

(19)



(11)

**EP 2 095 696 B1**

(12)

**EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT**

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:  
**19.11.2014 Patentblatt 2014/47**

(51) Int Cl.:  
**H05H 11/00 (2006.01)**

(21) Anmeldenummer: **07802170.6**

(86) Internationale Anmeldenummer:  
**PCT/EP2007/007767**

(22) Anmeldetag: **06.09.2007**

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:  
**WO 2008/064728 (05.06.2008 Gazette 2008/23)**

(54) **KREISBESCHLEUNIGER MIT EINSTELLBARER ELEKTRONEN-ENDENERGIE**

CIRCULAR ACCELERATOR WITH ADJUSTABLE ELECTRON FINAL ENERGY

ACCÉLÉRATEUR CIRCULAIRE AVEC ÉNERGIE FINALE D'ÉLECTRONS RÉGLABLE

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
**AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MT NL PL PT RO SE SI SK TR**

- **HESS, Gregor**  
**65205 Wiesbaden (DE)**
- **VIEHBÖCK, Urs**  
**64297 Darmstadt (DE)**

(30) Priorität: **28.11.2006 DE 102006056018**

(74) Vertreter: **Greif, Thomas et al**  
**Thul Patentanwaltsgesellschaft mbH**  
**Rheinmetall Platz 1**  
**40476 Düsseldorf (DE)**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:  
**02.09.2009 Patentblatt 2009/36**

(73) Patentinhaber: **Smiths Heimann GmbH**  
**65205 Wiesbaden (DE)**

(56) Entgegenhaltungen:  
**EP-A- 0 412 190 EP-A- 0 481 864**  
**US-A- 5 319 314**

(72) Erfinder:

- **BERMUTH, Jörg**  
**55122 Mainz (DE)**
- **GEUS, Georg**  
**65201 Wiesbaden (DE)**

- **ROSE M F: "High energy density capacitors for space power conditioning" IEEE AEROSPACE AND ELECTRONICS SYSTEMS MAGAZINE USA, Bd. 4, Nr. 11, November 1989 (1989-11), Seiten 17-22, XP002460113 ISSN: 0885-8985**

**EP 2 095 696 B1**

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).

## Beschreibung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft ein Betatron zur Erzeugung von Pulsen beschleunigter Elektronen, insbesondere in einer Röntgenprüfanlage.

**[0002]** Bei der Überprüfung von großvolumigen Gegenständen wie Containern und Fahrzeugen auf unzulässige Inhalte wie Waffen, Sprengstoff oder Schmuggelware werden bekannterweise Röntgenprüfanlagen eingesetzt. Dabei wird Röntgenstrahlung erzeugt und auf den Gegenstand gerichtet. Die von dem Gegenstand abgeschwächte Röntgenstrahlung wird mittels eines Detektors gemessen und von einer Auswerteeinheit analysiert. Somit kann auf die Beschaffenheit des Gegenstandes geschlossen werden. Eine solche Röntgenprüfanlage ist beispielsweise aus der Europäischen Patentschrift EP 0 412 190 B1 bekannt. Zur besseren Unterscheidung verschiedener Stoffe ist es vorteilhaft, den Gegenstand sukzessive mit Röntgenstrahlung-verschiedener Energie zu untersuchen.

**[0003]** Zur Erzeugung von Röntgenstrahlung mit der für die Überprüfung notwendigen Energie von mehr als 1 MeV werden Betatrons eingesetzt. Dabei handelt es sich um Kreisbeschleuniger, in denen Elektronen in eine evakuierte Betatronröhre injiziert und durch ein von einer Hauptfeldspule erzeugtes, ansteigendes Magnetfeld auf einer Kreisbahn beschleunigt werden. Die beschleunigten Elektronen werden auf ein Target gelenkt, wo sie beim Auftreffen eine Bremsstrahlung erzeugen, deren Spektrum unter anderem von der Energie der Elektronen abhängig ist. Die Beschleunigung der Elektronen erfolgt zyklisch wiederholt, sodass sich eine gepulste Röntgenstrahlung ergibt.

**[0004]** Die Elektronen werden beispielsweise mittels einer Elektronenkanone in die Betatronröhre injiziert und der Strom durch die Hauptfeldspule und damit die Stärke des Magnetfeldes erhöht. Durch das sich verändernde Magnetfeld wird ein elektrisches Feld erzeugt, das die Elektronen auf ihrer Kreisbahn mit dem Radius  $r_s$  beschleunigt. Gleichzeitig erhöht sich mit der Magnetfeldstärke die Lorentzkraft auf die Elektronen. Dadurch werden die Elektronen auf einem im Wesentlichen konstanten Bahnradius gehalten. Ein Elektron bewegt sich auf einer Kreisbahn, wenn sich die zum Mittelpunkt der Kreisbahn gerichtete Lorentzkraft und die entgegengesetzte Zentripetalkraft aufheben. Daraus folgt die Wideröesche Bedingung

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} \langle B(r_s) \rangle = \frac{d}{dt} B(r_s)$$

$$\text{mit } \langle B(r_s) \rangle = \frac{1}{\pi \cdot r_s^2} \iint_A B(r) dA$$

**[0005]**  $\langle B(r_s) \rangle$  ist demnach der gemittelte magnetische Fluss durch die vom Radius  $r_s$  begrenzte Kreisfläche,  $B(r_s)$  der magnetische Fluss an diesem Sollbahnradius  $r_s$ .

**[0006]** Das US-Patent 5,319,314 beschreibt ein Betatron zur Erzeugung von Pulsen beschleunigter Elektronen, das eine Hauptfeldspule, eine Expansions-Spule zum Ausschleusen der beschleunigten Elektronen auf ein Target, sowie eine Ansteuerelektronik der Expansions-Spule zur Beaufschlagung der Expansions-Spulen mit einem Expansions-Puls aufweist. Um eine optimale Energiekonversion zu erreichen, wird der Zeitpunkt des Expansions-Pulses angepasst. Dazu wird der Zeitpunkt des Trigger-Signals so variiert, dass die Expansion während des Maximums des Hauptfelds stattfindet.

**[0007]** Zur Verbesserung des Detektionsergebnisses ist es wünschenswert, das zu untersuchende Objekt mit Röntgenstrahlung unterschiedlicher Energie zu durchdringen. Es ist daher die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Betatron zur Erzeugung von Pulsen beschleunigter Elektronen bereitzustellen, bei dem die Endenergie der beschleunigten Elektronen einstellbar ist.

**[0008]** Gelöst wird diese Aufgabe erfindungsgemäß durch die Merkmale des Patentanspruchs 1. Vorteilhafte Ausgestaltungsformen sind den abhängigen Patentansprüchen 2 bis 9 zu entnehmen. Patentanspruch 10 betrifft eine Röntgenprüfanlage unter Verwendung eines erfindungsgemäßen Betatrons.

**[0009]** Ein erfindungsgemäßes Betatron gemäß Patentanspruch 1 besteht zumindest aus mindestens einer Hauptfeldspule, einer Expansion-Spule zum Ausschleusen der beschleunigten Elektronen auf ein Target sowie einer Ansteuerelektronik der Expansion-Spule zur Beaufschlagung der Expansion-Spule mit einem Expansions-Puls. Dabei ist die Ansteuerelektronik der Expansion-Spule derart ausgestaltet, dass der Zeitpunkt des Expansions-Pulses zur Einstellung der Endenergie der Elektronen relativ zum Hauptfeld variabel ist. Das bedeutet, dass der Einschaltzeitpunkt des Expansions-Pulses in Relation zum Strompuls durch die Hauptfeldspule(n) zeitlich verschiebbar ist. Durch diese Variabilität des Expansions-Pulses lässt sich exakt festlegen, zu welchem Zeitpunkt die Elektronen auf das Target gelenkt werden. Dadurch wird gleichzeitig festgelegt, welche Energie das Hauptfeld den Elektronen zwischen der Injektion in die Betatronröhre und dem Ausschleusen zugeführt hat. Dies ist gleichbedeutend mit einer Einstellung der Maximalenergie der Röntgenstrahlung, die die Elektronen beim Auftreffen auf das Target erzeugen.

**[0010]** In einer Ausgestaltungsform der Erfindung ist der Zeitpunkt des Expansions-Pulses relativ zum Hauptfeld von Puls zu Puls variabel. Das bedeutet, dass in jedem Beschleunigungszyklus die Endenergie der Elektronen unabhängig von den vorhergehenden Beschleunigungszyklen einstellbar ist. Dadurch ergibt sich der Vorteil, dass in einem Röntgenprüfgerät mit einem erfindungsgemäßen Betatron zwei Messungen eines Objekts

mit unterschiedlichen Strahlungsenergien innerhalb kurzer Zeit durchgeführt werden können.

**[0011]** Die freie Wählbarkeit des Zeitpunkts des Expansion-Pulses wird bevorzugt dadurch erreicht, dass die Ansteuerelektronik der Expansion-Spule einen abschaltbaren Halbleiterschalter, insbesondere einen IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) oder einen MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor), aufweist. Derartige Schalter vermögen auch große Ströme in Abhängigkeit von einem Steuerimpuls schnell und zu beliebigen Zeitpunkten ein- und/oder auszuschalten.

**[0012]** In vorteilhafter Weise ist die Expansion-Spule über den Halbleiterschalter mit einer unabhängigen Energiequelle wie einer Strom- oder Spannungsquelle zu einem Stromkreis verbunden. Eine Spannungsquelle kann auch beispielsweise ein Kondensator oder eine Kondensatorbank sein. Ist der Halbleiterschalter geschlossen, so bewirkt die Energiequelle einen Stromfluss durch die Expansion-Spule. Während dieses Stromflusses, dem Expansion-Puls, werden die Elektronen von ihrer Sollbahn auf das Target abgelenkt. Der Begriff unabhängig bedeutet, dass die Energiequelle von anderen Energiequellen, beispielsweise der für die Hauptfeldspulen, möglichst entkoppelt ist. Daraus folgt eine stabilere Energieversorgung der Expansion-Spule und somit ein präziser regelbarer Expansion-Puls.

**[0013]** Bevorzugt weist ein erfindungsgemäßes Betatron eine Ansteuerschaltung der Hauptfeldspule auf, die derart ausgestaltet ist, dass der Strom durch die Hauptfeldspule zu beliebigen Zeitpunkten ein- und ausschaltbar ist. Dies ermöglicht, dass der Strom durch die Hauptfeldspule beispielsweise spätestens dann abgeschaltet wird, wenn alle Elektronen auf das Target aufgetroffen sind. Dadurch wird vermieden, dass die Hauptfeldspule auch dann noch Energie aufnimmt, wenn sich bereits keine Elektronen mehr in der Betatronröhre befinden, mithin wird also die Verlustleistung des Betatrons minimiert. Darüber hinaus wird dadurch die Möglichkeit eröffnet, die Repetitionsfrequenz der Elektronen- und damit der Röntgenpulse zu variieren.

**[0014]** Eine Ansteuerschaltung einer Hauptfeldspule in einem Betatron weist beispielsweise einen Energiespeicher, zwei Leistungsschalter und zwei Dioden auf. Dabei sind

- ein erster Anschluss des ersten Leistungsschalters mit einem ersten Anschluss des Energiespeichers,
- ein zweiter Anschluss des ersten Leistungsschalters mit einem ersten Anschluss der ersten Diode,
- ein zweiter Anschluss der ersten Diode mit einem zweiten Anschluss des Energiespeichers
- ein erster Anschluss der zweiten Diode mit dem ersten Anschluss des Energiespeichers,
- ein zweiter Anschluss der zweiten Diode mit einem ersten Anschluss des zweiten Leistungsschalters,
- ein zweiter Anschluss des zweiten Leistungsschalters mit dem zweiten Anschluss des Energiespei-

chers,

- ein erster Anschluss der Hauptfeldspule mit dem zweiten Anschluss des ersten Leistungsschalters,
- ein zweiter Anschluss der Hauptfeldspule mit dem zweiten Anschluss der zweiten Diode und
- die Steueranschlüsse der Leistungsschalter mit einer Steuerelektronik verbunden.

**[0015]** Die Ansteuerschaltung entspricht dabei einer Halbbrücke aus einem ersten Zweig mit einem ersten Leistungsschalter und einer ersten Diode sowie einem dazu parallelen zweiten Zweig mit einer zweiten Diode und einem zweiten Leistungsschalter. Die Hauptfeldspule bildet die Brücke zwischen den beiden Zweigen. Die Enden der beiden Zweige sind mit den Anschlüssen eines Energiespeichers verbunden.

**[0016]** Bevorzugt, sind die Anschlüsse des Energiespeichers mit einer Spannungsquelle verbunden. Die Spannungsquelle lädt den Energiespeicher nach und versorgt die Ansteuerschaltung mit der für die Beschleunigung der Elektronen benötigten Leistung. Bei der erfindungsgemäßen Ansteuerschaltung kann die Spannungsquelle dauerhaft mit dem Energiespeicher verbunden sein, da der Energiespeicher mit gleichbleibender Polarität betrieben wird.

**[0017]** In vorteilhafter Weise handelt es sich bei den Leistungsschaltern um abschaltbare Leistungshalbleiter wie beispielsweise IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) oder MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor). Derartige Schalter können, im Gegensatz beispielsweise zu Thyristoren, ohne aufwändige Beschaltung zu beliebigen Zeitpunkten abgeschaltet werden. Dadurch werden schnelle Schaltzeiten erreicht, die eine exakt steuerbare Stromflusszeit durch die Hauptfeldspule ermöglichen.

**[0018]** Bevorzugt handelt es sich bei dem Energiespeicher um einen bipolaren Kondensator wie einen Folienkondensator. Derartige Kondensatoren weisen eine hohe Strombelastbarkeit und eine hohe Lebensdauer auf.

**[0019]** Ein erfindungsgemäßes Betatron wird vorteilhaft in einer Röntgenprüfanlage zur Sicherheitsüberprüfung von Objekten eingesetzt. Es werden Elektronen in das Betatron injiziert und beschleunigt, bevor sie auf ein beispielsweise aus Tantal bestehendes Target gelenkt werden. Dort erzeugen die Elektronen Röntgenstrahlung mit einem bekannten Spektrum. Die Röntgenstrahlung wird auf das Objekt, vorzugsweise einen Container und/oder ein Fahrzeug, gerichtet und dort beispielsweise durch Streuung oder Transmissionsdämpfung modifiziert. Die modifizierte Röntgenstrahlung wird von einem Röntgendetektor gemessen und mittels einer Auswertereinheit analysiert. Aus dem Ergebnis wird auf die Beschaffenheit oder den Inhalt des Objekts geschlossen.

**[0020]** Die vorliegende Erfindung soll anhand eines Ausführungsbeispiels näher erläutert werden. Dabei zeigen

Figur 1 eine schematische Schnittdarstellung eines

Betatrone,

Figur 2 eine Ansteuerschaltung für eine Expansion-Spule und

Figur 3 eine Ansteuerschaltung für zwei Hauptfeldspulen.

**[0021]** Figur 1 zeigt den schematischen Aufbau eines Betatrons 1 im Querschnitt. Es besteht unter anderem aus einem rotationssymmetrischen Innenjoch aus zwei beabstandet angeordneten Teilen 2a, 2b, vier Ronden 3 zwischen den Innenjochteilen 2a, 2b, wobei die Längsachse der Ronden 3 der Rotationssymmetrieachse des Innenjochs entspricht, einem die beiden Innenjochteile 2a, 2b verbindenden Außenjoch 4, einer zwischen den Innenjochteilen 2a, 2b angeordneten, Torus-förmigen Betatronröhre 5, zwei Hauptfeldspulen L1 und L2 sowie einer Expansion-Spule 6. Die Expansion-Spule 6 besteht aus zwei in Helmholtz-Konfiguration gruppierten, in elektrischer Hinsicht seriell geschalteten Teilspulen, die jeweils im Bereich der Stirnseiten der Innenjochteile 2a und 2b angeordnet sind. Die beiden Hauptfeldspulen L1 und L2 sind elektrisch ebenfalls in Serie geschaltet.

**[0022]** Die Mittelachse der Expansion-Spule 6 fällt mit der Rotationssymmetrieachse des Innenjochs zusammen. Aufgrund dieser Anordnung und der Größe der Expansion-Spule 6 durchsetzt das von ihr erzeugte Magnetfeld eine Kreisfläche, deren Radius größer ist als der Radius der Ronden 3 und etwa im Bereich des Sollbahnradius  $r_s$  der Elektronen liegt.

**[0023]** Das von den Hauptfeldspulen L1 und L2 erzeugte Magnetfeld durchsetzt die Innenjochteile 2a und 2b, wobei der magnetische Kreis durch das Außenjoch 4 geschlossen wird. Die Form des Innen- und/oder Außenjochs kann vom Fachmann je nach Anwendungsfall gewählt werden und von der in Figur 1 angegebenen Form abweichen. Auch können nur eine oder mehr als zwei Hauptfeldspulen vorhanden sein. Eine andere Anzahl und/oder Form der Ronden ist ebenfalls möglich. Zwischen den Stirnseiten der Innenjochteile 2a und 2b verläuft das Magnetfeld teilweise durch die Ronden 3 und ansonsten durch einen Luftspalt. In diesem Luftspalt ist die Betatronröhre 5 angeordnet. Dabei handelt es sich um eine evakuierte Röhre, in der die Elektronen beschleunigt werden. Die Stirnseiten der Innenjochteile 2a und 2b weisen eine Form auf, die so gewählt ist, dass das Magnetfeld zwischen ihnen die Elektronen auf eine Kreisbahn fokussiert. Die Ausgestaltung der Stirnflächen ist dem Fachmann bekannt und wird daher nicht näher erläutert. Die Elektronen treffen am Ende des Beschleunigungsvorgangs auf ein Target und erzeugen dadurch eine Röntgenstrahlung, deren Spektrum unter anderem von der Endenergie der Elektronen und dem Material des Targets abhängt.

**[0024]** Zur Beschleunigung werden die Elektronen mit einer Anfangsenergie in die Betatronröhre 5 eingeschossen. Während der Beschleunigungsphase wird das Ma-

gnetfeld im Betatron 1 durch die Hauptfeldspulen L1 und L2 fortlaufend erhöht. Dadurch wird ein elektrisches Feld erzeugt, das eine beschleunigende Kraft auf die Elektronen ausübt. Gleichzeitig werden die Elektronen aufgrund der Lorentzkraft auf eine Sollkreisbahn innerhalb der Betatronröhre 5 gezwungen.

**[0025]** Die Beschleunigung der Elektronen erfolgt zyklisch wiederholt, wodurch sich eine gepulste Röntgenstrahlung ergibt. In jedem Zyklus werden in einem ersten Schritt die Elektronen in die Betatronröhre 5 injiziert. In einem zweiten Schritt werden die Elektronen durch einen steigenden Strom in den Hauptfeldspule L1 und L2 und somit ein ansteigendes Magnetfeld im Luftspalt zwischen den Innenjochteilen 2a und 2b in Umfangsrichtung ihrer Kreisbahn beschleunigt. In einem dritten Schritt wird die Expansion-Spule mit einem Expansion-Puls beaufschlagt, wodurch die Wideröe'-Bedingung verändert wird und die beschleunigten Elektronen zur Erzeugung der Röntgenstrahlung auf das Target ausgeschleust werden. Anschließend erfolgt eine optionale Pause, bevor erneut Elektronen in die Betatronröhre 5 injiziert werden.

**[0026]** Figur 2 zeigt schematisch und stark vereinfacht eine Ansteuerschaltung 7 für die Expansion-Spule 6. Die Expansion-Spule 6 wird über von einer Steuerelektronik 8 ansteuerbare IGBT 9 mit einer Spannungsquelle 10 verbunden. Die Schaltzeitpunkte der IGBT sind beliebig und einzig von den Steuersignalen der Steuerelektronik 8 abhängig, sodass der Zeitpunkt des Expansion-Pulses relativ zum Stromfluss durch die Hauptfeldspulen L1 und L2 frei wählbar ist. Dadurch lässt sich die Beschleunigungsdauer und somit die Endenergie der Elektronen in jedem Puls einstellen.

**[0027]** Figur 3 zeigt eine Ansteuerschaltung 11 für die in Serie geschalteten Hauptfeldspulen L1 und L2. Die Schaltung besteht aus einem Kondensator C, zwei IGBT TR1 und TR2 sowie zwei Dioden D1 und D2. Der erste IGBT TR1 und die erste Diode D1 sind derart in Serie geschaltet, dass ein erster Anschluss 14 des Kondensators C mit dem Kollektor 16 des ersten IGBT TR1, der Emitter 17 des ersten IGBT TR1 mit der Kathode 19 der ersten Diode D1 und die Anode 20 der ersten Diode D1 mit einem zweiten Anschluss 15 des Kondensators C verbunden ist. Der zweite IGBT TR2 und die zweite Diode D2 sind derart in Serie geschaltet, dass die Kathode 21 der zweiten Diode D2 mit dem ersten Anschluss 14 des Kondensators C, die Anode 22 der zweiten Diode D2 mit dem Kollektor 23 des zweiten IGBT TR2 und der Emitter 24 des zweiten IGBT TR2 mit dem zweiten Anschluss 15 des Kondensators C verbunden ist.

**[0028]** Die Basisanschlüsse 18 und 25 der IGBT TR1 und TR2 sind mit der Steuerelektronik 8 verbunden. Ein Anschluss 26 der Hauptfeldspule L1 ist mit dem Emitter 17 des ersten IGBT TR1, ein Anschluss 27 der Hauptfeldspule L2 mit dem Kollektor 23 des zweiten IGBT TR2 verbunden. Über die Klemmen 12 und 13 ist der Kondensator C und damit die Ansteuerschaltung 11 optional an eine Spannungsquelle angeschlossen.

**[0029]** Der Aufbau der Ansteuerschaltung 7 für die Ex-

pansion-Spule 6 entspricht dem der Ansteuerschaltung 11 für die Hauptfeldspulen L1 und L2 aus Figur 3.

**[0030]** Zu Beginn eines Beschleunigungszyklus werden Elektronen in die Betatronröhre 5 injiziert und die Steuerelektronik 8 steuert die IGBT TR1 und TR2 derart an, dass diese durchschalten. Dadurch fließt ein ansteigender Strom I in der in Figur 3 eingetragenen Richtung vom Kondensator C durch die beiden IGBT TR1 und TR2 sowie die Hauptfeldspulen L1 und L2. Dabei wird Energie vom Kondensator C in die Hauptfeldspulen L1 und L2 transferiert und die Elektronen werden in der Betatronröhre 5 beschleunigt.

**[0031]** Zu einem von der gewünschten Endenergie der Elektronen abhängigen Zeitpunkt schaltet die Steuerelektronik 8 die IGBT 9 der Ansteuerschaltung 7 der Expansion-Spule 6 durch und beginnt damit den Expansion-Puls. Dadurch werden die Elektronen von der Sollbahn abgebracht und auf ein Target gelenkt. Sind alle Elektronen ausgeschleust, so endet der Expansion-Puls.

**[0032]** Sobald die Steuerelektronik 8 die beiden IGBT TR1 und TR2 in einen nicht leitenden Zustand versetzt, wird das von den Hauptfeldspulen L1 und L2 erzeugte Magnetfeld wieder abgebaut. Das sich abbauende Magnetfeld generiert einen Stromfluss I mit fallender Stromstärke über die Dioden D1 und D2 zum Kondensator C, bis die noch in den Hauptfeldspulen L1 und L2 gespeicherte Energie in den Kondensator C zurückgeflossen ist. Die Stromrichtung durch die Hauptfeldspulen L1 und L2 ist gleich wie beim Aufbau des Magnetfeldes, am Kondensator C jedoch entgegengerichtet.

**[0033]** Zu Beginn des folgenden Beschleunigungszyklus werden wieder Elektronen in die Betatronröhre 5 injiziert und die IGBT TR1 und TR2 durchgeschaltet. Soll die Endenergie beispielsweise geringer sein als im vorhergehenden Zyklus, werden die IGBT 9 der Ansteuerschaltung 7 der Expansion-Spule 6 von der Steuerelektronik 8 früher angesteuert. Das führt zu einem früheren Ausschleusen der Elektronen auf das Target. Dabei haben die Elektronen weniger Energie aufgenommen als im vorhergehenden Beschleunigungszyklus, weshalb die maximale Energie der erzeugten Röntgenstrahlung ebenfalls geringer ist.

**[0034]** Aufgrund des früheren Expansion-Pulses kann auch der Stromfluss I vom Kondensator C in die Hauptfeldspulen L1 und L2 früher beendet werden. Durch diese zeitnahe Abschaltung des Stromflusses werden der Energiebedarf des Betatrons 1 und die abzuführende Verlustwärme reduziert.

## Patentansprüche

1. Betatron (1) zur Erzeugung von Pulsen beschleunigter Elektronen, insbesondere in einer Röntgenprüfanlage, mit mindestens einer Hauptfeldspule (L1, L2), einer Expansion-Spule (6) zum Ausschleusen der beschleunigten Elektronen auf ein Target sowie einer Ansteuerelektronik (7) der Expansion-

Spule (6) zur Beaufschlagung der Expansion-Spule (6) mit einem Expansion-Puls, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Ansteuer-elektronik (7) der Expansion-Spule (6) derart ausgestaltet ist, dass der Zeitpunkt des Expansion-Pulses zur Einstellung der Endenergie der Elektronen relativ zum Hauptfeld variabel ist.

2. Betatron (1) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Zeitpunkt des Expansion-Pulses relativ zum Hauptfeld von Puls zu Puls variabel ist

3. Betatron (1) nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Ansteuerelektronik (7) der Expansion-Spule (6) einen abschaltbaren Halbleiterschalter (9), insbesondere einen IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), aufweist.

4. Betatron (1) nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Expansion-Spule (6) über den Halbleiterschalter (9) mit einer unabhängigen Energiequelle (10) zu einem Stromkreis verbunden ist.

5. Betatron (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **gekennzeichnet durch** eine Ansteuerschaltung der Hauptfeldspule (L1, L2), die derart ausgestaltet ist, dass der Strom **durch** die Hauptfeldspule (L1, L2) zu beliebigen Zeitpunkten ein- und ausschaltbar ist.

6. Betatron (1) nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Ansteuerschaltung der Hauptfeldspule (L1, L2) einen Energiespeicher (C), zwei Leistungsschalter (TR1, TR2) und zwei Dioden (D1, D2) aufweist, wobei

- ein erster Anschluss (16) des ersten Leistungsschalters (TR1) mit einem ersten Anschluss (14) des Energiespeichers (C),
- ein zweiter Anschluss (17) des ersten Leistungsschalters (TR1) mit einem ersten Anschluss (19) der ersten Diode (D1),
- ein zweiter Anschluss (20) der ersten Diode (D1) mit einem zweiten Anschluss (15) des Energiespeichers (C),
- ein erster Anschluss (21) der zweiten Diode (D2) mit dem ersten Anschluss (14) des Energiespeichers (C),
- ein zweiter Anschluss (22) der zweiten Diode (D2) mit einem ersten Anschluss (23) des zweiten Leistungsschalters (TR2),
- ein zweiter Anschluss (24) des zweiten Leistungsschalters (TR2) mit dem zweiten Anschluss (15) des Energiespeichers (C),
- ein erster Anschluss (26) der Hauptfeldspule (L1, L2) mit dem zweiten Anschluss (17) des ersten Leistungsschalters (TR1),
- ein zweiter Anschluss (27) der Hauptfeldspule (L1, L2) mit dem zweiten Anschluss (22) der

zweiten Diode (D2) und

- die Steueranschlüsse (18, 25) der Leistungsschalter (TR1, TR2) mit einer Steuerelektronik verbunden sind.

7. Betatron (1) nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Anschlüsse des Energiespeichers (C) in der Ansteuerschaltung der Hauptfeldspule (L1, L2) mit einer Spannungsquelle verbunden sind.
8. Betatron (1) nach einem der Ansprüche 6 oder 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** es sich bei den Leistungsschaltern (TR1, TR2) in der Ansteuerschaltung der Hauptfeldspule (L1, L2) um abschaltbare Halbleiterschalter, insbesondere um IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), handelt.
9. Betatron (1) nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** es sich bei dem Energiespeicher (C) in der Ansteuerschaltung der Hauptfeldspule (L1, L2) um einen bipolaren Kondensator wie einen Folienkondensator handelt.
10. Röntgenprüfanlage zur Sicherheitsüberprüfung von Objekten, aufweisend ein Betatron (1, 21) nach einem der Ansprüche 1 bis 9, ein Target zur Erzeugung von Röntgenstrahlung, einen Röntgendetektor und eine Auswerteeinheit.

#### Claims

1. Betatron (1) for generating pulses of accelerated electrons, in particular in an x-ray inspection system, having at least one main field coil (L1, L2), an expansion coil (6) for ejecting the accelerated electrons onto a target, and drive electronics (7) of the expansion coil (6) for subjecting the expansion coil (6) to an expansion pulse, **characterized in that** the drive electronics (7) of the expansion coil (6) are configured such that the point of time of the expansion pulse is variable relative to the main field for setting the final energy of the electrons.
2. Betatron (1) according to Claim 1, **characterized in that** the point of time of the expansion pulse relative to the main field is variable from pulse to pulse.
3. Betatron (1) according to Claim 1 or 2, **characterized in that** the drive electronics (7) of the expansion coil (6) have a semiconductor switch (9) which can be switched off, in particular an IGBT (insulated gate bipolar transistor).
4. Betatron (1) according to Claim 3, **characterized in that** the expansion coil (6) is connected via the semiconductor switch (9) to an independent energy

source (10) to form a current circuit.

5. Betatron (1) according to one of Claims 1 to 4, **characterized by** a drive circuit of the main field coil (L1, L2) which is configured such that the current through the main field coil (L1, L2) can be switched on and off at any point in time.
6. Betatron (1) according to Claim 5, **characterized in that** the drive circuit of the main field coil (L1, L2) has an energy storage device (C), two power switches (TR1, TR2) and two diodes (D1, D2), wherein
  - a first terminal (16) of the first power switch (TR1) is connected to a first terminal (14) of the energy storage device (C),
  - a second terminal (17) of the first power switch (TR1) is connected to a first terminal (19) of the first diode (D1),
  - a second terminal (20) of the first diode (D1) is connected to a second terminal (15) of the energy storage device (C),
  - a first terminal (21) of the second diode (D2) is connected to the first terminal (14) of the energy storage device (C),
  - a second terminal (22) of the second diode (D2) is connected to a first terminal (23) of the second power switch (TR2),
  - a second terminal (24) of the second power switch (TR2) is connected to the second terminal (15) of the energy storage device (C),
  - a first terminal (26) of the main field coil (L1, L2) is connected to the second terminal (17) of the first power switch (TR1),
  - a second terminal (27) of the main field coil (L1, L2) is connected to the second terminal (22) of the second diode (D2), and
  - the control terminals (18, 25) of the power switches (TR1, TR2) are connected to an electronic control system.
7. Betatron (1) according to Claim 6, **characterized in that** the terminals of the energy storage device (C) in the drive circuit of the main field coil (L1, L2) are connected to a voltage source.
8. Betatron (1) according to one of Claims 6 and 7, **characterized in that** the power switches (TR1, TR2) in the drive circuit of the main field coil (L1, L2) are semiconductor switches which can be switched off, in particular IGBT (insulated gate bipolar transistor).
9. Betatron (1) according to Claim 8, **characterized in that** the energy storage device (C) in the drive circuit of the main field coil (L1, L2) is a bipolar capacitor, such as a film capacitor.

10. X-ray inspection system for the security inspection of objects, having a betatron (1, 21) according to one of Claims 1 to 9, a target for generating x-rays, an x-ray detector and an evaluation unit.

5

## Revendications

1. Bêtatron (1) destiné à générer des impulsions d'électrons, notamment dans un système de test par rayons X, comportant au moins une bobine de champ principale (L1, L2), une bobine d'expansion (6) destinée à déclencher le passage d'électrons accélérés vers une cible, ainsi qu'une électronique de commande (7) de la bobine d'expansion (6) destinée à appliquer à la bobine d'expansion (6) une impulsion d'expansion, **caractérisé en ce que** l'électronique de commande (7) de la bobine d'expansion (6) est conçue de manière à ce que l'instant de l'impulsion d'expansion soit variable afin de régler l'énergie finale des électrons par rapport au champ principal.

10

15

20

2. Bêtatron (1) selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** l'instant de l'impulsion d'expansion par rapport au champ principal est variable d'impulsion à impulsion.

25

3. Bêtatron (1) selon la revendication 1 ou 2, **caractérisé en ce que** l'électronique de commande (7) de la bobine d'expansion (6) comprend un commutateur à semi-conducteur (9) pouvant être désactivé, notamment un IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).

30

4. Bêtatron (1) selon la revendication 3, **caractérisé en ce que** la bobine d'expansion (6) est reliée par l'intermédiaire du commutateur à semi-conducteur (9) à une source d'énergie (10) indépendante d'un circuit électrique.

35

40

5. Bêtatron (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, **caractérisé par** un circuit de commande de la bobine de champ principale (L1, L2) qui est conçu de manière à ce que le courant passant à travers la bobine de champ principale (L1, L2) puisse être activé et désactivé à des instants quelconques.

45

6. Bêtatron (1) selon la revendication 5, **caractérisé en ce que** le circuit de commande de la bobine de champ principale (L1, L2) comprend un accumulateur d'énergie (C), deux commutateurs de puissance (TR1, TR2) et deux diodes (D1, D2), dans lequel

50

- une première borne (16) du premier commutateur de puissance (TR1) est connectée à une première borne (14) de l'accumulateur d'énergie (C),

55

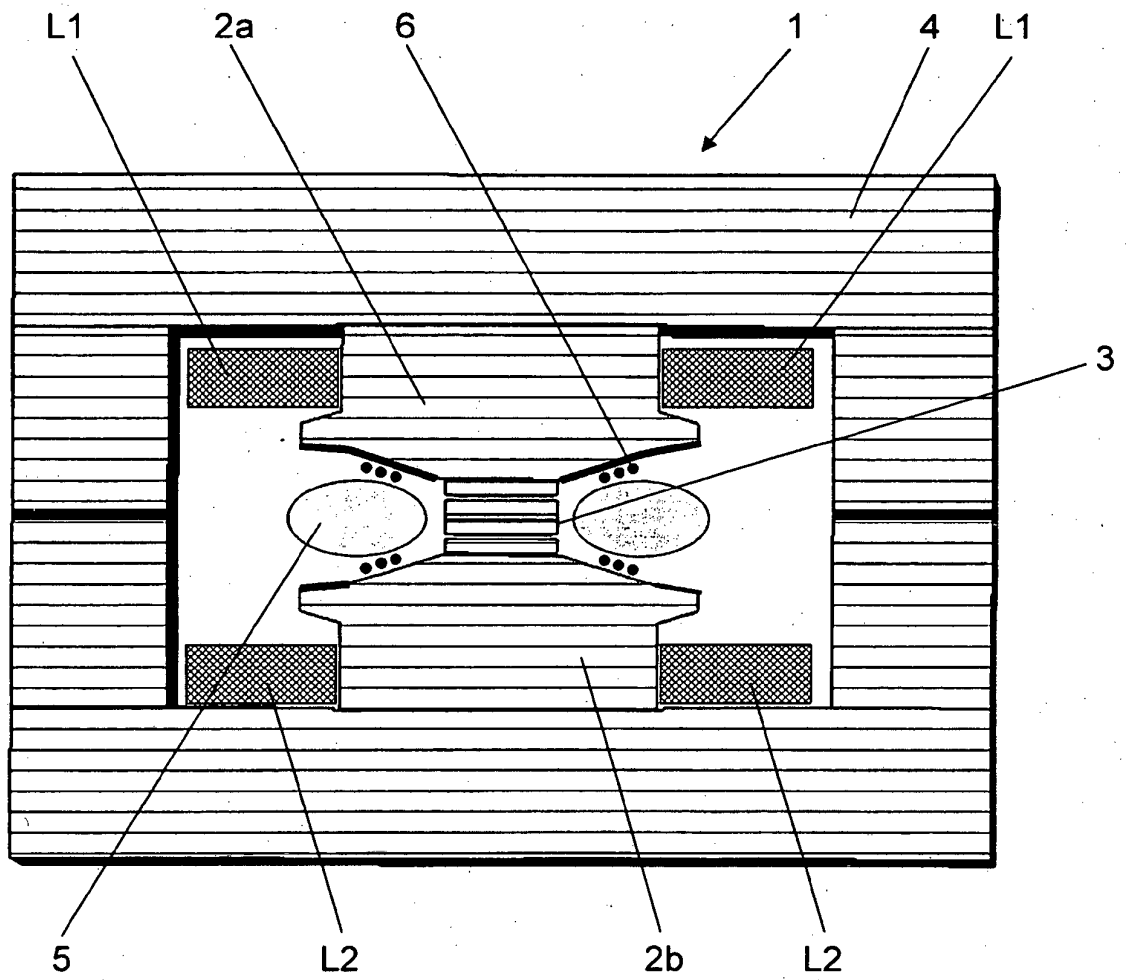
- une seconde borne (17) du premier commutateur de puissance (TR1) est connectée à une première borne (19) de la première diode (D1),  
 - une seconde borne (20) de la première diode (D1) est connectée à une seconde borne (15) de l'accumulateur d'énergie (C),  
 - une première borne (21) de la seconde diode (D2) est connectée à la première borne (14) de l'accumulateur d'énergie (C),  
 - une seconde borne (22) de la seconde diode (D2) est connectée à une première borne (23) du second commutateur de puissance (TR2),  
 - une seconde borne (24) du second commutateur de puissance (TR2) est connectée à la seconde borne (15) de l'accumulateur d'énergie (C),  
 - une première borne (26) de la bobine de champ principale (L1, L2) est connectée à la seconde borne (17) du premier commutateur de puissance (TR1),  
 - une seconde borne (27) de la bobine de champ principale (L1, L2) est connectée à la seconde borne (22) de la seconde diode (D2) et  
 - les bornes de commande (18, 25) des commutateurs de puissance (TR1, TR2) sont connectées à une électronique de commande.

7. Bêtatron (1) selon la revendication 6, **caractérisé en ce que** les bornes de l'accumulateur d'énergie (C) sont connectées à une source de tension dans le circuit de commande de la bobine de champ principale (L1, L2).

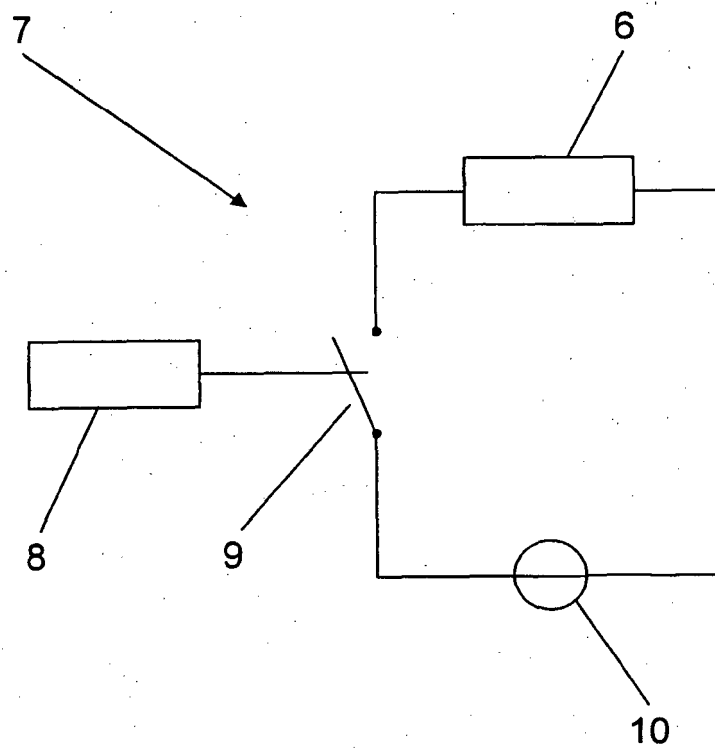
8. Bêtatron (1) selon l'une quelconque des revendications 6 ou 7, **caractérisé en ce que** les commutateurs de puissance (TR1, TR2) présent dans le circuit de commande de la bobine de champ principale (L1, L2) sont des commutateurs à semi-conducteurs pouvant être désactivés, notamment des IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).

9. Bêtatron (1) selon la revendication 8, **caractérisé en ce que** l'accumulateur de puissance (C) présent dans le circuit de commande de la bobine de champ principale (L1, L2) est un condensateur bipolaire tel qu'un condensateur à film.

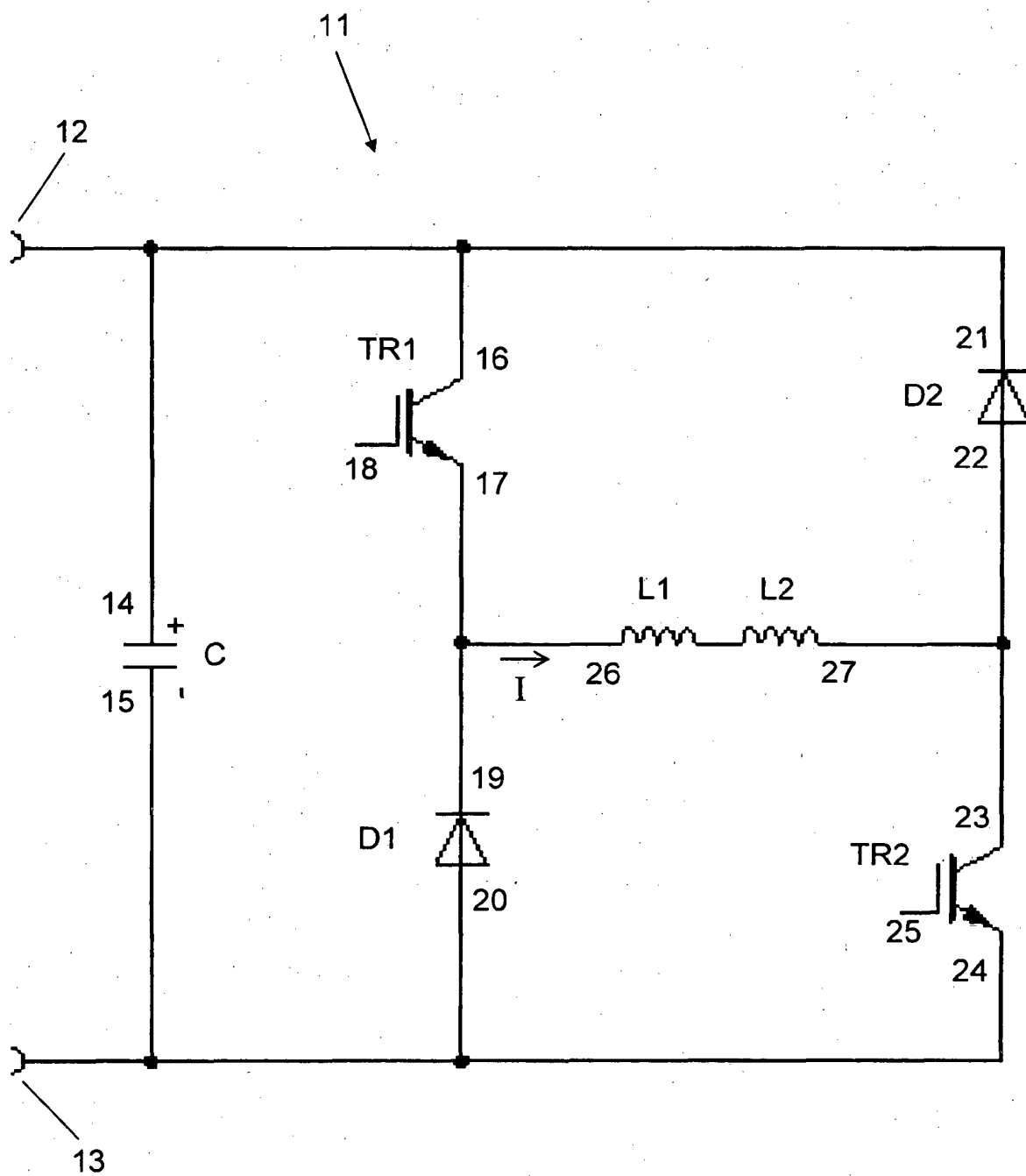
10. Système de test par rayons X destiné à inspecter la sécurité d'objets, comprenant un bêtatron (1, 21) selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, un cible destinée à générer un rayonnement X, un détecteur de rayons X et une unité d'évaluation.



**Fig. 1**



**Fig. 2**



**Fig. 3**

**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 Patentdokumente**

- EP 0412190 B1 [0002]
- US 5319314 A [0006]