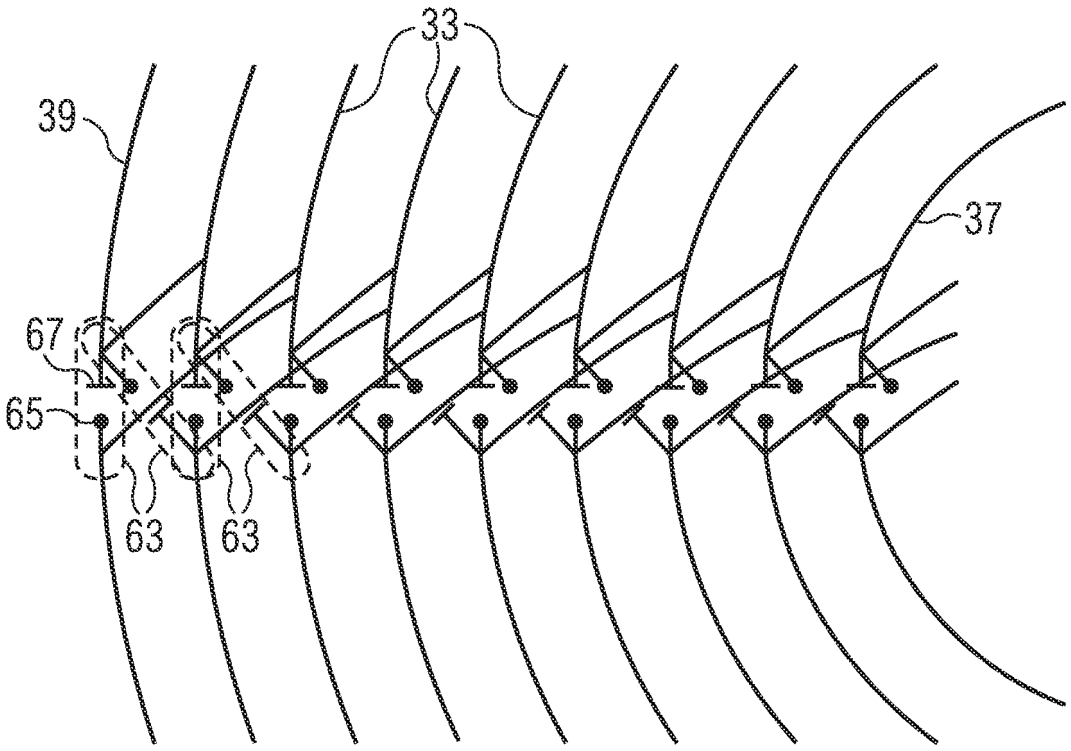


FIG 8

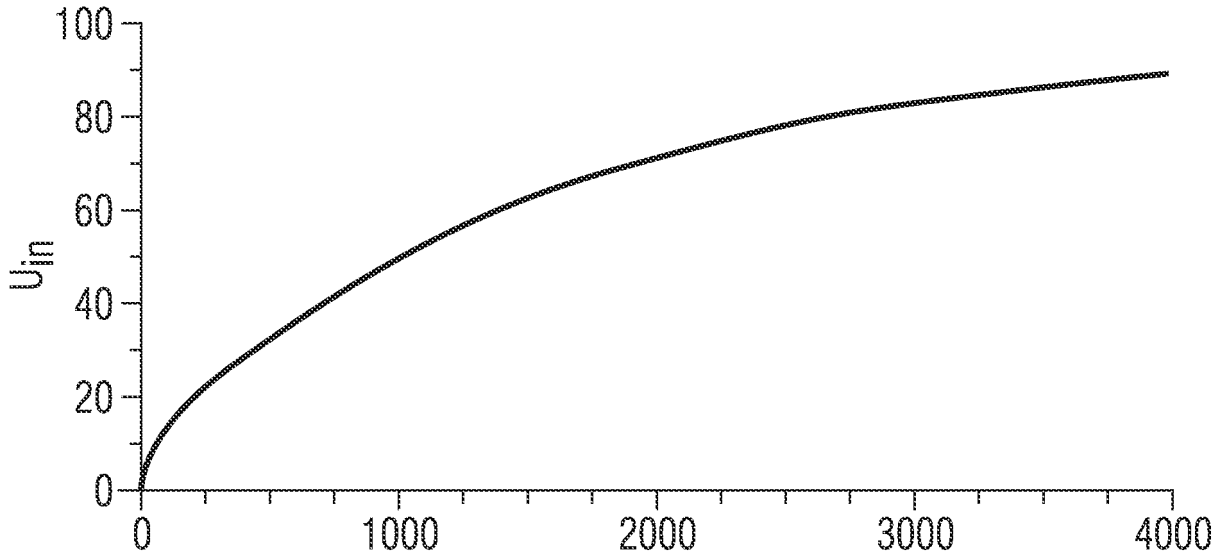
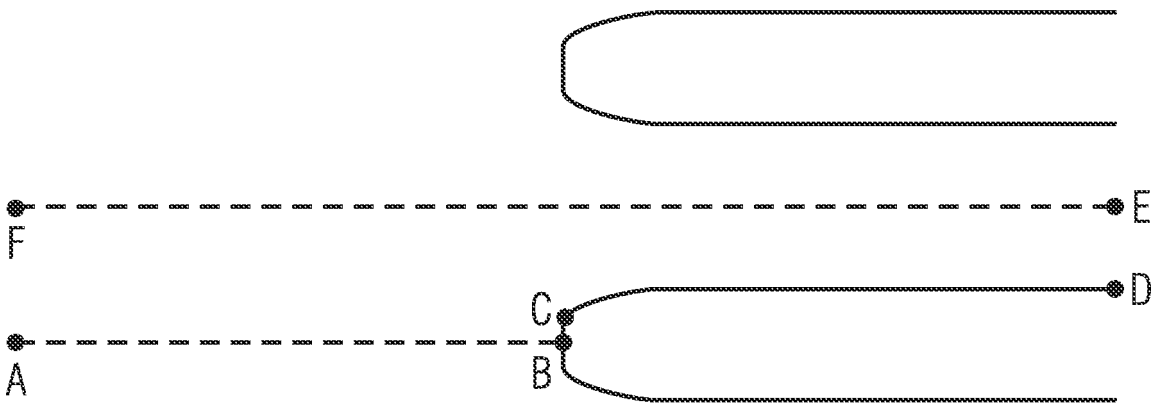


FIG 9



IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **I.BOSCOLO et al.** A 1-MW, 1-mm Continuous-Wave FELtron for Toroidal Plasma Heating. *IEEE Transactions on Plasma Science,* Juni 1992, vol. 20 (3), 256-262 **[0008]**
- **I.BOSCOLO et al.** A Tunable Bragg Cavity for an Efficient Millimeter FEL Driven by Electrostatic Accelerators. *Appl.Phys.,* 1993, vol. B57, 217-225 **[0008]**
- **A. DESCOEUDRES et al.** DC Breakdown experiments for CLIC. *Proceedings of EPAC08,* 2008, 577 **[0130]**