



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) DE 699 23 134 T2 2005.12.29

(12)

Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) EP 0 992 591 B1

(51) Int Cl.⁷: C21D 8/12

(21) Deutsches Aktenzeichen: 699 23 134.5

(96) Europäisches Aktenzeichen: 99 119 133.9

(96) Europäischer Anmeldetag: 05.10.1999

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: 12.04.2000

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: 12.01.2005

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: 29.12.2005

(30) Unionspriorität:

28403498 06.10.1998 JP

(84) Benannte Vertragsstaaten:

DE, FR, GB, IT

(73) Patentinhaber:

Nippon Steel Corp., Tokio/Tokyo, JP

(72) Erfinder:

Sakai, Tatsuhiko, Futtsu City, Chiba 293-0011, JP;
Minamida, Katsuhiro, Futtsu City, Chiba 293-0011,
JP; Sugiyama, Kimihiko, Tobata-ku, Fukuoka, JP;
Mogi, Hisashi, Tobata-ku, Fukuoka, JP; Fujikura,
Masahiro, Futtsu City, Chiba 293-0011, JP

(74) Vertreter:

Vossius & Partner, 81675 München

(54) Bezeichnung: Kornorientiertes Elektrostahlblech und Verfahren zu seiner Herstellung

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 eingelebt, 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 Erfindung betrifft ein kornorientiertes Elektrostahlblech, das einen geringen Eisenverlust und eine hohe magnetische Flußdichte auch nach Entspannungsglühen behält und sowohl auf einen Stapel- (lamellierten) Kern als auch auf einen Wickelkern angewendet werden kann, sowie ein Verfahren zu seiner Herstellung.

[0002] Eines der Verfahren zur Herstellung eines kornorientierten Elektrostahlblechs ist in der JP-A-58-26405 beschrieben. Dieses Verfahren strahlt Laserenergie auf die Oberfläche eines Stahlblechs ab, um eine magnetische 180°-Domainenwand (Blockwand) zu bilden, verteilt die magnetischen Domänen fein und senkt dadurch den Eisenverlust. Gemäß diesem Verfahren wird der Beschichtungsschicht auf der Oberfläche des Stahlblechs durch Laserbestrahlung verdampft, durch die Reaktion auf die Verdampfung erfährt die Oberflächenschicht des Stahlblechs eine Spannung, und eine magnetische Abschlußdomäne wird in der Umgebung des laserbestrahlten Abschnitts gebildet. Die neu erzeugte magnetische Abschlußdomäne erhöht auf diese Weise die statische magnetische Energie, aber die magnetische Domäne ist so feinverteilt, daß diese erhöhte statische magnetische Energie mit dem Ergebnis minimiert wird, daß der Eisenverlust verbessert werden kann. Infolge der Verbesserung des Eisenverlusts durch diesen Domänen-Feinverteilungseffekt kann der Eisenverlustwert auf einen Minimalwert gesenkt werden, der durch den Kristallorientierungsgrad des Materials bestimmt ist. Da dieses Verfahren der bekannten Technik keine körperliche Verformung beinhaltet, die ansonsten die magnetische Flußdichte stark behindern würde, ist das Verfahren nahezu frei von einem Abfall der magnetischen Flußdichte nach der Laserbestrahlung.

[0003] Aus diesen Gründen zeigt das durch dieses Verfahren hergestellte kornorientierte Elektrostahlblech ideale magnetische Eigenschaften.

[0004] Freilich verschwindet die Spannung, die als Feinverteilungsquelle der magnetischen Domäne fungiert, bei rund 500 °C während der Wärmebehandlung, und dabei verschwindet auch der den Eisenverlust senkende Effekt.

[0005] Anders gesagt kann der den Eisenverlust senkende Effekt im kornorientierten Elektrostahlblech, das durch das bekannte Verfahren hergestellt ist, Entspannungsglühen nicht widerstehen, das bei etwa 800 °C in einem Herstellungsverfahren für einen Wickeleisenkern durchgeführt wird, und verschwindet.

[0006] Aus diesem Grund kann das durch dieses Verfahren hergestellte kornorientierte Elektrostahlblech nicht für Wickelkerne verwendet werden, sondern kommt ausschließlich für Stapelkerne zum Einsatz.

[0007] Daher wurden Verfahren als Verfeinerungstechnologien der magnetischen Domäne vorgeschlagen, die Entspannungsglühen widerstehen können und der Oberfläche des Stahlblechs Abschnitte mit gegenseitig unterschiedlichen Permeabilitätswerten in Anwendungsrichtung des Magnetfelds verleihen. Konkreter gesagt wurden Verfahren, die lineare oder strichlinienartige Bereiche mit gegenseitig unterschiedlichen Permeabilitätswerten in einer Richtung bilden, die im wesentlichen senkrecht zur Walzrichtung auf der Stahlblechoberfläche ist, und verschiedene durch die Verfahren hergestellte Produkte vorgeschlagen. Von diesen ist die Verfeinerungstechnologie der magnetischen Domäne, die Nuten auf der Oberflächenschicht des Stahlblechs bildet und die Permeabilitätsdifferenz zwischen einem Grundmetall und Luft nutzt, eine ausgezeichnete Technologie, und diese Technologie hat bereits gewerbliche Anwendung gefunden. Vorgeschlagen wurden im übrigen ein Verfahren, das eine Zahn- bzw. Riffelwalze mechanisch in das Stahlblech drückt (JP-B-63-44804), ein Verfahren, das chemisches Ätzen verwendet (US-A-4750949) und ein Bearbeitungsverfahren, das gepulste Laserenergie verwendet (JP-A-7-220913) als Verfahren zur Bildung der Nuten.

[0008] Bei all diesen kornorientierten Elektrostahlblechen, die durch die bekannten Verfahren hergestellt werden und sowohl einen geringen Eisenverlust als auch einen durch Glühen verschwindenden Widerstand haben, werden die Nuten nur auf einer der Oberflächen der Stahlbleche gebildet. In diesem Fall muß die Tiefe der Nuten etwa 15 bis 30 µm betragen, wenn das Stahlblech 0,23 mm dick ist, um einen praktisch ausreichenden, den Eisenverlust senkenden Effekt zu erhalten, wenngleich die Nutentiefe je nach der Einrichtung variiert, die zur Bildung der Nuten verwendet wird. Anders ausgedrückt muß eine tiefe Nut gebildet werden, die 5 % der Blechdicke übersteigt. Da sich der den Eisenverlust senkende Effekt mit der Änderung der Nutentiefe erheblich ändert, muß die Nutentiefe sorgfältig gesteuert werden. Daher sind die herkömmlichen Produkte noch nicht frei von den im folgenden dargestellten Problemen der Produkteigenschaften und des Herstellungsverfahrens.

[0009] Zunächst werden die Probleme der Produkteigenschaften erläutert. Da die tiefe Nut, die 15 µm oder 5

der Blechdicke übersteigt, in der Oberflächenschicht des Stahlblechs körperlich gebildet ist, liegt eine große Behinderung der magnetischen Flußdichte vor. Anders ausgedrückt besteht weiterhin das Problem, daß die in einem beliebigen externen magnetischen Fluß auftretende magnetische Flußdichte nach Bildung der Nut stark abfällt, vergleicht man sie mit der magnetischen Flußdichte vor Bildung der Nut. Da sich ferner der den Eisenverlust senkende Effekt mit Änderung der Nutentiefe erheblich ändert, wird die Varianz der Eisenverlustkennwerte der Produkte groß, sofern die Nutentiefe nicht ausreichend gesteuert wird.

[0010] Als nächstes werden die Probleme im Herstellungsverfahren erläutert. Um den Eisenverlust durch Zufügen von Nuten zu verbessern, ist eine Nut mit einer Tiefe von 15 bis 30 µm erforderlich, was zuvor beschrieben wurde. Allerdings sind die Ansprüche an das Herstellungsverfahren groß, um eine solche tiefe Nut über die volle Breite des Stahlblechs herzustellen, das mehr als 1 m breit ist, und es entstehen verschiedene Probleme im Hinblick auf Einbau- und Betriebskosten sowie Produktionsleistung. Beim mechanischen Verfahren, das eine Riffelwalze in das Stahlblech drückt, muß die Kraft erhöht sein, um das Stahlblech mit einer tiefen Nut zu versehen, weshalb der Aufbau einen größeren Maßstab annimmt. Mit Verschleiß der Riffelwalze wird die Nutentiefe kleiner, und es kommt zu einem weiteren Problem, daß die Riffelwalze häufig ausgetauscht werden muß. Das chemische Ätzverfahren erfordert eine lange Ätzzeit, und die Bearbeitungsgeschwindigkeit ist begrenzt. Zur Verbesserung der Ätzrate wird ein längerer Ätzbehälter nötig. Auch beim Laserverfahren muß die Laserleistung zum Ausarbeiten tiefer Nuten erhöht werden. Dadurch wird der Aufbau größer, und mehrere große Lasergeneratoren sind notwendig.

[0011] Bei erhöhter Laserbestrahlungsleistung im Fall des Laserverfahrens wird der Wärmeeinfluß auf die Umfangsabschnitte des bestrahlten Abschnitts übermäßig ausgeübt, so daß es zu Ausdehnungsverformung im gesamten Stahlblech kommt. Werden solche Stahlbleche gestapelt, um den Stapelkern herzustellen, steigt der Eisenverlust, oder ein Füllfaktor ist beeinträchtigt. Daher beinhaltet das Stahlblech, in dem tiefe Nuten durch das Laserverfahren gebildet sind, noch ein weiteres Problem, daß das Stahlblech nicht für den Stapelkern verwendet werden kann.

[0012] Das Laserverfahren ist eine ausgezeichnete Technologie, da es eine berührungsreie Bearbeitung mit hoher Geschwindigkeit durchführen kann, der Ablauf einfach ist und die Nutentiefe und Positionsgenauigkeit der Nutenbildungspositionen ausgezeichnet steuerbar sind. Jedoch beinhaltet es das Problem, daß es bei Bildung einer tiefen Nut einen übermäßigen Wärmeeinfluß auf die Umfangsabschnitte des bestrahlten Abschnitts ausübt und leicht zur Verformung des Stahlblechs führt, was die magnetischen Eigenschaften beeinträchtigen würde.

[0013] Eine Aufgabe der Erfindung besteht darin, ein kornorientiertes Elektrostahlblech mit ausgezeichneten magnetischen Eigenschaften bereitzustellen, das einen Domänenverfeinerungseffekt hat, der Entspannungsglühen widerstehen kann, das in einem Herstellungsverfahren eines Wickelkerns durchzuführen ist, auf einen Wickelkern angewendet werden kann, den Eisenverlust stabil reduzieren kann, frei von Beeinträchtigung einer magnetischen Flußdichte ist, Verformung einschränken kann, auch auf einen Stapelkern angewendet werden kann und den Anspruch an Produktionsaufbauten reduzieren kann, und auch ein Verfahren zu seiner Herstellung bereitzustellen.

[0014] Im Rahmen der Erfindung wurden verschiedene Nuten und/oder Wärmeeinflusschichten auf einem kornorientierten Elektrostahlblech durch das Laserverfahren gebildet und die magnetischen Eigenschaften näher untersucht, nachdem das Stahlblech entspannungsgeglüht wurde. Als Ergebnis wurde im Rahmen der Erfindung festgestellt, daß sich überaus hervorragende magnetische Eigenschaften im Vergleich zu denen des herkömmlichen kornorientierten Elektrostahlblechs durch Bilden von Wärmeeinflusschichten oder Nuten und Wärmeeinflusschichten auf beiden Oberflächen des Stahlblechs erhalten lassen.

[0015] Die Erfindung kam auf der Grundlage der zuvor beschriebenen Feststellung zustande, und der Kern der Erfindung liegt in den nachfolgend dargestellten Punkten.

[0016] In der Erfindung werden lineare oder strichlinienartige geschmolzene und wiederverfestigte Schichten, die durch Bestrahlung mit einem energiereichen Strahl erzeugt werden, oder lineare oder strichlinienartige Nuten und geschmolzene und wiederverfestigte Schichten, die durch Bestrahlung mit einem energiereichen Strahl erzeugt werden, die auch nach Entspannungsgeglühen verbleiben, auf beiden Oberflächen des Stahlblechs erzeugt. Daher ist der Eisenverlust auf ein Minimum reduziert. Da dieser den Eisenverlust senkende Betrag kaum von der Nutentiefe abhängt, hat das kornorientierte Elektrostahlblech eine kleine Varianz der magnetischen Eigenschaften. Da die zur Senkung des Eisenverlusts notwendige Nutentiefe minimiert ist und da die Nutentiefe in der Erfindung nicht streng gesteuert zu werden braucht, stellt das kornorientierte Elektrostahl-

blech keine großen zusätzlichen Ansprüche an die Produktionsaufbauten. In der Erfindung ist die Nutentiefe auf beiden Oberflächen des Stahlblechs vorzugsweise auf höchstens 5 % des Stahlblechs begrenzt. Daher ist das kornorientierte Elektrostahlblech der Erfindung nahezu frei vom Abfall der magnetischen Flußdichte. In der Erfindung formen die Bildungspositionen der Wärmeeinflußschichten oder der Nuten und Wärmeeinflußschichten auf beiden Oberflächen des Stahlblechs Paare, und ihre Positionsabweichung ist nicht größer als die Breite der Wärmeeinflußschichten oder der Nuten und Wärmeeinflußschichten in Walzrichtung. Daher kann das Stahlblech für einen großen Senkungseffekt des Eisenverlusts sorgen und ist gleichzeitig frei von Ausdehnungsverformung, die das Problem im Stahlblech für den Stapelkern ist. Folglich lässt sich das Stahlblech sowohl auf den Stapelkern als auch den Wickelkern anwenden. Da ferner die Erfindung Strahlen mit hoher Energie verwendet, insbesondere einen Dauerstrich- oder einen Impulslaser, stellt die Erfindung ein Herstellungsverfahren für ein kornorientiertes Elektrostahlblech bereit, das die Wärmeeinflußschichten oder die Nuten und Wärmeeinflußschichten auf beiden Oberflächen des Stahlblechs mit hoher Positionsgenauigkeit bilden kann.

[0017] Im übrigen ist die Wärmeeinflußschicht in der Erfindung als geschmolzene und wiederverfestigte Schichten festgelegt, die durch die Bestrahlung mit den energiereichen Strahlen erzeugt werden, z. B. Laser-, Elektronenstrahlen usw. Eine solche Schicht hat eine Permeabilität, die sich von der des Stahlblechgrundmetalls unterscheidet, und hat ein Schichtvolumen in solch einem Maß, daß sie für einen Verfeinerungseffekt der magnetischen Domäne im Stahlblech sorgen kann. Diese Wärmeeinflußschicht lässt sich durch mikroskopische Beobachtung eines Schnitts des Stahlblechs leicht nachweisen.

[0018] Im folgenden werden bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung anhand der Zeichnungen beschrieben. Es zeigen:

[0019] [Fig. 1\(a\)](#) eine Schnittansicht verschiedener Schnittformen kornorientierter Elektrostahlbleche, wobei Stähle A bis F die Schnittformen kornorientierter Elektrostahlbleche zeigen, die Nuten und/oder Wärmeeinflußschichten auf beiden Oberflächen haben; ein Stahl G die Schnittform eines kornorientierten Elektrostahlblechs gemäß der bekannten Technik zeigt, das einen Widerstand dagegen, durch Glühen zu verschwinden hat, und in dem eine Nut auf einer der Oberflächen gebildet ist; und ein Stahl H die Schnittform eines kornorientierten Elektrostahlblechs zeigt, das keinen Widerstand dagegen, durch Glühen zu verschwinden hat, und in dem eine magnetische Domaine nur durch die Verdampfungsreaktion eines Stahlblechfilms infolge von Laserbestrahlung feinverteilt ist;

[0020] [Fig. 1\(b\)](#) eine vergrößerte Ansicht der Nuten und der Wärmeeinflußschichten in verschiedenen Schnittformen gemäß [Fig. 1\(a\)](#) in Vergrößerung;

[0021] [Fig. 2\(a\)](#) eine erläuternde Ansicht, die zur Erklärung der Abweichung der Nutenbildungspositionen auf beiden Oberflächen eines kornorientierten Elektrostahlblechs von Nutzen ist;

[0022] [Fig. 2\(b\)](#) und [Fig. 2\(c\)](#) erläuternde Ansichten der Meßergebnisse der Oberflächenrauhigkeit nach Entspannungsglühen des erfindungsgemäßen kornorientierten Elektrostahlblechs mit den Wärmeeinflußschichten oder den Nuten und Wärmeeinflußschichten;

[0023] [Fig. 3\(a\)](#) eine erläuternde Ansicht des kornorientierten Elektrostahlblechs, die zur Erklärung seines erfindungsgemäßen Herstellungsverfahrens von Nutzen ist; und

[0024] [Fig. 3\(b\)](#) eine vergrößerte Ansicht eines Teils (eines Abschnitts eines Leerkreises O in [Fig. 3\(a\)](#)) einer strichlinienartigen Nut gemäß [Fig. 3\(a\)](#).

[0025] Zunächst wird ein Herstellungsverfahren des erfindungsgemäßen kornorientierten Elektrostahlblechs erläutert.

[0026] Das Herstellungsverfahren des erfindungsgemäßen kornorientierten Elektrostahlblechs bildet Nuten und Wärmeeinflußschichten oder nur die Wärmeeinflußschichten auf beiden Oberflächen des kornorientierten Elektrostahlblechs. Diese Wärmeeinflußschichten oder Nuten und Wärmeeinflußschichten werden durch energiereiche Bearbeitungstechnologien hergestellt, die Laserenergie, Elektronenstrahlen, Ionenstrahlen, Plasma usw. verwenden. Am stärksten bevorzugt von diesen ist die einen Laser verwendende Technologie (Laserverfahren) als Herstellungsverfahren des erfindungsgemäßen kornorientierten Elektrostahlblechs aus Sicht der Strahlpositionsgenauigkeit beim Bestrahlen, Steuerbarkeit der Bildung von Wärmeeinflußschichten oder Nuten und Wärmeeinflußschichten und Gebrauchstauglichkeit in atmosphärischer Luft im Vergleich mit Ver-

fahren, die andere Energiestrahlen verwenden.

[0027] Im übrigen kann die Aufgabe der Erfindung gelöst werden, wenn nur Wärmeeinflusschichten oder Nuten und Wärmeeinflusschichten für einen Widerstand gegen durch Glühen ausgeübte Wärme auf den Oberflächenschichten des Fertigprodukts gebildet werden. Daher können die Wärmeeinflusschichten oder Nuten und Wärmeeinflusschichten in beliebigen Verfahrensschritten eines gewöhnlichen Herstellungsverfahrens der kornorientierten Elektrostahlbleche gebildet werden.

[0028] Im folgenden wird das erfindungsgemäße kornorientierte Elektrostahlblech erläutert, bei dem als Beispiel ein Laser als Energiestrahlquelle zum Einsatz kommt.

[0029] Ist die Leistungsdichte eines Lasers extrem hoch und seine Bestrahlungszeit kurz, wenn die Laserenergie auf das Stahlblech abgestrahlt wird, wird das Stahlblechgrundmetall an seinem bestrahlten Abschnitt sofort geschmolzen, und fast der gesamte bestrahlte Abschnitt verdampft, wodurch eine Nut gebildet wird. Hierbei werden Wärmeeinflusschichten auf der Seitenfläche und dem Boden der so erzeugten Nut geringfügig gebildet. Da aber das Volumen dieser Wärmeeinflusschicht extrem klein ist, zeigt die Wärmeeinflusschicht selbst keinen Verfeinerungseffekt der magnetischen Domäne, obwohl sich ihre Permeabilität von der des Grundmetalls unterscheidet. Daher gehört diese Wärmeeinflusschicht nicht zur Wärmeeinflusschicht, die in der Erfindung festgelegt ist. Außerdem ist die dadurch gebildete Nut im wesentlichen die gleiche wie die Nut, die ohne jegliche Wärmeeinwirkung gebildet wird, z. B. durch ein Ätzverfahren.

[0030] Ist die Bestrahlungszeit verlängert oder die Leistungsdichte gesenkt, wenn die Laserenergie auf das Stahlblech abgestrahlt wird, wird das Metall des bestrahlten Abschnitts nicht verdampft. Infolge dessen steigt die Menge der Komponenten, die aus dem Schmelzzustand wiederverfestigt werden, die Nut wird gebildet, und gleichzeitig wird eine Wärmeeinflusschicht erzeugt, die eine im wesentlichen gleiche Dicke wie die Nutentiefe hat und eine geschmolzene und wiederverfestigte Schicht aufweist. Da sich die Permeabilität dieser Wärmeeinflusschicht von der Permeabilität des Grundmetalls unterscheidet, ändert sie das Magnetfeld auf die gleiche Weise wie die Nut. Anders gesagt hat diese Wärmeeinflusschicht den Domänenverfeinerungseffekt. Daher gehört diese Wärmeeinflusschicht zu den in der Erfindung festgelegten Wärmeeinflusschichten.

[0031] Bei weiterer Absenkung der Leistungsdichte des Lasers, wenn die Laserenergie auf das Stahlblech abgestrahlt wird, erreicht das Metall des bestrahlten Abschnitts nicht den Schmelzpunkt, und es werden geschmolzene und wiederverfestigte Schichten gebildet, die frei von Nutenbildung sind. Auch in einem solchen Fall hat der vom Laser bestrahlte Abschnitt einen bestimmten wiederholten Erwärmungs-Abkühlungs-Zyklus, weshalb sich seine Permeabilität von der des Grundmetalls unterscheidet. Als Ergebnis zeigt diese Schicht den Domänenverfeinerungseffekt. Aus diesem Grund gehört diese Schicht zu den in der Erfindung festgelegten Wärmeeinflusschichten.

[0032] Wie zuvor erläutert wurde, kann die Erfindung ein kornorientiertes Elektrostahlblech bereitstellen, das sowohl eine hohe magnetische Flußdichte als auch einen geringen Eisenverlust hat, extrem stabile Eigenschaften hat und sich sowohl auf den Stapelkern als auch auf den Wickelkern anwenden lässt. In der Erfindung ist die Tiefe der zu bildenden Nut klein, und die Nutentiefe braucht nicht streng gesteuert zu werden. Daher lässt sich die Anforderung an Produktionsaufbauten reduzieren. Wird der energiereiche Strahl, insbesondere der Laserstrahl, für das Herstellungsverfahren der Erfindung verwendet, können die optimalen Wärmeeinflusschichten oder Nuten und Wärmeeinflusschichten leicht und mit hoher Genauigkeit erzeugt werden.

[0033] Im folgenden wird die Erfindung anhand von Beispielen näher erläutert. Allerdings dienen diese Beispiele nur zur Veranschaulichung und keineswegs zur Einschränkung.

Beispiel 1

[0034] [Fig. 3\(a\)](#) ist eine erläuternde Ansicht, die zur Erklärung des kornorientierten Elektrostahlblechs und seines Herstellungsverfahrens gemäß der Erfindung von Nutzen ist. Impulsstrahlen **4**, die von einer nicht gezeigten Laservorrichtung ausgegeben und durch eine Linse **5** fokussiert werden, bilden strichlinienartige Wärmeeinflusschichten oder strichlinienartige Nuten und Wärmeeinflusschichten mit Abständen $PL = 6,5 \text{ mm}$ in L-Richtung. [Fig. 1\(a\)](#) zeigt verschiedene Schnittformen der kornorientierten Elektrostahlbleche mit solchen Nuten und/oder Wärmeeinflusschichten, die auf diese Weise gebildet sind, und [Fig. 1\(b\)](#) zeigt vergrößert die auf diese Weise gebildeten Nuten **2** und Wärmeeinflusschichten **3**. In den Stahlblechen A bis G gemäß [Fig. 1\(a\)](#) betrug der Durchmesser des fokussierten Laserstrahls $0,1 \text{ mm}$ in L-Richtung und $0,3 \text{ mm}$ in C-Richtung. Die Breite der durch einen solchen Strahl gebildeten strichlinienartigen Nuten betrug $WL = 0,13 \text{ mm}$ in

L-Richtung bzw. WC = 0,31 mm in C-Richtung. Der strichlinienartige Abstand PC in C-Richtung betrug 0,30 mm. Gemäß [Fig. 3\(b\)](#) sind daher die strichlinienartigen Nuten in C-Richtung zueinander benachbart. Hierbei ist die Tiefe der Nut durch den Maximalwert d der Tiefe gemäß [Fig. 1\(b\)](#) festgelegt. Eine Abweichung der Nuttenbildungpositionen auf beiden Oberflächen ist durch einen Wert g gemäß [Fig. 2\(a\)](#) festgelegt.

[0035] Tabelle 1 zeigt die Bewertungsergebnisse für die magnetischen Eigenschaften jedes Stahlblechs. Hierbei war der Eisenverlustwert ein Eisenverlustwert W17/50 bei 50 Hz und der maximalen magnetischen Flußdichte 1,7 T, und die magnetische Flußdichte war ein Wert B8 bei einer Magnetisierungskraft von 0,8 A/m. Das Stahlblech war ein 0,23 mm dickes kornorientiertes Elektrostahlblech mit einem Isolierfilm auf seiner Oberfläche. Zum Vergleich sind die magnetischen Eigenschaften des Stahlblechs auch in der Tabelle gezeigt, dessen Eisenverlust durch Laserspannung reduziert und das ausschließlich für einen Stapelkern bestimmt war. Die Laserbestrahlungsbedingung und die Bedingungen für die Nuten, die Wärmeeinflußschichten usw. jedes Stahlblechs sind im folgenden aufgeführt. Im übrigen wurde das Vorhandensein der Nuten und der Wärmeeinflußschicht durch mikroskopische Untersuchung des Schnitts des Stahlblechs nachgewiesen.

Tabelle 1

Stahlblech	Nuten-tiefe einer Oberflä- che	Bearbeitete Oberflä- che	Oberflächen-zustand	Vor Laserbe-strahlung		Nach Laserbestrahlung	Ände-rungsbe-trag des Eisen-verlusts $\Delta W_{17/50}$ (W/kg) *	Ände-rungsbe-trag der Fluß-dichte ΔB_8 (Gauss) *
				Eisen-verlust W17/50 (W/kg)	Fluß-dichte B_8 (T) *			
A [⊕]	30 μm	beide Oberflächen ($g = 1,5 \text{ mm}$)	nur Nut	0,799	1,927	0,752	1,889	-0,047
B [⊕]	30 μm	beide Oberflächen ($g = 0,1 \text{ mm}$)	nur Nut	0,799	1,926	0,754	1,868	-0,045
C	10 μm	beide Oberflächen ($g = 0,1 \text{ mm}$)	Nut und Wärmeeinflußschicht	0,799	1,925	0,748	1,922	-0,051
D [⊕]	5 μm	beide Oberflächen ($g = 0,1 \text{ mm}$)	nur Nut	0,800	1,925	0,752	1,924	-0,048
E	5 μm	beide Oberflächen ($g = 0,1 \text{ mm}$)	Nut und Wärmeeinflußschicht	0,800	1,925	0,751	1,924	-0,049
F	keine Nut	beide Oberflächen ($g = 0,1 \text{ mm}$)	nur Wärmeeinflußschicht	0,800	1,926	0,753	1,925	-0,047
G (Stand der Technik)	30 μm	eine Oberfläche	nur Nut	0,799	1,927	0,754	1,870	-0,045
H (Stand der Technik)	keine Nut	eine Oberfläche	nur Oberflächenspannung	0,799	1,925	0,750	1,924	-0,049

* Werte der Stahlbleche A bis G stellen die Werte nach Entspannungsglühen dar.
 ⊕ nicht erfundungsgemäß

Stahlblech A

[0036] Nuten mit einer Tiefe von 30 μm wurden auf beiden Oberflächen des Stahlblechs durch einen CO₂-Impuls lasergeschnitten. Die Spitzenleistungsdichte des CO₂-Impulslasers mit Güteschaltung be-

trug etwa 10 bis etwa 30 MW/mm², und die Gesamtdauer der Impulszeit betrug 20 µs. Der laserbestrahlte Abschnitt wurde durch die Bearbeitung mit hohem Spitzenimpuls nahezu vollständig verdampft. Die durch die Erfindung festgelegte Wärmeeinflusschicht existierte nicht am bestrahlten Abschnitt, und nur die Nuten waren vorhanden. Die Abweichung g der Nutenbildungspositionen auf beiden Oberflächen des Stahlblechs betrug etwa 1,5 mm und war größer als die Breite WL der Nuten in L-Richtung.

Stahlblech B

[0037] Nuten mit einer Tiefe von 30 µm wurden auf beiden Oberflächen des Stahlblechs durch einen CO₂-Impulslaser mit Güteschaltung erzeugt. Hierbei betrug die Spitzenleistungsdichte des CO₂-Impulslasers mit Güteschaltung etwa 10 bis etwa 30 MW/mm², und die Gesamtdauer der Impulszeit betrug 20 µs. Der laserbestrahlte Abschnitt wurde nahezu vollständig verdampft. Die durch die Erfindung festgelegte Wärmeeinflusschicht existierte nicht am bestrahlten Abschnitt, und nur die Nuten waren vorhanden. Die Abweichung g der Nutenbildungspositionen auf beiden Oberflächen des Stahlblechs betrug etwa 0,1 mm und war kleiner als die Breite WL der Nuten in L-Richtung.

Stahlblech C

[0038] Nuten mit einer Tiefe von 10 µm wurden auf beiden Oberflächen des Stahlblechs durch einen impulsmodulierten CO₂-Laser erzeugt. Die Spitzenleistungsdichte des Impulslasers betrug 0,4 bis 0,8 MW/mm², und die Gesamtdauer der Impulszeit betrug 20 µs. Wegen der Verringerung der Impulsspitzenleistung waren die durch die Erfindung festgelegten Nuten und Wärmeeinflusschichten am bestrahlten Abschnitt gemischt vorhanden. Die Abweichung g der Nutenbildungspositionen auf beiden Oberflächen des Stahlblechs betrug 0,1 mm und war kleiner als die Breite WL der Nuten in L-Richtung.

Stahlblech D

[0039] Nuten mit einer Tiefe von 5 µm wurden auf beiden Oberflächen des Stahlblechs durch einen CO₂-Impulslaser mit Güteschaltung erzeugt. Hierbei betrug die Spitzenleistungsdichte des CO₂-Impulslasers mit Güteschaltung etwa 10 bis etwa 30 MW/mm², und die Gesamtdauer der Impulszeit betrug 12 µs. Aufgrund der Bearbeitung mit hohem Spitzenimpuls wurde der laserbestrahlte Abschnitt nahezu vollständig verdampft. Die durch die Erfindung festgelegte Wärmeeinflusschicht existierte nicht am bestrahlten Abschnitt, und nur die Nuten waren vorhanden. Die Abweichung g der Nutenbildungspositionen auf beiden Oberflächen des Stahlblechs betrug etwa 0,1 mm und war kleiner als die Breite WL der Nuten in L-Richtung.

Stahlblech E

[0040] Nuten mit einer Tiefe von 5 µm wurden auf beiden Oberflächen des Stahlblechs durch einen impulsmodulierten CO₂-Laser erzeugt. Hierbei betrug die Spitzenleistungsdichte des Impulslasers 0,4 bis 0,8 MW/mm², und die Gesamtdauer der Impulszeit betrug 12 µs. Wegen der Verringerung der Impulsspitzenleistung waren die durch die Erfindung festgelegten Nuten und Wärmeeinflusschichten am bestrahlten Abschnitt gemischt vorhanden. Die Abweichung g der Nutenbildungspositionen auf beiden Oberflächen des Stahlblechs betrug 0,1 mm und war kleiner als die Breite WL der Nuten in L-Richtung.

Stahlblech F

[0041] Nur die Wärmeeinflusschichten wurden auf beiden Oberflächen des Stahlblechs durch einen impulsmodulierten CO₂-Laser erzeugt. Hierbei betrug die Spitzenleistungsdichte des Impulslasers 0,2 MW/mm², und die Gesamtdauer der Impulszeit betrug 7 µs. Wegen der weiteren Verringerung der Impulsspitzenleistung waren nur die durch die Erfindung festgelegten Wärmeeinflusschichten auf der Oberfläche vorhanden. Die Abweichung g der Bildungspositionen der Wärmeeinflusschichten auf beiden Oberflächen des Stahlblechs betrug 0,1 mm und war kleiner als die Breite WL der Wärmeeinflusschichten in L-Richtung.

Stahlblech G

[0042] Das Stahlblech G war ein herkömmliches Stahlblech, in dem Nuten mit 30 µm Tiefe nur auf einer der Oberflächen des Stahlblechs durch einen CO₂-Impulslaser mit Güteschaltung erzeugt waren. Hierbei betrug die Spitzenleistungsdichte des CO₂-Impulslasers mit Güteschaltung etwa 10 bis etwa 30 MW/mm², und die Gesamtdauer der Impulszeit betrug 20 µs. Infolge der Bearbeitung mit hohem Spitzenimpuls wurde der laserbestrahlte Abschnitt nahezu vollständig verdampft. Die durch die Erfindung festgelegten Wärmeeinflusschichten

existierte nicht am bestrahlten Abschnitt, und nur die Nuten waren vorhanden.

Stahlblech H

[0043] Nur der Film wurde von einer der Oberflächen des Stahlblechs durch einen CO₂-Impulslaser mit Güteschaltung verdampft. Hierbei handelte es sich um das Stahlblech, dessen Eisenverlust durch die laserinduzierte Spannung gesenkt war. Die Spitzenleistung betrug 0,1 MW/mm², und die Impulszeitdauer betrug 4 µs. Nur in diesem Stahlblech betrug der Abstand PC der Strichlinie in C-Richtung 0,5 mm, und der fokussierte und abgestrahlte Strahl war ein kreisförmiger Strahl mit einem Durchmesser von 0,40 mm. Im übrigen wurde dieses Stahlblech keinem Entspannungsglühen unterzogen.

[0044] Die Vergleichsergebnisse der magnetischen Eigenschaften der Stahlbleche A bis G verdeutlichen, daß die erfindungsgemäß kornorientierten Elektrostahlbleche mit den Wärmeeinflußschichten oder den Nuten und Wärmeeinflußschichten auf beiden Oberflächen des Stahlblechs einen Rückgang des Eisenverlusts zeigten, der gleich oder größer als der des herkömmlichen kornorientierten Elektrostahlblechs mit ähnlichen Nuten auf nur einer seiner Oberflächen war. Verglich man anders gesagt die Summe der Nutentiefen auf beiden Oberflächen, konnten die erfindungsgemäß kornorientierten Elektrostahlbleche für einen den Eisenverlust reduzierenden Effekt, der gleich oder höher als der Effekt der bekannten Technik war, durch die flacheren Nuten als die Nuten des Stahlblechs der bekannten Technik sorgen, das die Nuten nur auf einer seiner Oberflächen hat. Festgestellt wurde, daß in einem Extremfall die Bildung der Nuten nahezu unnötig war.

[0045] Daraus ging hervor, daß das erfindungsgemäß kornorientierte Elektrostahlblech mit den Wärmeeinflußschichten oder den Nuten und Wärmeeinflußschichten auf seinen beiden Oberflächen nicht nur eine Abwandlung des herkömmlichen kornorientierten Elektrostahlblechs, bei dem die Nuten auf einer seiner Oberflächen gebildet sind, um den Eisenverlust zu verbessern, oder des herkömmlichen kornorientierten Elektrostahlblechs war, das nicht den Widerstand dagegen, durch Glühen zu verschwindenden hat, wenngleich den Oberflächen die Spannung durch den Laser verliehen war, um den Eisenverlust zu reduzieren.

[0046] Der Eisenverlust des Stahlblechs H (Produkt des Stands der Technik), der durch Erzeugung der Spannung durch die Verdampfungsreaktion des Films infolge der Laserbestrahlung gesenkt war, war auf einen Wert nahe der Grenze reduziert, die durch den Grad der Kristallorientierung bestimmt war. Im Gegensatz dazu konnte das kornorientierte Elektrostahlblech mit den Wärmeinflußschichten oder den Nuten und Wärmeinflußschichten auf seinen beiden Oberflächen für einen Eisenverlustwert sorgen, der zum erstgenannten äquivalent war. Beim Vergleich der Verringerungsbeträge des Eisenverlusts der Stähle A bis F wurde festgestellt, daß der Eisenverlustbetrag unabhängig von der Nutentiefe vom Zustand, in dem die Nut kaum vorhanden war, bis zum Zustand, in dem die Nutentiefe 30 µm betrug, im wesentlichen konstant blieb.

[0047] Beim Vergleich der Änderungsbeträge der magnetischen Flußdichte B8 wurde festgestellt, daß in den Stahlblechen C und E, in denen die Nuten mit einer Tiefe von höchstens 10 µm erfindungsgemäß gebildet waren, was höchstens 5 % der Blechdicke entsprach, der B8-Änderungsbetrag 30 Gauss nicht überstieg und die magnetische Flußdichte B8 kaum geändert war. Grund dafür war, daß die die magnetische Flußdichte behindernden Nuten extrem flach waren.

[0048] Daher konnte der Eisenverlustwert durch die Erfindung unabhängig von der Tiefe der Nuten, die in der Oberflächenschicht des Stahlblechs gebildet waren, stabil gesenkt werden. Anders ausgedrückt konnten kornorientierte Elektrostahlbleche erhalten werden, die nahezu frei vom Rückgang der magnetischen Flußdichte waren, indem die Nuten mit einer Tiefe von höchstens 5 % gebildet wurden.

[0049] Als nächstes wird der Effekt beschrieben, der sich ergibt, wenn die Wärmeinflußschichten oder die Nuten und Wärmeinflußschichten auf beiden Oberflächen des Stahlblechs an Positionen gebildet sind, die Paare bilden. Wie zuvor beschrieben, ist [Fig. 2\(a\)](#) eine erläuternde Ansicht der Abweichung g der Bildungspositionen der Nuten, die auf beiden Oberflächen des Stahlblechs durch das Laserverfahren gebildet sind, und der Breite WL dieser Nuten in Walzrichtung. [Fig. 2\(b\)](#) und [Fig. 2\(c\)](#) zeigen die Meßergebnisse der Oberflächenrauhigkeit der Stahlbleche nach Entspannungsglühen, d. h. des Ausdehnungsverformungsbetrags h. Ein Symbol X in diesen Zeichnungen stellt die Nutenpositionen dar. Aus den Zeichnungen wird deutlich, daß der Ausdehnungsverformungsbetrag h kaum vorhanden ist, wenn die Positionsabweichung g unter der Nutenbreite WL liegt ($h = 5 \mu\text{m}$, wenn $W (= 0,13 \text{ mm}) < g (= 0,30 \text{ mm})$ in [Fig. 2\(b\)](#)), wogegen $h \approx 0 \mu\text{m}$, wenn $W (= 0,13 \text{ mm}) > g (= 0,10 \text{ mm})$ in [Fig. 2\(c\)](#)). Grund dafür ist, daß die Verformung als Ergebnis der Kondensation des Grundmetalls im Schmelz- und Wiederverfestigungsverfahren auf beiden Oberflächen ausgeglichen und schließlich weitere Verformung eingeschränkt ist. Bei Herstellung eines Stapelkerns durch Stapeln solcher

Stahlbleche tritt keine Beeinträchtigung der Eisenverlusteigenschaften und der magnetischen Flußdichte als Ergebnis der Verformungsspannung auf die gleiche Weise wie beim Stapeln der Stahlbleche ohne Nuten auf.

[0050] In der Erfindung wird die Verformung auf der Oberfläche durch die Nutenbildung auf beiden Oberflächen des Stahlblechs korrigiert. Daher besteht die Möglichkeit, daß das Stahlblech eine lokale Dehnung erfährt. Man geht davon aus, daß diese lokale Spannung/Dehnung auch den Domänenverfeinerungseffekt zeigt.

[0051] Obwohl diese Ausführungsform den Fall erläutert, in dem die Strichliniennuten durch einen Impuls laser gebildet werden, läßt sich der gleiche Effekt natürlich auch durch eine kontinuierliche Nut erhalten.

Patentansprüche

1. Kornorientiertes Elektrostahlblech, dadurch gekennzeichnet, daß lineare oder strichlinienartige geschmolzene und wiederverfestigte Schichten, die durch Bestrahlung mit einem energiereichen Strahl gebildet sind, oder lineare oder strichlinienartige Nuten und geschmolzene und wiederverfestigte Schichten, die durch Bestrahlung mit einem energiereichen Strahl gebildet sind, auf beiden Oberflächen des Stahlblechs gebildet sind.

2. Kornorientiertes Elektrostahlblech nach Anspruch 1, wobei ähnliche lineare oder strichlinienartige geschmolzene und wiederverfestigte Schichten, die durch Bestrahlung mit einem energiereichen Strahl gebildet sind, oder ähnliche Nuten und geschmolzene und wiederverfestigte Schichten auf beiden Oberflächen des Stahlblechs an genau gleichen Positionen oder leicht abweichenden Positionen gebildet sind.

3. Kornorientiertes Elektrostahlblech nach Anspruch 2, wobei die Abweichung der Bildungspositionen der linearen oder strichlinienartigen geschmolzenen und wiederverfestigten Schichten, die durch Bestrahlung mit einem energiereichen Strahl gebildet sind, oder der linearen oder strichlinienartigen Nuten und geschmolzenen und wiederverfestigten Schichten, die durch Bestrahlung mit einem energiereichen Strahl gebildet sind, kleiner als die Breite der linearen oder strichlinienartigen geschmolzenen und wiederverfestigten Schichten, die durch Bestrahlung mit einem energiereichen Strahl gebildet sind, oder der linearen oder strichlinienartigen Nuten und geschmolzenen und wiederverfestigten Schichten, die durch Bestrahlung mit einem energiereichen Strahl gebildet sind, in Walzrichtung ist.

4. Kornorientiertes Elektrostahlblech nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei die Tiefe der linearen oder strichlinienartigen Nuten, die auf mindestens einer der Oberflächen des Stahlblechs gebildet sind, nicht größer als 5 % der Blechdicke ist.

5. Verfahren zur Herstellung eines kornorientierten Elektrostahlblechs, dadurch gekennzeichnet, daß ähnliche lineare oder strichlinienartige geschmolzene und wiederverfestigte Schichten, die durch Bestrahlung mit einem energiereichen Strahl gebildet sind, oder ähnliche lineare oder strichlinienartige Nuten und geschmolzene und wiederverfestigte Schichten, die durch Bestrahlung mit einem energiereichen Strahl gebildet sind, auf beiden Oberflächen des Stahlblechs durch Bestrahlen mit einem Strahl hoher Energiedichte gebildet werden.

6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei die geschmolzenen und wiederverfestigten Schichten oder die Nuten und geschmolzenen und wiederverfestigten Schichten auf beiden Oberflächen des Stahlblechs an genau gleichen Positionen oder leicht abweichenden Positionen gebildet werden.

7. Verfahren nach Anspruch 6, wobei die Abweichung der Bildungspositionen der linearen oder strichlinienartigen geschmolzenen und wiederverfestigten Schichten, die durch Bestrahlung mit einem energiereichen Strahl gebildet sind, oder der Nuten und der geschmolzenen und wiederverfestigten Schichten kleiner als die Breite der linearen oder strichlinienartigen geschmolzenen und wiederverfestigten Schichten, die durch Bestrahlung mit einem energiereichen Strahl gebildet sind, oder der Nuten und der geschmolzenen und wiederverfestigten Schichten in Walzrichtung ist.

8. Verfahren zur Herstellung eines kornorientierten Elektrostahlblechs nach einem der Ansprüche 5 bis 7, wobei ähnliche lineare oder strichlinienartige Nuten mit einer Nutentiefe, die nicht größer als 5 % der Blechdicke ist, auf beiden oder einer der Oberflächen des Stahlblechs gebildet werden.

9. Verfahren zur Herstellung eines kornorientierten Elektrostahlblechs nach einem der Ansprüche 5 bis 8,

DE 699 23 134 T2 2005.12.29

wobei ein Laser verwendet wird, um den Strahl hoher Energiedichte zu erzeugen.

Es folgen 3 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1(a)

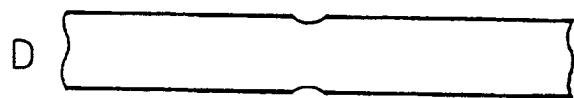
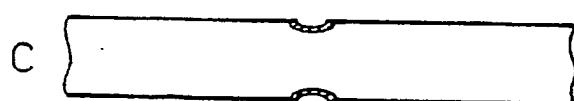
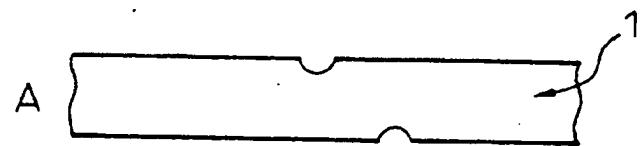


Fig. 1(b)

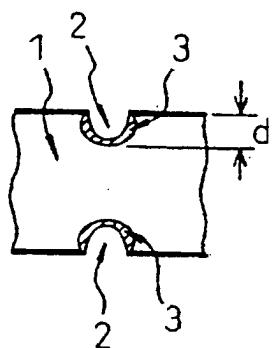


Fig.2(a)

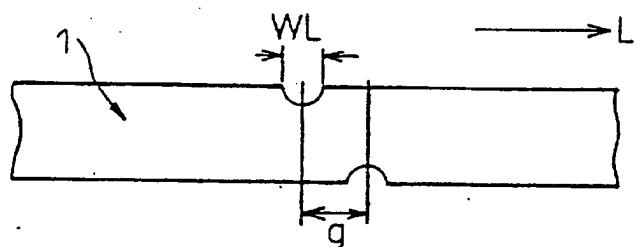


Fig.2(b)

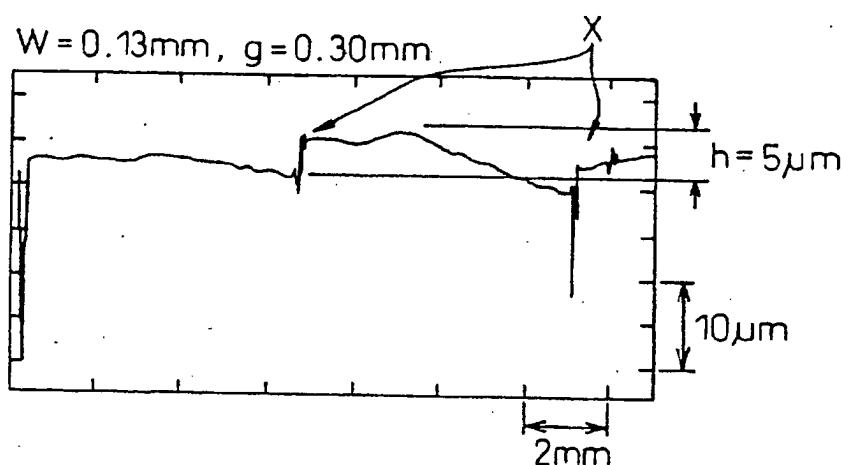


Fig.2(c)

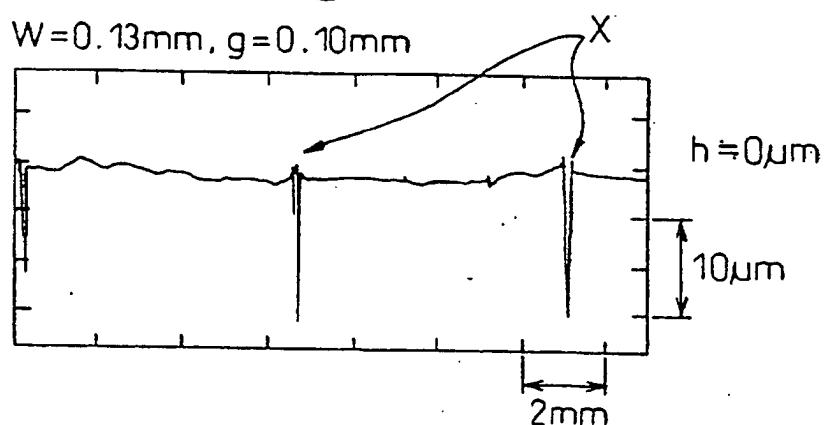


Fig.3(a)

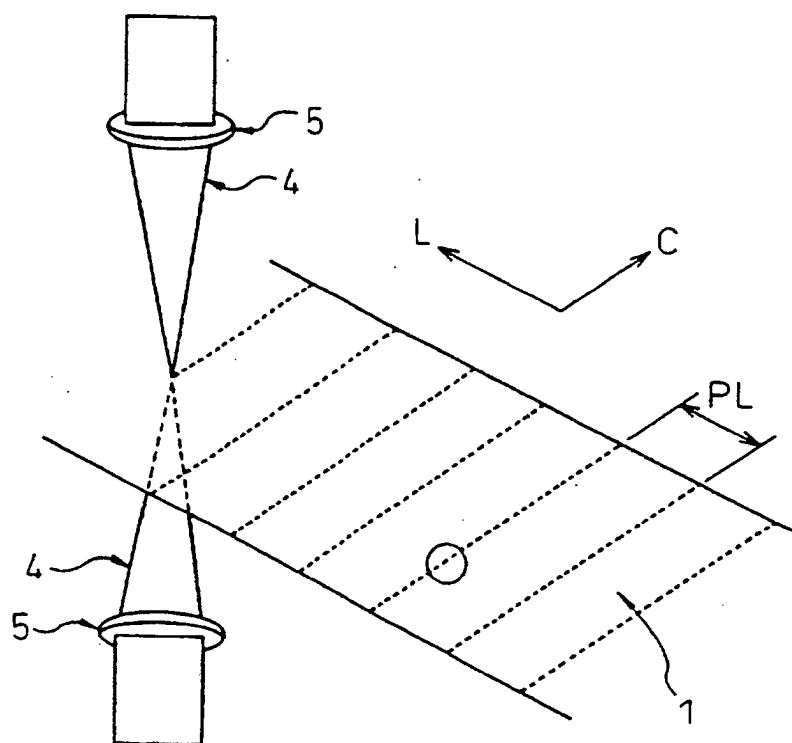


Fig.3(b)

