(19) **Bundesrepublik Deutschland**
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 699 22 891 T2** 2005.12.08

(12) # Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 0 982 977 B1**
(21) Deutsches Aktenzeichen: **699 22 891.3**
(96) Europäisches Aktenzeichen: **99 116 186.0**
(96) Europäischer Anmeldetag: **24.08.1999**
(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **01.03.2000**
(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: **29.12.2004**
(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **08.12.2005**

(51) Int Cl.[7]: **H05H 7/04**

(30) Unionspriorität:

23849198	**25.08.1998**	**JP**
9713899	**05.04.1999**	**JP**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
DE, FR

(73) Patentinhaber:
Hitachi Metals, Ltd., Tokio/Tokyo, JP

(72) Erfinder:
Bizen, Yoshio, Yasugi-shi, JP; Sunakawa, Jun, Yasugi-shi, JP; Arakawa, Shunsuke, Yasugi-shi, JP

(74) Vertreter:
BEETZ & PARTNER Patentanwälte, 80538 München

(54) Bezeichnung: **Magnetkern für HF-beschleunigenden Hohlraum und der Hohlraum**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft einen Magnetkern für einen HF-beschleunigenden Hohlraum zur Beschleunigung geladener Partikel und einen HF-beschleunigenden Hohlraum, in dem der Magnetkern verwendet wird.

[0002] In den letzten Jahren sind Teilchenbeschleuniger nicht nur in der Kernphysikforschung, sondern auch bei der Entwicklung anspruchsvoller Technologien in der Medizin, der Materialforschung, der Biologie, usw. in großem Umfang verwendet worden. In einem Synchrotron wird ein HF-Hohlraum zur Erzeugung einer HF-Spannung benötigt um Ionen zu beschleunigen. Üblicherweise wird eine Beschleunigungskammer mit einem Frequenzband von mehreren MHz verwendet, in der ein Magnet in dem Resonator des Hohlraums verwendet wird. Eine hohe Beschleunigungsspannung ist erforderlich, insbesondere wenn die Beschleunigungskammer in Protonbeschleunigern hoher Intensität verwendet wird.

[0003] Wie in Fig. 5 gezeigt ist, hat ein HF-Beschleunigungshohlraum, in dem ein Magnet angeordnet ist einen Beschleunigungshohlraum **2** in der Mitte eines zylinderförmigen Vakuumgefäßes **1** und Magnetkerne **3b** und **3c** sind sich gegenüberliegend um das Vakuumgefäß **1** angeordnet. Eine koaxiale Übertragungsleitung besteht aus dem Vakuumgefäß **1** und einer äußeren Abdeckung **5**. Wenn ein Strom von der HF-Stromversorgung **4** zugeführt wird, wird eine HF-Spannung in dem Beschleunigungshohlraum durch eine Resonanz zwischen der Induktivität der Magnetkerne und der Kapazität des Beschleunigungshohlraums erzeugt und Ionenstrahlen werden durch die HF-Spannung beschleunigt.

[0004] Da die Drehgeschwindigkeit mit steigender Beschleunigungsenergie des Ionenstrahls steigt, ist es notwendig die Resonanzfrequenz des Beschleunigungshohlraums mit der Zeit zu erhöhen. Üblicherweise wird eine parallel geschaltet Stromversorgung **6** installiert und Spulen um die Magnetkerne gewickelt, wodurch die Permeabilität der Magnetkerne in dem äußeren Magnetfeld gesteuert wird, die durch den Biasstrom erzeugt wird, um die Resonanzfrequenz zu erhöhen.

[0005] Ein Nickel-Zinn-Ferrit wurde in dem Magnetkern des HF-Hohlraums verwendet. Kürzlich wurde vorgeschlagen, in einem Beschleunigungshohlraum Magnetkerne zu verwenden, die aus dünnen Streifen einer nanokristallinen weichmagnetischen Legierung hergestellt sind, was in den japanischen Druckschriften JP-A-6-333717 und JP-B2-2856130 beschrieben ist, wo feine Körner im Nanobereich mit einer Korngröße weniger als 50 nm gebildet werden, wobei diese mindestens 50% der Legierungsstruktur des Streifens ausmachen. Diese Techniken sind beschrieben in einem Bericht von Yoshii, mit dem Titel „RF Accelerating cavity", Seminar on High-Energy Accelerators, OHO96(1996), etc.

[0006] Die Leistung eines Magnetkerns für einen Beschleunigungshohlraum wird bestimmt durch den μ-Qf-Wert in dem μ' der reale Teil der komplexen Permeabilität des Magnetkerns bei einer Betriebsfrequenz f ist, und der Q-Wert verwendet wird. Ein exzellenter Beschleunigungshohlraum, der mit geringen Verlusten und einer hohen Effizienz arbeitet kann erhalten werden, indem ein Magnetkern verwendet wird, bei dem der μ'Qf'-Wert hoch ist.

[0007] Der Q-Wert ist definiert als das Verhältnis des Realteils μ' dividiert durch den imaginären Teil μ" der komplexen Permeabilität μ'/μ", und je höher dieser Wert ist, umso besser wird die Leistung des Magnetkerns.

[0008] In einem Beschleunigungshohlraum mit Ni-Zn-Ferrit Magnetkernen, war es schwer die Beschleunigungsspannung zu erhöhen, aufgrund der niedrigen Sättigungsmagnetflussdichte und der Curie-Temperatur. Wenn eine hohe elektrische Leistung angelegt wurde um die Beschleunigungsspannung zu erhöhen, trat magnetische Sättigung aufgrund von Wärmeerzeugung in dem Ferrit auf, was zu einem wesentlichen Absinken des μ'Qf'-Werts führte und was den Betrieb des Beschleunigungshohlraums instabil gestaltete. Ferner wurde, wenn die oben beschriebene nanokristalline weichmagnetische Legierung verwendet wurde der μ'Qf'-Wert klein wegen eines geringen Q-Wertes in dem MHz-Band, in dem der Beschleunigungshohlraum betrieben wird, was es unmöglich machte eine hohe Performance zu erzielen.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

[0009] Die vorliegende Erfindung wurde gemacht um die obigen Probleme zu lösen.

[0010] Es ist daher eine Aufgabe der Erfindung ein Hochleistungs-Magnetkern mit einem hohen μ'Qf'-Wert für einen HF-Beschleunigungshohlraum und den HF-Beschleunigungshohlraum anzugeben, in dem der Magnet-

kern verwendet wird.

[0011] Die Erfinder versuchten sich die Eigenschaften von dünnen Streifen aus nanokristallinem weichmagnetischem Legierungsmaterial in einer Hochfrequenzbeschleunigungskammer zu Nutze zu machen. Als Ergebnis fanden sie heraus, dass man ausgezeichnete Eigenschaften erhalten kann, indem man das als dünne Streifen vorliegende nanokristalline, weichmagnetische Legierungsmaterial als einen gegossenen Magnetkern verwendet und indem man einen Spalt mindestens in einem kleinen Stück des magnetischen Wegs vorsieht, und so kamen die Erfinder schließlich zur vorliegenden Erfindung.

[0012] Genauer gesagt betrifft die Erfindung einen gegossenen Magnetkern für einen HF-beschleunigenden Hohlraum mit: einem gewickelten Streifen aus einer weichmagnetischen Legierung mit einer Isolierschicht auf mindestens einer seiner Seiten, wobei die Metallstruktur des Legierungsstreifens Nanokristalle einer festen bcc-Fe Lösung aufweist, deren mittlerer Korndurchmesser nicht mehr als 100 nm beträgt und dessen Volumenanteil nicht weniger als 50% in der Metallstruktur ausmacht, wobei der Magnetkern mindestens einen magnetischen Spalt aufweist. Ein Spalt ist mindestens in einem Teil des magnetischen Pfads des Magnetkerns angeordnet.

[0013] Gestapelte Kerne, gebildet durch in Serie angeordnete Magnetkerne, sind über einen Hochspannungsspalt gegenüberliegend angeordnet, wodurch ein ausgezeichneter Hochfrequenzbeschleunigungshohlraum erzielt wird.

KURZBESCHREIBUNG DER FIGUREN

[0014] Fig. 1 zeigt ein Bespiel einer Konstruktion eines Magnetkerns für einen Hochfrequenzbeschleunigungshohlraum nach der vorliegenden Erfindung.

[0015] Fig. 2 zeigt ein weiteres Beispiel einer Konstruktion eines Magnetkerns für einen HF-Beschleunigungshohlraum nach der vorliegenden Erfindung;

[0016] Fig. 3 zeigt ein Beispiel eines Querschnitts durch eine Konstruktion eines Magnetkerns für einen HF-beschleunigenden Hohlraum nach der vorliegenden Erfindung;

[0017] Fig. 4 zeigt ein weiteres Beispiel einer Konstruktion eines Magnetkerns für einen HF-beschleunigenden Hohlraums nach der vorliegenden Erfindung.

[0018] Fig. 5 zeigt die Konstruktion eines HF-beschleunigenden Hohlraums nach der vorliegenden Erfindung.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG BEVORZUGTER AUSFÜHRUNGSFORMEN

[0019] Ein Beispiel der Form des in dem Beschleunigungshohlraum nach der vorliegenden Erfindung verwendeten Magnetkerns ist in Fig. 1 gezeigt.

[0020] In Fig. 1 ist ein Spalt **10** in dem magnetischen Pfad eines Magnetkerns **3a** vorgesehen, der aus gewickelten dünnen Streifen einer nanokristallinen weichmagnetischen Legierung hergestellt ist.

[0021] Der Grund warum dieser Spalt nach der Erfindung nötig ist, ist der, dass die Frequenz, bei der magnetische Resonanz auftritt zur Seite höherer Frequenzen durch die Bildung des Spalts verschoben wird, wodurch es möglich wird, den Q-Wert im MHz-Band zu erhöhen. Dies führt zu einem Ansteigen des Wertes μ'Qf, wodurch ein sehr effizienter Beschleunigungshohlraum entsteht.

[0022] Es können natürlich auch zwei Spalte vorgesehen sein, wie in Fig. 2 gezeigt ist. Noch mehr Spalte sind ebenfalls akzeptabel.

[0023] Wenn die Spaltbreite oder die Anzahl der Spalte steigt, sinkt μ', welches eine grundmagnetische Größe ist, obwohl der Q-Wert steigt. Es ist daher notwendig eine Justage vorzunehmen.

[0024] In dem Spalt kann ein elektrisch isolierendes Material wie Epoxi-Harz gefüllt sein. Das Schneiden des Magnetkerns zum Erzeugen des Hohlraums kann durch eine Schleifscheibe oder durch elektrisches Entladungsverarbeiten, durch einen Wasserstrahl, Laser oder ähnlichem ausgeführt werden. Obwohl der Schnittbereicht so wie er ist verwendet werden kann, können Wirbelstromverluste durch Glätten des Schnittbereichs

durch mechanisches oder chemisches Polieren verringert werden.

[0025] Da sowohl die magnetische Flussdichtesatturierung als auch die Curie-Temperatur hoch sind, kann die Beschleunigungsspannung des HF-Beschleunigungshohlraums leicht gesteigert werden, indem der Magnetkern, der aus einem dünnen Streifen aus einem nanokristallinen weichmagnetischen Legierungsmaterial hergestellt wird, dessen feste Lösung mit einer mittleren Korngröße von nicht mehr als 100 nm einen Volumenanteil von mehr als 50% in der Metallstruktur der Legierung ausmacht.

[0026] Wie oben erwähnt führt das Bilden eines Spalts dazu, dass μ' reduziert wird und daher ist es notwendig ein Magnetmaterial zu verwenden, dessen μ' so groß wie möglich ist, wenn kein Spalt vorgesehen ist. Mit anderen Worten, es ist notwendig ein Material mit ausgezeichneten Hochfrequenz-Eigenschaften, mit niedriger Magnetostriction und mit kleiner magnetokristalliner Anisotropie zu verwenden. Die Erfinder haben sich entschieden, die oben erwähnten dünnen Streifen aus nanokristallinem weichmagnetischen Legierungsmaterial zu verwenden, welches die obigen Bedingungen erfüllt.

[0027] Bei der Ausformung eines Spalts in dem magnetische Pfad, z. B. durch Schneiden der Magnetkerne, ist das Gießen der Magnetkerne nach der vorliegenden Erfindung unbedingt notwendig um durch Zwischenschichten isolierte dünne Legierungsstreifen aneinander zu befestigen, wodurch verhindert wird, dass der Schnittbereich des Kerns durch das Schneiden beschädigt wird.

[0028] Für ein solches Vergießen stehen Epoxi-Harze, Polyiamid-Harze, phenolhaltige Harze, Lacke, hauptsächlich bestehend aus modifiziertem Alkylsilicat, Silikonharze, usw. zur Verfügung. Das Vergießen erfolgt vorzugsweise in einem Vakuum oder bei Unterdruck. Dies ermöglicht ein gleichmäßiges Gießen ohne das Auftreten von Gasblasen. Nach dem Gießen kann der Magnetkern bei Raumtemperatur oder zwischen 100 und 200°C für mehrere Stunden ausgehärtet werden. Ein Isolationszwischenfilm ist bei der vorliegenden Erfindung wünschenswert. **Fig. 3** zeigt schematisch im Querschnitt den Aufbau eines Magnetkerns, der isolierende Zwischenschichtfilme aufweist. Der Magnetkern **3a** ist aus einem dünnen Streifen aus nanokristallinem weichmagnetischem Legierungsmaterial **8** mit einem isolierenden Zwischenschichtfilm **7** und in Harz **9** vergossen.

[0029] Es ist möglich Wirbelstromverluste zu reduzieren indem ein isolierender Zwischenschichtfilm an mindestens einer Seite des dünnen Streifens aus nanokristallinem weichmagnetischen Legierungsmaterial angebracht wird, wodurch ein Absinken des μ'-Wertes im MHz-Band verhindert wird. Die Dicke des isolierenden Zwischenschichtfilms liegt vorzugsweise zwischen 0,5 und 5 μm und vorzugsweise zwischen 1 und 3 μm. Es können Fälle auftreten, in denen das Abnehmen des μ'-Wertes aufgrund von Wirbelstromverlusten mit wachsender Dicke des Zwischenschichtisolationsfilms einer Dicke von weniger als 0,5 μm bemerkenswert wird und in denen der μ'-Wert aufgrund von Spannungen in dem Magnetkern abnimmt einem Zwischenschichtisolationsfilm der dicker ist als 5 μm, was zu einer Abnahme der Leistungsfähigkeit eines Beschleunigungshohlraums führt.

[0030] Der Zwischenschichtisolationsfilm kann hergestellt werden aus SiO_2, Al_2O_3, MgO, etc. In diesem Fall kann der Zwischenschichtisolationsfilm auf folgende Weise hergestellt werden, bei der eine Alkohollösung mit Metall-Alkoxiden auf dem dünnen Legierungsstreifen aufgebracht wird und dieser getrocknet wird, Anbringen von Pulvern auf dem dünnen Legierungsstreifen durch Eintauchen, Besprühen oder Elektrophorese, Ausbilden eines Films durch Spattern oder Aufdampfen, Ausbilden eines Films auf der Oberfläche des dünnen Streifens durch Hitzebehandlung, etc.

[0031] Die Dicke des dünnen Streifens aus nanokristallinem weichmagnetischem Aluminiummaterial, der den Magnetkern bildet, kann z. B. zwischen 10 und 30 μm liegen und ist vorzugsweise 15 bis 25 μm. Dies liegt daran, dass es manchmal schwierig ist, einen dünnen Streifen herzustellen, der eine geringere Dicke als 10 μm hat und bei Streifendicken, die 30 μm überschreiten steigen die Wirbelstromverluste des magnetischen Kerns, was zu einer Verschlechterung der Leistungsfähigkeit der Hochfrequenz-Beschleunigungskammer führt oder was die Stabilität des dünnen Streifens beeinträchtigt.

[0032] Ferner liegt der Packungsfaktor des Magnetkerns vorzugsweise zwischen 60 und 80% und weiter vorzugsweise zwischen 65 und 75%. Ein hocheffizienter Magnetkern für den Hochfrequenzbeschleunigungshohlraum kann in diesem Bereich erzielt werden. Der Packungsfaktor kann definiert werden als das räumliche Verhältnis des Volumens, welches durch den magnetischen Körper eingenommen wird zum erscheinenden Volumen des Magnetkerns. Dies liegt daran, dass Fälle auftreten können, bei denen der Packungsfaktor geringer als 60% ist. Ein Magnetkern mit einer Packungsdichte, die größer als 80% ist wird schwer herzustellen sein und die Wirbelstromverluste des Magnetkerns steigen, was zu einer Minderung der Leistung des Hochfre-

quenz-Beschleunigungshohlraums führt.

[0033] Ein dünner Streifen aus nanokristallinem weichmagnetischem Legierungsmaterial kann vorzugsweise Eisen als Hauptelement aufweisen, mindestens ein Element aus der Gruppe Kupfer und Gold, und mindestens ein Element aus der Gruppe bestehend aus Ti, V, Zr, Nb, Mo, Hf, Ta und W als wesentliche Elemente, aus denen der Magnetkern nach der Erfindung geformt ist. Zum Beispiel eine Fe-Cu-Nb-Zr-Si-B Legierung, eine Fe-Zr-B Legierung, eine Fe-Cu-Zr-B Legierung, eine Fe-Nb-B Legierung, eine Fe-Zr-B Legierung, eine Fe-Cu-Zr-B Legierung und eine Fe-Nb-Al-Si-B Legierung, wie sie in der japanischen Patentanmeldung JP-A-4-4393 offenbart sind, eignen sich zum Einsatz bei der vorliegenden Erfindung.

[0034] Ein Beispiel eines Herstellungsverfahrens des Magnetkerns nach der Erfindung wird im Folgenden beschrieben.

[0035] Zuerst wird ein dünner Streifen aus einer amorphen Legierung aus einer geschmolzenen Legierung hergestellt, die die oben erwähnte chemische Zusammensetzung hat, indem eine Liquid-Quenching Methode, wie beispielsweise ein Single-Roller Prozess angewandt wird. Obwohl der dünne Streifen aus amorphem Legierungsmaterial eine kristalline Phase aufweisen kann, ist es wünschenswert, dass die abgeschreckte Legierung überwiegend eine einzige amorphe Phase aufweist um gleichmäßig Körner im Nanobereich durch aufeinander folgende Wärmebehandlungen zu erzeugen.

[0036] Nach der Ausbildung eines Zwischenschichtisolationsfilms nach der oben beschriebenen Methode wird der dünne Streifen aus amorphem Legierungsmaterial gewickelt um den Magnetkern zu erzeugen und anschließend einer Wärmebehandlung unterzogen.

[0037] Die Wärmebehandlung ist unverzichtbar, um eine nanokristalline Struktur nach der Erfindung zu erzeugen, in der eine feste bcc-Lösung mit einer mittleren Korngröße von weniger als 100 nm ein Volumenanteil von mehr als 50% in der gesamten Legierungsstruktur einnimmt.

[0038] Die Temperatur und Zeit der Wärmebehandlung, die von der Größe des Magnetkerns oder der chemischen Zusammensetzung des dünnen Legierungsstreifens abhängen, liegen allgemein zwischen 450 und 700°C und zwischen 5 Minuten und etwa 24 Stunden. Vorzugsweise liegen die Werte zwischen 500 und 600°C und zwischen 20 Minuten und 6 Stunden. Dies liegt daran, dass bei weniger als 450°C eine Kristallisation schwer zu erzielen ist und weil bei einer Temperatur über 700°C sich ungleichmäßige grobe Körner ausbilden.

[0039] Wenn die Wärmebehandlungsdauer kleiner als 5 Minuten ist, ist es schwer eine gleichmäßige Temperatur im gesamten Magnetkern zu erhalten und der μ'-Wert variiert. Wenn die Wärmebehandlungszeit länger als 24 Stunden dauert, ist nicht nur die Produktivität schlecht, sondern auch die magnetischen Eigenschaften können verschlechtert werden aufgrund exzessiven Kornwachstums und der Bildung von Körnern mit nicht gleichmäßiger Morphologie. Die Wärmebehandlung wird vorzugsweise unter Vakuum, in einem inerten Gas oder Stickstoff, Argon, Wasserstoff etc. und einer Reduktionsgasatmosphäre durchgeführt. Die Wärmebehandlung kann jedoch ebenfalls in einer oxidierenden Atmosphäre wie Luft stattfinden. Als Kühlung kann eine Luftkühlung gewählt werden oder eine Kühlung in einem Ofen.

[0040] Die Wärmebehandlung kann ebenfalls in einem magnetischen Gleichstrom oder Wechselstromfeld durchgeführt werden. Die magnetischen Eigenschaften des Kerns können verbessert werden, indem man die magnetische Anisotropie durch eine Wärmebehandlung in einem Magnetfeld steuert. Es ist nicht notwendig, ein Magnetfeld während der gesamten Zeit der Wärmebehandlung anzulegen und es reicht aus, ein Magnetfeld nur in dem Zeitraum anzulegen, in dem der Magnetkern auf einer Temperatur unterhalb der Curie-Temperatur des Kerns liegt. Die Intensität des angelegten Magnetfelds ist so gewählt, dass sie dazu führt, dass der Magnetkern in Sättigung geht. Im Allgemeinen ist die Intensität des Magnetfelds vorzugsweise größer als 1000 A/m.

[0041] Nachdem der wärmebehandelte Magnetkern in ein Harz, wie oben erwähnt, eingegossen ist, wird ein Spalt durch Einschneiden eines Teils des Magnetkerns gebildet. Schließlich wird ein Abstandshalter in den Spalt eingefügt und die Außenseite des Magnetkerns wird mit einem nicht-magnetischen Metallband befestigt. Insbesondere im Fall eines großen Magnetkerns, z. B. mit einem äußeren Durchmesser von 500 mm, ist es wünschenswert, wie in Fig. 4 gezeigt, um Verformungen aufgrund seines Gewichts zu verhindern, einen inneren Kern **11** aus einem nicht-magnetischen Metall, einem Isolator, etc. anzuordnen um das Äußere des magnetischen Kerns mit einem Band **12** aus nicht-magnetischem Metall zu befestigen und den Magnetkern mit einer Trägerplatte **13** aus nicht-magnetischem Metall oder einem Isolator zu unterstützen. Das nicht-magneti-

sche Material kann Edelstahl, Bronze, Aluminium usw. sein. Der Isolator kann Epoxi-Harz, Phenolharz, glasfaserverstärktes Plastik, Keramik, etc. sein.

[0042] Um Hitzeentwicklung ausgehend von dem Magnetkern zu verhindern kann dieser gekühlt werden, indem man ein Rohr aus einem Material mit hoher thermischer Leitfähigkeit, z. B. ein Kupferrohr, um den Magnetkern anordnet und Kühlwasser dadurch zirkulieren lässt. Der HF-Beschleunigungshohlraum nach der Erfindung kann die in Fig. 5 gezeigte Form haben. Er kann hergestellt sein durch Aufstellen eines Stapels von Kernen, der durch eine Reihenanordnung der oben beschriebenen Magnetkerne für den HF-Hohlraum nach der Erfindung, wie beispielsweise den Magnetkern **3b** und dem gegenüber angeordneten Magnetkern **3c**, die durch eine ähnlich Stapelanordnung unter Freilassung eines Beschleunigungsspalts angeordnet sind.

[0043] Die Anzahl der Stapel von Magnetkern **3a** für den Beschleunigungshohlraum nach der Erfindung, der durch die Magnetkerne **3b** und **3c**, die für den Beschleunigungshohlraum nach der Erfindung gebildet werden, wird entsprechend der effektiven Querschnittsgröße gewählt, die für den Magnetkern erforderlich ist.

[0044] Wenn elektrischer Strom von einer Hochfrequenzstromversorgung **4** zugeführt wird, wird eine HF-Spannung in dem Beschleunigungshohlraum durch eine Resonanz zwischen der Induktanz der Magnetkerne und der Kapazität des Beschleunigungshohlraums erzeugt, und Ionenstrahlen können durch die HF-Spannung beschleunigt werden.

[0045] Die Umlaufgeschwindigkeit steigt mit steigender Beschleunigungsenergie des Ionenstrahls, wie bei einem konventionellen Beschleunigungshohlraum, und es ist daher wünschenswert die Resonanzfrequenz des Beschleunigungshohlraums mit der Zeit zu erhöhen. Es ist möglich, diese Resonanzfrequenz durch den Einbau einer parallel geschalteten Stromversorgung **6** zu erhöhen und durch das Umwickeln der Magnetkerne mit Spulen, wodurch die Permeabilität der Magnetkerne in dem äußeren Magnetfeld, welches durch den Bias-Strom erzeugt wird, gesteuert wird.

Beispiel 1:

[0046] Mit dem Single-Roller Verfahren wurde ein dünner Streifen aus der Legierung $Fe_{bal}Cu_1Nb_3Si_{16}B_7$ (Atomprozent) mit einer Breite von 25 mm und einer Dicke von 18 µm erzeugt. Ein kreisringförmiger Magnetkern mit einem äußeren Durchmesser von 900 mm und einem Innendurchmesser von 300 mm und einer Höhe von 25 mm wurde erhalten, indem ein Isolationsfilm aus SiO_2 mit einer Dicke von 2 µm auf beiden Oberflächen des dünnen Legierungsstreifens aufgebracht wurde und dieser dünne Legierungsstreifen aufgewickelt wurde während der Zwischenschichtisolationsfilm aufgebracht und getrocknet wurde. Danach wurde der Magnetkern einer Wärmebehandlung in Stickstoffatmosphäre bei 550°C für eine Stunde ohne Magnetfeld unterzogen. Feine Körner im Nanobereich mit einer mittleren Korngröße von 20 nm hatten einen Volumenanteil von 80 % in der gesamten Legierungsstruktur im Magnetkern. Danach, nach dem Eingießen des Magnetkerns in Epoxi-Harz unter reduziertem Druck, gefolgt von Aushärten, wurde eine Teil des Magnetpfads durch Wasserstrahlschneiden gebildet und ein Spalt **10** mit einer Spaltbreite von 2 mm wurde im Magnetpfad des Magnetkerns **3a**, wie in Fig. 2 gezeigt, ausgebildet.

[0047] Als ein Vergleichsbeispiel wurde ein Magnetkern ohne Spalt in dem Magnetpfad auf ähnliche Weise erhalten. Tabelle 1 zeigt die Q-Werte und die µ'Qf-Werte der Magnetkerne gemessen mit einem LCR-Messgerät bei Frequenzen zwischen 0,5 und 10 MHz.

Tabelle 1

Frequenz f (MHz)	Beispiel nach der Erfindung		Vergleichsbeispiel	
	Q-Wert	µ'Qf-Wert	Q-Wert	µ'Qf-Wert
0,5	14,69	$4,10x10^9$	1,05	$8,77x10^8$
1	9,83	$5,56x10^9$	0,80	$5,77x10^8$
5	3,94	$7,98x10^9$	0,69	$6,29x10^8$
10	2,63	$8,73x10^9$	0,69	$8,64x10^8$

[0048] Wie man in Tabelle 1 erkennt, sind die Q-Werte bei dem Beispiel nach der Erfindung bemerkenswert hoch verglichen mit denen des Vergleichsbeispiels. Da der µ'Qf-Wert hoch ist, wird ein ausgezeichneter

HF-Beschleunigungshohlraum erhalten, der hocheffizient arbeitet.

[0049] Ferner ist bei dem Magnetkern für einen HF-Beschleunigungshohlraum nach der vorliegenden Erfindung die Sättigungsmagnetflussdichte 1,24T und die Curie-Temperatur beträgt 570°C, wobei beide Werte hoch sind. Daher ist es möglich die Beschleunigungsspannung des Beschleunigungshohlraums zu erhöhen.

Beispiel 2:

[0050] Ein dünner Legierungsstreifen aus $Fe_{bal}Cu_{1.5}Nb_{3.5}Zr_{2.9}Si_{0.3}B_{6.4}$ (Atomprozent) mit einer Breite von 25 mm und einer Dicke von 15 µm wurde nach dem Single-Roller Verfahren hergestellt. Ein kreisringförmiger Magnetkern mit 950 mm Außendurchmesser, 260 mm Innendurchmesser und 25 mm Höhe wurde erhalten durch Wickeln des dünnen Legierungsstreifens während ein Zwischenschichtisolationsfilm aus MgO auf beiden Oberflächen des dünnen Legierungsstreifens aufgetragen wurde. Magnetkerne mit einer Dicke ihres Zwischenschichtisolationsfilms, die zwischen 0 und 7 µm variierte, wurden hergestellt. Danach wurde jeder Magnetkern einer Wärmebehandlung im Vakuum bei 600°C für eine Stunde und ohne Magnetfeld unterzogen. Feine Körner im Nanobereich mit einer mittleren Korngröße von 15 nm wurden erzeugt und hatten ein Volumenanteil von 90% der gesamten Legierungsstruktur im Magnetkern.

[0051] Danach wurde nach dem Eingießen des Magnetkerns in ein Epoxi-Harz im Vakuum, gefolgt von Aushärten, ein Teil des Magnetpfades mit einem CO_2-Gas-Laser geschnitten und ein Spalt **10** mit einer Spaltbreite von 2mm wurde im Magnetpfad, wie in Fig. 1 gezeigt, ausgeformt.

[0052] Tabelle 2 zeigt den Realteil µ' der komplexen Permeabilität der Magnetkerne, die mit verschieden dicken Zwischenschichtisolationsfilmen bei einer Frequenz von 1 MHz hergestellt sind. Wie sich aus der Tabelle ergibt, zeigen Magnetkerne mit Zwischenschichtisolationsfilmen mit einer Dicke von 0,5 bis 5 µm einen hohen µ'-Wert und sie eignen sich besonders gut für Magnetkerne für ein Beschleunigungshohlraum.

Tabelle 2

Dicke des Zwischenschichtisolationsfilms (µm)	Realteil µ' der komplexen magnetischen Permeabilität bei 1 MHz	Bemerkungen
0	300	Vergleichsbeispiel
0,2	470	Erfindungsbeispiel
0,5	500	Dito
1	515	Dito
2	520	Dito
3	515	Dito
5	510	Dito

Beispiel 3:

[0053] Dünne Legierungsstreifen aus $Fe_{bal}Nb_{7.4}B_{8.4}$ (Atomprozent) mit einer Breite von 25 mm wurden mit verschiedenen Dicken zwischen 8 und 35 µm nach dem Single-Roller Verfahren hergestellt. Ein kreisringförmiger Magnetkern mit einem Außendurchmesser von 550 mm, einem Innendurchmesser von 300 mm und einer Höhe von 50 mm wurde erhalten durch Wickeln des dünnen Legierungsstreifens während ein Zwischenschichtisolationsfilm aus SiO_2 einer Dicke von 1,8 µm auf einer Oberfläche des dünnen Legierungsstreifens angebracht wurde. Danach wurde der Magnetkern einer Wärmebehandlung in einer Wasserstoffatmosphäre bei 650°C während einer Stunde ohne Magnetfeld ausgesetzt. Feine Körner in Nanobereich mit einer mittleren Korngröße von 12 nm hatten einen Volumenanteil von 95 % in der gesamten Legierungsstruktur des Magnetkerns.

[0054] Danach wurde, nach Eingießen des Magnetkerns in anorganischen Lack im Vakuum, gefolgt von Aushärten, ein Teil des Magnetpfads durch elektrisches Entladungsgradschneiden geschnitten und Spalte **10** mit jeweils einer Spaltbreite von 1 nm wurden im Magnetpfad des Magnetpfads **3a**, wie in Fig. 1 gezeigt, erhalten.

[0055] Tabelle 3 zeigt den Realteil µ' der komplexen Permeabilität und Q-Werte der so hergestellten Magnetkerne bei einer Frequenz von 1 MHz. Man erkennt, dass die Magnetkerne, die aus einem dünnen Streifen aus

nanokristalliner Legierung mit einer Dicke zwischen 10 und 30 µm hergestellt wurden, einen hohen µ'-Wert haben und dass sie sich außergewöhnlich gut für Magnetkerne für Beschleunigungshohlräume eignen.

Tabelle 3

Dicke des dünnen Streifens (µm)	Realteil µ' der komplexen magnetischen Permeabilität bei 1 MHz	Q-Wert bei 1 MHz	Bemerkungen
8	nicht messbar	nicht messbar	Herstellung eines dünnen Streifens ist schwer
10	1700	4,3	Beispiel nach der Erfindung
15	1500	4,7	Dito
20	1200	4,5	Dito
25	1100	4,3	Dito
30	1000	4,2	Dito
33	890	3,0	Dito
35	810	2,6	Dito

Beispiel 4:

[0056] Ein dünner Legierungsstreifen aus $Fe_{bal}Cu_{1,5}Nb_2Si_{7,5}B_{12}$ (Atomprozent) mit einer Breite von 25 mm und einer Dicke von 25 µm wurde nach dem Single-Roller Verfahren hergestellt. Ein kreisringförmiger Magnetkern mit einem Außendurchmesser von 930 mm, einem Innendurchmesser von 520 mm und einer Höhe von 25 mm wurde erhalten durch Auftragen eines Zwischenschichtisolationsfilms aus SiO_2 auf beiden Oberflächen des dünnen Legierungsstreifens und durch Aufwickeln des dünnen Legierungsstreifens während der Zwischenschichtisolationsfilm aufgetragen und getrocknet wurde. Magnetkerne mit einem Packungsfaktor zwischen 55 und 85 % wurden erhalten. Danach wurde jeder Magnetkern einer Wärmebehandlung in einer Stickstoffatmosphäre bei 530°C während einer Stunde ausgesetzt, wobei ein Magnetfeld von 1000 A/m in Richtung der Magnetkernhöhe angelegt wurde. Feine Körner im Nanobereich mit einer mittleren Korngröße von 25 nm hatten einen Volumenanteil von 80% in der gesamten Legierungsstruktur des Magnetkerns.

[0057] Danach wurde nach Vergießen des Magnetkerns in Epoxi-Harz unter reduziertem Druck ein Teil des Magnetpfads durch Wasserstrahlschneiden und Spalte **10** mit jeweils einer Spaltbreite von 2 mm wurden im Magnetpfad des Magnetkerns **3a**, wie in Fig. 2 gezeigt erhalten.

[0058] Tabelle 4 zeigt den Realteil µ' der komplexen Permeabilität und Q-Werte der so hergestellten Magnetkerne bei einer Frequenz von 3 MHz. Wie aus der Tabelle ersichtlich, zeigen Magnetkerne mit einem Packungsfaktor von 60 bis 80 % hohe µ'- und Q-Werte und eignen sich ausgezeichnet als Magnetkerne für Beschleunigungshohlräume.

Tabelle 4

Packungsfaktor (%)	Realteil μ' der komplexen magnetischen Permeabilität bei 3 MHz	Q-Wert bei 3 MHz	Bemerkungen
55	nicht messbar	nicht messbar	Herstellung eines dünnen Streifens ist schwierig
60	815	4,6	Beispiel nach der Erfindung
65	810	4,5	Dito
70	800	4,4	Dito
75	790	4,4	Dito
80	750	4,0	Dito
85	620	3,3	Dito

[0059] Erfindungsgemäß wird ein Hochleistungsmagnetkern für einen HF-Beschleunigungshohlraum und der HF-Beschleunigungshohlraum angegeben, der stabil mit einer hohen Beschleunigungs-HF-Spannung arbeitet.

Patentansprüche

1. Magnetkern für einen HF-beschleunigenden Hohlraum mit:
einem gewickelten Streifen aus einer weichmagnetischen Legierung (**8**) mit einer Isolierschicht (**7**) auf mindestens einer seiner Seiten, wobei die Metallstruktur des Legierungsstreifens Nanokristalle einer festen bcc-Fe-Lösung aufweist, deren mittlerer Korndurchmesser nicht mehr als 100 nm beträgt und dessen Volumenanteil nicht weniger als 50 % in der Metallstruktur ausmacht,
dadurch gekennzeichnet, dass
der Magnetkern gegossen ist und mindestens einen magnetischen Spalt (**10**) aufweist.

2. Magnetkern nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Dicke der Isolierschicht (**7**) zwischen 0,5 und 5 μm beträgt.

3. Magnetkern nach einem der Ansprüche 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Dicke des Streifens zwischen 10 und 30 μm beträgt.

4. Magnetkern nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Packungsdichte des Magnetkerns (**3a**) zwischen 60 und 80 % liegt.

5. Magnetkern nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass der Streifen aus weichmagnetischer Legierung (**8**) Eisen als Hauptkomponente enthält und mindestens ein Element aus der Gruppe bestehend aus Kupfer und Gold und mindestens ein Element aus der Gruppe bestehend aus Ti, V, Zr, Nb, Mo, Hf, Ta und W als wesentliches Element enthält.

6. HF-beschleunigender Hohlraum mit einem Kernstapel, gebildet durch in Serie angeordnete Magnetkerne (**3b**, **3c**) nach einem der Ansprüche 1 bis 5 zur Herstellung des Hochfrequenzhohlraums (**2**), wobei die gestapelten Kerne über einen Beschleunigungsspalt gegenüberliegend angeordnet sind.

Es folgt ein Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG. 1

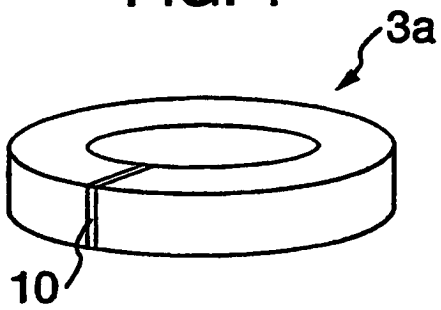

FIG. 2

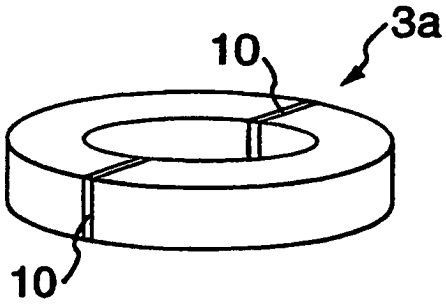

FIG. 3

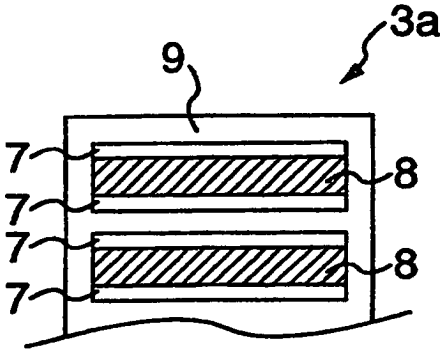

FIG. 4

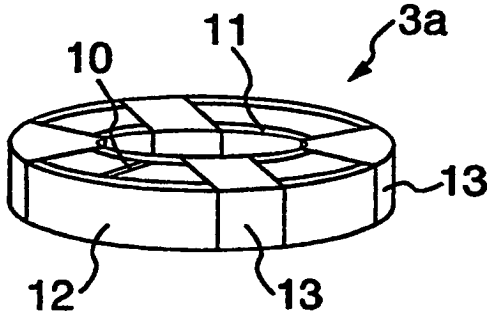

FIG. 5

