



República Federativa do Brasil
Ministério da Indústria, Comércio Exterior
e Serviços
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(11) PI 0820742-9 B1

(22) Data do Depósito: 11/12/2008

(45) Data de Concessão: 06/02/2018



(54) Título: MÉTODO PARA FABRICAR UMA CHAPA DE AÇO ELETROMAGNÉTICO DE GRÃO ORIENTADO CUJOS DOMÍNIOS MAGNÉTICOS SÃO CONTROLADOS POR IRRADIAÇÃO DE FEIXE DE LASER

(51) Int.Cl.: C21D 8/12; B23K 26/00; H01F 1/16

(30) Prioridade Unionista: 12/12/2007 JP 2007-320615

(73) Titular(es): NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL CORPORATION

(72) Inventor(es): TATSUHIKO SAKAI; HIDEYUKI HAMAMURA; MASAO YABUMOTO

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para **"MÉTODO PARA FABRICAR UMA CHAPA DE AÇO ELETROMAGNÉTICO DE GRÃO ORIENTADO CUJOS DOMÍNIOS MAGNÉTICOS SÃO CONTROLADOS POR IRRADIAÇÃO DE FEIXE DE LASER"**.

CAMPO DA TÉCNICA

[001] A presente invenção refere-se a um método para fabricar uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado cujos domínios magnéticos são controlados por irradiação de feixe de laser e a qual está adequada para um transformador.

ANTECEDENTES DA TÉCNICA

[002] Uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado contém eixos geométricos de fácil magnetização orientados em uma direção de laminação (daqui em diante também denominada direção L) em um processo de fabricação e tem perdas de ferro notavelmente baixas na direção L. Na fabricação da chapa de aço eletromagnético de grão orientado, quando a chapa de aço é irradiada com um feixe de laser na direção substancialmente perpendicular à direção L, as perdas de ferro na direção L são adicionalmente reduzidas. A chapa de aço eletromagnético de grão orientado é utilizada principalmente como um material para um núcleo de ferro de um transformador de grande tamanho, o qual tem requisitos severos para as perdas de ferro.

[003] A figura 8 é um diagrama esquemático que ilustra um método convencional para irradiar uma superfície de uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado com um feixe de laser. A figura 5A é um diagrama esquemático que ilustra um método para fabricar um núcleo de ferro de um transformador comum e a figura 5B é um diagrama esquemático que ilustra o núcleo de ferro.

[004] Como ilustrado na figura 8, na fabricação de uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado, cujos domínios magnéticos são controlados por irradiação de feixe de laser, a chapa de aço ele-

tromagnético de grão orientado 12 é irradiada com um feixe de laser enquanto uma varredura por feixe de laser está sendo executada a uma velocidade de V_c substancialmente paralela à direção de largura de placa (daqui em diante referida como direção C). A direção C é ortogonal à direção L. Além disso, a chapa de aço eletromagnético de grão orientado 12 é transportada a uma velocidade de V_L na direção L. Assim, uma pluralidade de porções de irradiação de feixe de laser 17 que se estende substancialmente paralela à direção C alinha-se a intervalos constantes de PL. Na fabricação de um núcleo de ferro 4 de um transformador, como ilustrado nas figuras 5A e 5B, a chapa de aço eletromagnético de grão orientado é cisalhada de modo que uma direção de magnetização M de um elemento de núcleo de ferro 3 que constitui o núcleo de ferro 4 e a direção L encontram-se, e os elementos de núcleo de ferro 3 obtidos pelo cisalhamento são sobrepostos.

[005] No núcleo de ferro 4 fabricado deste modo, a direção L e a direção de magnetização M encontram-se na maioria das suas porções. Consequentemente, as perdas de ferro do núcleo de ferro 4 estão em uma proporção aproximada com as perdas de ferro de direção L da chapa de aço eletromagnético de grão orientado de uma matéria-prima.

[006] Por outro lado, em porções de junção 5 entre os elementos de núcleo de ferro 3 do núcleo de ferro 4, a direção L e a direção de magnetização M se deslocam uma da outra. Consequentemente, as perdas de ferro das porções de junção 5 são diferentes das perdas de ferro de direção L da chapa de aço eletromagnético de grão orientado de um material bruto e são afetadas pelas perdas de ferro na direção C. Assim uma região 6 que tem altas perdas de ferro existe. Especificamente, no núcleo de ferro que utiliza a chapa de aço eletromagnético de grão orientado cujas perdas de ferro de direção L são significativamente reduzidas por irradiação de feixe de laser, um efeito das per-

das de ferro de direção C torna-se relativamente maior.

[007] Os transformadores são utilizados em um grande número de posições de equipamentos de transmissão de energia de uma usina de energia para as localizações de consumo de energia. Consequentemente, quando a perda de ferro por transformador muda mesmo em aproximadamente 1%, a perda de transmissão de energia muda significativamente em todo o equipamento de transmissão de energia. Consequentemente, é fortemente demandado um método para fabricar uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado capaz de reduzir as perdas de ferro de direção C enquanto as perdas de ferro de direção L estão sendo restringidas para serem baixadas por irradiação de feixe de laser.

[008] No entanto, um mecanismo para aperfeiçoar as perdas de ferro de direção C não foi esclarecido nem um método para reduzir as perdas de ferro nas duas direções de direção L e direção C foi estabelecido até agora.

[009] Em um método convencional para aperfeiçoar as perdas de ferro de uma chapa de aço magnético, um objetivo principal é reduzir as perdas de ferro de direção L. Por exemplo, o Documento de Patente 5 descreve um método para fabricar uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado a qual é irradiada com um feixe de laser definindo um modo de feixe de laser, um diâmetro de condensação de luz, potência, uma velocidade de varredura de feixe de laser, um passo de irradiação e similares. No entanto, não há descrição de perdas de ferro de direção C.

[0010] Além disso, um método no qual uma atenção está focalizada no aperfeiçoamento das perdas de ferro na direção C foi também proposto.

[0011] O Documento de Patente 1 descreve um método para irradiar um feixe de laser em paralelo a uma direção L. No entanto, este

método reduz as perdas de ferro na direção C, mas não reduz as perdas de ferro na direção L. Como um efeito das perdas de ferro de direção L é maior como acima descrito, a perda de ferro de um transformador torna-se maior que aquela da chapa de aço eletromagnético de grão orientado com perdas de ferro aperfeiçoadas na direção L pela irradiação de um feixe de laser perpendicular à direção L.

[0012] O Documento de Patente 2 descreve um método para irradiar um feixe de laser em paralelo a duas direções de direção L e direção C. No entanto, este método, que irradia um feixe de laser duas vezes, complica um processo de fabricação e diminui a eficiência de produção por pelo menos a metade.

[0013] Os Documentos de Patente 3 e 4 descrevem um método para irradiar um feixe de laser enquanto uma direção de irradiação e uma condição de irradiação estão sendo mudadas para cada elemento cortado após uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado não sujeita à irradiação de feixe de laser ser cisalhada em uma forma desejada, na fabricação de um núcleo de ferro. No entanto, em um núcleo de ferro fabricado de acordo com este método, uma porção na qual somente as perdas de ferro na direção L são aperfeiçoadas e uma porção, na qual somente as perdas de ferro na direção C são aperfeiçoadas, é misturada, portanto não pode ser dito que perdas de ferro significativamente boas são obtidas. Além disso, para aperfeiçoar as perdas de ferro em duas direções da direção L e da direção C, é necessário mudar as condições e irradiar um feixe de laser duas vezes. Ainda, existe um problema de uma produtividade muito baixa porque a chapa de aço eletromagnético de grão orientado é irradiada com um feixe de laser para cada elemento após a chapa de aço eletromagnético de grão orientado ser cisalhada.

[0014] Documento de Patente 1: Publicação de Patente Japonesa Aberta à Inspeção Pública Número 56-51522

[0015] Documento de Patente 2: Publicação de Patente Japonesa Aberta à Inspeção Pública Número 56-105454

[0016] Documento de Patente 3: Publicação de Patente Japonesa Aberta à Inspeção Pública Número 56-83012

[0017] Documento de Patente 4: Publicação de Patente Japonesa Aberta à Inspeção Pública Número 56-105426

[0018] Documento de Patente 5: Panfleto de Publicação Internacional Número WO 04/083465

SUMÁRIO DA INVENÇÃO

[0019] É um objetivo da presente invenção prover um método para fabricar uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado cujos domínios magnéticos são controlados por irradiação de feixe de laser, capaz de reduzir as perdas de ferro em ambas as direções da direção L e da direção C enquanto assegurando facilmente uma alta produtividade.

[0020] De acordo com a presente invenção, está provido um método para fabricar uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado cujos domínios magnéticos são controlados por irradiação de feixe de laser, que inclui a etapa de: irradiar repetidamente uma superfície de uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado com um feixe de laser de onda contínua condensado pela varredura da chapa de aço eletromagnético de grão orientado de uma direção de laminação para uma sua direção de inclinação enquanto as porções de varredura do feixe de laser de onda contínua estão sendo deslocadas a intervalos, em que quando uma densidade de energia de irradiação média U_a é definida como $U_a = P / V_c / PL$ (mJ / mm^2), onde P (W) é a potência média do feixe de laser de onda contínua, V_c (mm/s) é uma velocidade da varredura, e PL (mm) é cada um dos intervalos, as seguintes relações são satisfeitas:

$$1,0 \text{ mm} \leq PL \leq 3,0 \text{ mm}$$

$$0,8 \text{ mJ} / \text{mm}^2 \leq U_a \leq 2,0 \text{ mJ} / \text{mm}^2.$$

[0021] É preferível satisfazer as seguintes relações quando uma densidade de potência de irradiação I_p do feixe de laser de onda contínua é definida como $I_p = (4 / \pi) \times P / (d_L \times d_c)$ (kW / mm^2), onde d_c (mm) é um diâmetro do feixe de laser de onda contínua na direção de varredura, e d_L (mm) é um diâmetro do feixe de laser de onda contínua em uma direção ortogonal à direção de varredura:

$$(88-15 \times PL) \text{ kW} / \text{mm}^2 \geq I_p \geq (6,5-1,5 \times PL) \text{ kW} / \text{mm}^2$$

$$1,0 \text{ mm} \leq PL \leq 4,0 \text{ mm}.$$

BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

[0022] A figura 1 é um gráfico que ilustra uma relação entre os passos de irradiação PL, e as perdas de ferro de direção L WL e as perdas de ferro de direção C WC;

a figura 2 é um diagrama que ilustra uma faixa preferível de passos de irradiação PL e densidades de potência de condensação de luz I_p ;

a figura 3 é um gráfico que ilustra uma relação entre as densidades de potência de condensação de luz I_p e as perdas de ferro de direção L WL;

a figura 4 é um gráfico que ilustra uma relação entre as densidades de energia médias U_a , e as perdas de ferro de direção L WL e as perdas de ferro de direção C WC;

a figura 5A é um diagrama esquemático que ilustra um método comum para fabricar um núcleo de ferro de um transformador;

a figura 5B é um diagrama esquemático que ilustra um núcleo de ferro;

a figura 6 é um diagrama esquemático que ilustra um método para irradiar uma superfície de uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado com um feixe de laser de acordo com uma modalidade da presente invenção;

a figura 7A é um diagrama esquemático que ilustra uma estrutura de domínio magnético de uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado antes da irradiação de feixe de laser;

a figura 7B é um diagrama esquemático que ilustra uma estrutura de domínio magnético de uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado após a irradiação de feixe de laser; e

a figura 8 é um diagrama esquemático que ilustra um método convencional para irradiar uma superfície de uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado com um feixe de laser.

DESCRIÇÃO DETALHADA DAS MODALIDADES PREFERIDAS

[0023] Primeiramente, um princípio no qual as perdas de ferro de uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado são aperfeiçoadas por irradiação de feixe de laser será descrito com referência às figuras 7A e 7B. A figura 7A é um diagrama esquemático que ilustra uma estrutura de domínio magnético de uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado antes da irradiação de feixe de laser. A figura 7B é um diagrama esquemático que ilustra uma estrutura de domínio magnético de uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado após a irradiação de feixe de laser. Em uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado, um domínio magnético 9 referido como um domínio magnético de 180° está formado em paralelo a uma direção L. O domínio magnético 9 está esquematicamente ilustrado como uma porção colorida de preto e uma porção colorida de branco nas figuras 7A e 7B. Na porção colorida de preto e na porção colorida de branco, as suas direções de magnetização estão invertidas uma com a outra.

[0024] Uma porção de limite entre os domínios magnéticos, cujas direções de magnetização estão invertidas, é referida como uma parede magnética. Isto quer dizer, nas figuras 7A e 7B, uma parede magnética 10 existe na porção de limite entre a porção colorida de preto e a porção colorida de branco. O domínio magnético de 180° é fácil de

magnetizar com um campo magnético de direção L, e difícil de magnetizar com um campo magnético de direção C. Assim, as perdas de ferro de direção L WL dos domínios magnéticos de 180° são menores do que as perdas de ferro de direção C WC. Além disso, as perdas de ferro de direção L WL estão classificadas em perdas de corrente parasita clássicas, perdas de corrente parasita anormais e perdas de histerese. É conhecido que as perdas de corrente parasita anormais, acima de tudo, diminuem mais conforme o intervalo L_m de uma parede magnética entre os domínios magnéticos de 180° (parede magnética de 180°) seja menor.

[0025] Quando a chapa de aço eletromagnético de grão orientado é irradiada com um feixe de laser, uma distorção local ocorre em uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado devido a uma influência de aquecimento e resfriamento rápido local por um feixe de laser e uma reação gerada quando um revestimento sobre uma superfície da chapa de aço eletromagnético de grão orientado evapora. Além disso, domínios de fechamento 8 ocorrem diretamente sob a distorção. Nos domínios de fechamento 8, uma grande quantidade de domínios magnéticos finos existe e a energia magnética estática está em um estado alto.

[0026] Consequentemente, para liberar a energia total da chapa de aço eletromagnético de grão orientado, os domínios magnéticos de 180° aumentam em número e um seu intervalo L_m torna-se estreito, como ilustrado na figura 7B. Assim, as perdas de corrente parasita anormais diminuem em número. Tal operação permite que as perdas de ferro de direção L WL diminuam em número por irradiação de feixe de laser.

[0027] As perdas de histerese aumentam com um aumento na distorção da chapa de aço eletromagnético de grão orientado. Quando a irradiação de feixe de laser é executada excessivamente, mais perdas

de histerese ocorrem do que uma diminuição na perda de corrente parasita anormal, assim as perdas de ferro de direção L WL totais aumentam em número. Além disso, quando a irradiação de feixe de laser é executada excessivamente, uma distorção excessiva ocorre, uma característica magnetoestrutiva de uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado diminui, assim a geração de ruído do transformador aumenta.

[0028] Ainda, as perdas de corrente parasita clássica são perdas de ferro, as quais são em proporção à espessura de uma chapa de aço e as quais não fazem nenhuma mudança antes e após a irradiação de feixe de laser.

[0029] Por outro lado, os domínios de fechamento 8 gerados pela irradiação de feixe de laser são domínios magnéticos fáceis de magnetizar na direção C. Assim, é estimado que as perdas de ferro de direção C WC diminuam com a geração dos domínios de fechamento 8.

[0030] A seguir, um método de fabricação de acordo com uma modalidade da presente invenção será descrito.

[0031] A figura 6 é um diagrama esquemático que ilustra um método para irradiar uma superfície de uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado com um feixe de laser de acordo com uma modalidade da presente invenção. Uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado 2 não irradiada com um feixe de laser, que serve como uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado, está sujeita a um recozimento de acabamento, um recozimento de planificação e um revestimento de isolamento de superfície. Assim, sobre uma superfície da chapa de aço eletromagnético de grão orientado 2, por exemplo, um revestimento de vidro e um revestimento de isolamento formados pelo recozimento existem.

[0032] Um feixe de laser de onda contínua emitido de um laser é refletido sobre um espelho de varredura (não ilustrado) e, após uma

condensação de luz ser executada por uma lente de condensação de luz f0 (não ilustrada), é aplicado na placa de aço 2, enquanto uma varredura de feixe de laser está sendo executada sobre a placa de aço 2 a uma velocidade de Vc substancialmente paralela à direção C (direção perpendicular à direção L). Como um resultado, os domínios de fechamento ocorrem diretamente sob uma porção de irradiação de feixe de laser 7 com uma distorção causada por um feixe de laser como um seu ponto de partida.

[0033] A chapa de aço 2 é transportada a uma velocidade constante de VL na direção L sobre uma linha de fabricação contínua. Consequentemente, um intervalo PL de irradiação de feixe de laser é constante e é ajustado pela velocidade VL e por uma frequência de varredura de direção C, por exemplo. Uma forma de um feixe de condensação de luz sobre uma superfície da chapa de aço 2 é circular ou elíptica. A frequência de varredura de direção C refere-se a uma frequência de varredura de lasers na direção C por segundo.

[0034] Os inventores da presente invenção investigaram um efeito de provisão de distorção por irradiação de feixe de laser. Isto quer dizer, os inventores investigaram uma relação entre as densidades de energia de irradiação médias Ua sobre toda a chapa de aço, e as perdas de ferro de direção L WL e as perdas de ferro de direção C WC. A densidade de energia média, tomada como Ua, é definida na equação (1) seguinte: onde P é a potência de feixe de laser, Vc é uma velocidade de varredura e PL é um intervalo.

$$U_a = P / (V_c \times PL) \text{ (mJ / mm}^2\text{)} \dots \quad (1)$$

[0035] A figura 4 é um gráfico que ilustra uma relação entre as densidades de energia médias Ua, e as perdas de ferro de direção L WL e as perdas de ferro de direção C WC. O intervalo PL era de 4 mm, o diâmetro dL do feixe de condensação de luz na direção L era de 0,1 mm, o diâmetro dc do feixe de condensação de luz na direção C

era de 0,2 mm, a velocidade de varredura V_c era de 32 m/s e a velocidade de transporte V_L era de 1 m/s. Além disso, a densidade de energia média U_a foi mudada ajustando a potência P . As perdas de ferro de direção L WL ilustradas sobre um eixo geométrico vertical da figura 4 são valores de perda de ferro quando um campo alternado de 50 Hz era aplicado a uma densidade de fluxo magnético máxima de 1,7 T na direção L, e as perdas de ferro de direção C WC são valores de perda de ferro quando um campo alternado de 50 Hz era aplicado a uma densidade de fluxo magnético máxima de 0,5 T na direção C.

[0036] Aqui, a razão por que uma densidade de fluxo magnético é diminuída na avaliação da perda de ferro de direção C é que um componente de direção C de força de campo magnético na junção do núcleo de ferro do transformador foi estimado como aproximadamente 1/3 tão grande quanto o componente de direção L.

[0037] O resultado ilustrado na figura 4 indica que a densidade de energia média U_a tinha uma faixa, na qual a perda de ferro de direção L WL pode ser tornada em um valor mínimo ou um seu valor aproximado e a perda de ferro de direção C WC diminui quase monotonicamente com um aumento na densidade de energia média U_a . Mais ainda, do resultado ilustrado na figura 4, para diminuir tanto a perda de ferro de direção L WL quanto a perda de ferro de direção C WC, de preferência, a densidade de energia média U_a é $0,8 \text{ mJ} / \text{mm}^2 \leq U_a \leq 2,0 \text{ mJ} / \text{mm}^2$ e mais de preferência, $1,1 \text{ mJ} / \text{mm}^2 \leq U_a \leq 1,7 \text{ mJ} / \text{mm}^2$.

[0038] É concebível que uma das razões pela qual o resultado como ilustrado na figura 7 foi obtido é que quando a densidade de energia média U_a era baixa, o número de domínios de fechamento era baixo e o intervalo entre as paredes magnéticas de 180° era difícil de reduzir, assim tornando difícil diminuir a perda de corrente parasita anormal. É concebível que outra razão é que quando a densidade de

energia média U_a era alta, as perdas de corrente parasita anormais diminuíram; no entanto, as perdas de histerese aumentaram quando do carregamento excessivo de energia de feixe de laser.

[0039] É concebível que quando a densidade de energia média U_a é alta, as perdas de ferro do núcleo de ferro são aperfeiçoadas a um certo grau, enquanto as perdas de ferro de direção L WL estão sendo sacrificadas a um certo grau porque as perdas de ferro de direção C WC diminuem monotonicamente. No entanto, a característica eletromagnética degrada, de modo que a geração de ruído do transformador aumenta. Ainda, torna-se necessário aumentar a potência de feixe de laser e a quantidade de lasers requerida para a fabricação.

[0040] Na presente invenção, a densidade de energia média U_a está limitada a uma faixa R_a de $,8 \text{ mJ} / \text{mm}^2 \leq U_a \leq 2,0 \text{ mJ} / \text{mm}^2$ e as perdas de ferro de direção C WC são reduzidas enquanto que as perdas de ferro de direção L WL são mantidas a um valor aproximado ao valor mínimo.

[0041] Os inventores da presente invenção fizeram uma hipótese de que a perda de ferro de direção C WC pode diminuir adicionalmente gerando os domínios de fechamento tão próximos quanto possível sobre toda a superfície da chapa de aço porque as perdas de ferro de direção C WC diminuem devido à geração de domínios de fechamento. Isto quer dizer, os inventores imaginaram que as perdas de ferro de direção C WC diminuem pela redução do passo de irradiação (o intervalo entre as porções de irradiação de feixe de laser) PL. No entanto, quanto o passo de irradiação PL é simplesmente diminuído, a densidade de energia média U_a aumenta da equação (1), e as perdas de ferro de direção L WL aumentam. Consequentemente, os inventores estudaram que com a densidade de energia média U_a fixa dentro da faixa R_a , o passo de irradiação PL é diminuído e a velocidade de varredura V_c é aumentada.

[0042] A figura 1 é um gráfico que ilustra uma relação entre os passos de irradiação PL, e as perdas de ferro de direção L WL e as perdas de ferro de direção C WC. Com a densidade de energia média U_a tomada como $1,3 \text{ mJ} / \text{mm}^2$, a potência P foi tomada como 200 W, o diâmetro d_L foi tomado como 0,1 mm e o diâmetro d_c foi tomado como 0,2 mm. Ainda, o passo de irradiação PL foi mudado em uma proporção inversa pelo ajuste de uma velocidade de varredura V_c .

[0043] O resultado ilustrado na figura 1 indica que as perdas de ferro de direção C WC diminuem significativamente pela redução do passo de irradiação PL mesmo se a densidade de energia média U_a for fixa. Além disso, as perdas de ferro de direção L WL aumentam ligeiramente com uma diminuição no passo de irradiação PL, enquanto que as perdas de ferro de direção L WL são baixas quando o passo de irradiação PL é de 1,0 mm ou mais. No entanto, quando o passo de irradiação PL é além de 3,0 mm, as perdas de ferro de direção C WC tornam-se excessivamente maiores; portanto, um limite do passo de irradiação PL é tomado como 3,0 mm. Do ponto de vista de aperfeiçoamento em uma característica magnética de direção C, de preferência, o passo de irradiação PL é menor do que 2,0 mm e mais de preferência, menor do que 1,5 mm.

[0044] Assim, quando o passo de irradiação PL está limitado a $1,0 \text{ mm} \leq \text{PL} \leq 3,0 \text{ mm}$ enquanto a densidade de energia média U_a está sendo acomodada dentro da faixa R_a , os efeitos de redução das perdas de ferro de direção L WL e das perdas de ferro de direção C WC são concorrentemente satisfeitos a um alto nível. Como a densidade de energia média U_a está acomodada dentro da faixa R_a , a energia de carregamento em toda a chapa de aço torna-se difícil de mudar, portanto, a degradação da característica eletromagnética pelo carregamento de energia excessiva pode ser impedida de ser degradada.

[0045] Além disso, os inventores estudaram um método para aper-

feixoar adicionalmente as perdas de ferro de direção L WL dentro de uma faixa Rb do passo de irradiação PL ($1,0 \text{ mm} \leq \text{PL} \leq 3,0 \text{ mm}$). É concebível que uma das razões pela qual as perdas de ferro de direção C WC diminuem seja uma distribuição uniforme de domínios de fechamento, como acima descrito. Para reduzir as perdas de ferro de direção L WL, de preferência, o intervalo entre as paredes magnéticas de 180° é reduzido. Os inventores imaginaram que a resistência de distorção por radiação unitária de feixe de laser é importante. É concebível que em um experimento cujo resultado está ilustrado na figura 1, a velocidade de varredura Vc foi aumentada em uma proporção inversa a uma diminuição no passo de irradiação PL; portanto, os efeitos de aquecimento rápido e de resfriamento rápido por radiação unitária degradaram e assim a resistência à distorção degradou.

[0046] Consequentemente, foi criado um método para aumentar a densidade de potência de condensação de luz além de um aumento na velocidade de varredura Vc. A densidade de potência de condensação de luz, tomada como Ip, foi definida em uma equação (2). Isto quer dizer, a densidade de potência de condensação de luz Ip é um valor obtido dividindo a potência P por uma área de seção transversal de feixe.

$$I_p = (4 / \pi) \times P / (d_L \times d_c) \text{ (W / mm}^2\text{)} \dots \quad (2)$$

[0047] A figura 3 é um gráfico que ilustra uma relação entre as densidades de potência de condensação de luz Ip e as perdas de ferro de direção L WL. A potência P foi fixada em 200 W e a densidade de energia média Ua foi fixada em $1,3 \text{ mJ / mm}^2$. Os passos de irradiação PL eram de 1 mm, 2 mm e 3 mm dentro da faixa Rb. Ainda, ajustando os diâmetros dL e dc nos respectivos passos de irradiação PL, a densidade de potência de condensação de luz Ip foi mudada.

[0048] O resultado ilustrado na figura 3 indica que existe uma faixa de uma densidade de potência de condensação de luz Ip que depende

do passo de irradiação PL. Como ilustrado na figura 3, as faixas A a C são faixas desejáveis da densidade de potência de condensação de luz I_p nos respectivos passos de irradiação PL. Estas faixas são definidas pelas equações (3) e (4). Estas faixas podem ser ilustradas como visto na figura 2.

$$88-15 \times PL \geq I_p \geq 6,5-1,5 \times PL \text{ (kW / mm}^2\text{)} \dots \quad (3)$$

$$1,0 \leq PL \leq 4,0 \text{ (mm)} \dots \quad (4)$$

[0049] Para atingir tal densidade de potência de condensação de luz I_p , de preferência, o diâmetro de feixe de condensação de luz dL é ajustado a 0,1 mm ou menos. Para ajustar o diâmetro de feixe de condensação de luz dL a 0,1 mm ou menos, é preferível utilizar um laser de fibra.

[0050] Como acima descrito, de acordo com a presente invenção, a densidade de energia média U_a , o passo de irradiação PL e a densidade de potência de condensação de luz I_p são definidos com base em uma nova descoberta de um mecanismo de redução das perdas de ferro de direção L WL e das perdas de ferro de direção C WC por irradiação de feixe de laser e, portanto, as perdas de ferro de direção L WL e as perdas de ferro de direção C WC podem ser reduzidas a um alto nível. Consequentemente, o núcleo de ferro do transformador fabricado utilizando a chapa de aço eletromagnético de grão orientado, cujos domínios magnéticos são controlados por irradiação de feixe de laser, e o qual é fabricado de acordo com tal método provê perdas de ferro mais baixas em comparação com uma convencional. A irradiação de feixe de laser na presente invenção pode ser utilizada em uma linha de fabricação contínua para uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado, portanto existe um mérito de alta produtividade.

EXEMPLO

[0051] A seguir, um exemplo que pertence ao escopo da presente invenção será descrito em comparação com um exemplo comparativo

fora do escopo da presente invenção.

[0052] Primeiro, uma chapa de aço eletromagnético de grão unidirecionalmente orientado foi preparada a qual contém Si: 3,1%, o restante feito de Fe e uma quantidade de traço de impurezas, e tem uma espessura de 0,23 mm. Subsequentemente, uma chapa de aço eletromagnético de grão unidirecionalmente orientado foi irradiada com um feixe de laser sob as condições ilustradas na Tabela 1.

Tabela 1

	Nº	P (W)	Vc (m/s)	PL (mm)	dL (mm)	dc (mm)	Ua (mJ/ mm ²)	Ip (kW /mm ²)
Exemplo	1	200	50	3	0,1	0,2	1,3	12,7
Exemplo	2	200	150	1	0,1	0,2	1,3	12,7
Exemplo	3	200	150	1	0,05	0,09	1,3	56,6
Exemplo Comparativo	4	200	30	5	0,1	0,2	1,3	12,7
Exemplo Comparativo	5	200	30	3	0,1	0,2	2,2	12,7
Exemplo Comparativo	6	200	100	3	0,1	0,2	0,7	12,7
Exemplo Comparativo	7	200	50	3	0,05	0,09	1,3	56,6
Exemplo Comparativo	8	200	50	3	0,2	1	1,3	1,3

[0053] Então, uma medição da respectiva chapa de aço eletromagnético de grão unidirecionalmente orientado obtida após a irradiação de feixe de laser foi feita sobre as perdas de ferro de direção L WL e as perdas de ferro de direção C WC. A Tabela 2 ilustra o seu resultado.

Tabela 2

	N ^o	WL (W / kg)	Wc (W / kg)
Exemplo	1	0,79	0,67
Exemplo	2	0,82	0,55
Exemplo	3	0,79	0,55
Exemplo Comparativo	4	0,79	0,85
Exemplo Comparativo	5	0,86	0,67
Exemplo Comparativo	6	0,84	0,86
Exemplo Comparativo	7	0,85	0,67
Exemplo Comparativo	8	0,89	0,86

[0054] Como ilustrado na Tabela 2, nos Exemplos N^o 1, N^o 2, e N^o 3, os quais pertencem ao escopo da presente invenção, boas perdas de ferro de direção C WC foram obtidas quase sem degradação das perdas de ferro de direção L WL em comparação com os Exemplos Comparativos N^o 1, N^o 5, N^o 6, N^o 7, e N^o 8, os quais estão fora do escopo da presente invenção.

APLICABILIDADE INDUSTRIAL

[0055] A presente invenção provê uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado, cujas perdas de ferro em ambas as direções da direção de laminação e da direção de largura de placa ortogonal à direção de laminação são adequadamente reduzidas e cujos domínios magnéticos são controlados por irradiação de feixe de laser. Assim, as perdas de ferro de um transformador fabricado utilizando tal chapa de aço eletromagnético de grão orientado podem ser reduzidas em comparação com um convencional. Ainda, a presente invenção, que permite a implementação em uma linha de fabricação contínua, provê uma alta produtividade também.

REIVINDICAÇÕES

1. Método para fabricar uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado cujos domínios magnéticos são controlados por irradiação de feixe de laser, caracterizado pelo fato de que compreende a etapa de:

irradiar repetidamente uma superfície de uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado com um feixe de laser de onda contínua condensado pela varredura da chapa de aço eletromagnético de grão orientado de uma direção de laminação para sua direção de inclinação enquanto as porções de varredura do feixe de laser de onda contínua estão sendo deslocadas a intervalos, em que

quando uma densidade de energia de irradiação média U_a é definida como $U_a = P / V_c / PL$ (mJ / mm²),

onde P (W) é a potência média do feixe de laser de onda contínua,

V_c (m/s) é uma velocidade da varredura, e

PL (mm) é cada um dos intervalos,

as seguintes relações são satisfeitas:

$$1,0 \text{ mm} \leq PL \leq 3,0 \text{ mm}$$

$$0,8 \text{ mJ} / \text{mm}^2 \leq U_a \leq 2,0 \text{ mJ} / \text{mm}^2.$$

2. Método para fabricar uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado cujos domínios magnéticos são controlados por irradiação de feixe de laser, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que

quando uma densidade de potência de irradiação I_p do feixe de laser de onda contínua é definida como $I_p = (4 / \pi) \times P / (dL \times d_c)$ (kW / mm²),

onde d_c (mm) é um diâmetro do feixe de laser de onda contínua em uma direção da varredura, e

dL (mm) é um diâmetro do feixe de laser de onda contínua

em uma direção ortogonal à direção da varredura,

as seguintes relações são satisfeitas.

$$(88-15 \times PL) \text{ kW} / \text{mm}^2 \geq I_p \geq (6,5-1,5 \times PL) \text{ kW} / \text{mm}^2$$

$$1,0 \text{ mm} \leq PL \leq 3,0 \text{ mm}.$$

3. Método para fabricar uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado cujos domínios magnéticos são controlados por irradiação de feixe de laser, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que uma forma do feixe de laser de onda contínua sobre uma superfície da chapa de aço eletromagnético de grão orientado é circular ou elíptica.

4. Método para fabricar uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado cujos domínios magnéticos são controlados por irradiação de feixe de laser, de acordo com a reivindicação 2, caracterizado pelo fato de que uma forma do feixe de laser de onda contínua sobre uma superfície da chapa de aço eletromagnético de grão orientado é circular ou elíptica.

5. Método para fabricar uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado cujos domínios magnéticos são controlados por irradiação de feixe de laser, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a direção da varredura é ortogonal à direção de laminação da chapa de aço eletromagnético de grão orientado.

6. Método para fabricar uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado cujos domínios magnéticos são controlados por irradiação de feixe de laser, de acordo com a reivindicação 2, caracterizado pelo fato de que a direção da varredura é ortogonal à direção de laminação da chapa de aço eletromagnético de grão orientado.

7. Método para fabricar uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado cujos domínios magnéticos são controlados por irradiação de feixe de laser, de acordo com a reivindicação 3, caracterizado pelo fato de que a direção da varredura é ortogonal à direção de

laminação da chapa de aço eletromagnético de grão orientado.

8. Método para fabricar uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado cujos domínios magnéticos são controlados por irradiação de feixe de laser, de acordo com a reivindicação 4, caracterizado pelo fato de que a direção da varredura é ortogonal à direção de laminação da chapa de aço eletromagnético de grão orientado.

9. Método para fabricar uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado cujos domínios magnéticos são controlados por irradiação de feixe de laser, o qual reduz as perdas de ferro por varredura e irradiação de uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado com um feixe de laser de onda contínua condensando em uma forma circular ou elíptica a intervalos constantes em uma direção perpendicular a uma direção de laminação da chapa de aço eletromagnético de grão orientado, caracterizado pelo fato de que

quando uma densidade de energia de irradiação média U_a é definida como $U_a = P / V_c / PL$ (mJ / mm^2),

onde P (W) é a potência média do feixe de laser,

V_c (m/s) é uma velocidade de varredura de feixe, e

PL (mm) é um intervalo de irradiação em uma direção de laminação,

as seguintes relações são satisfeitas:

$$1,0 \text{ mm} \leq PL \leq 3,0 \text{ mm}$$

$$0,8 \text{ mJ} / \text{mm}^2 \leq U_a \leq 2,0 \text{ mJ} / \text{mm}^2.$$

10. Método para fabricar uma chapa de aço eletromagnético de grão orientado cujos domínios magnéticos são controlados por irradiação de feixe de laser, de acordo com a reivindicação 9, caracterizado pelo fato de que

quando uma densidade de potência de irradiação I_p é definida como $I_p = (4 / \pi) \times P / (d_L \times d_c)$ (kW / mm^2),

onde d_c (mm) é um diâmetro de condensação de luz em

uma direção de varredura de feixe, e

dL (mm) é um diâmetro de feixe de condensação de luz em uma direção ortogonal à direção de varredura,

as seguintes relações são satisfeitas.

$$(88-15 \times PL) \text{ kW} / \text{mm}^2 \geq I_p \geq (6,5-1,5 \times PL) \text{ kW} / \text{mm}^2$$

$$1,0 \text{ mm} \leq PL \leq 3,0 \text{ mm}.$$

FIG. 1

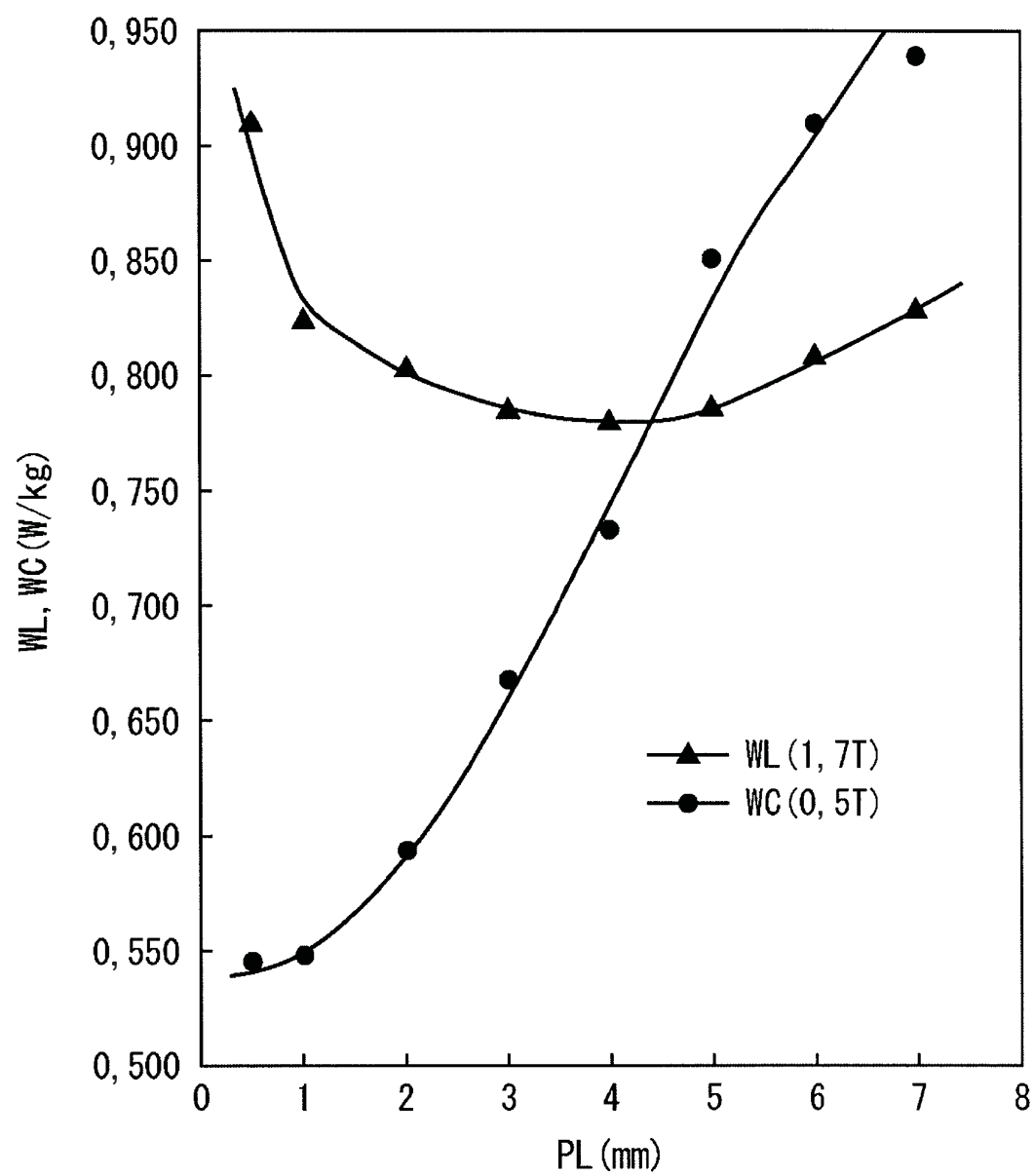


FIG. 2

$$88 - 15 \times PL \geq I_p \geq 6,5 - 1,5 \times PL$$
$$1 \leq PL \leq 3$$

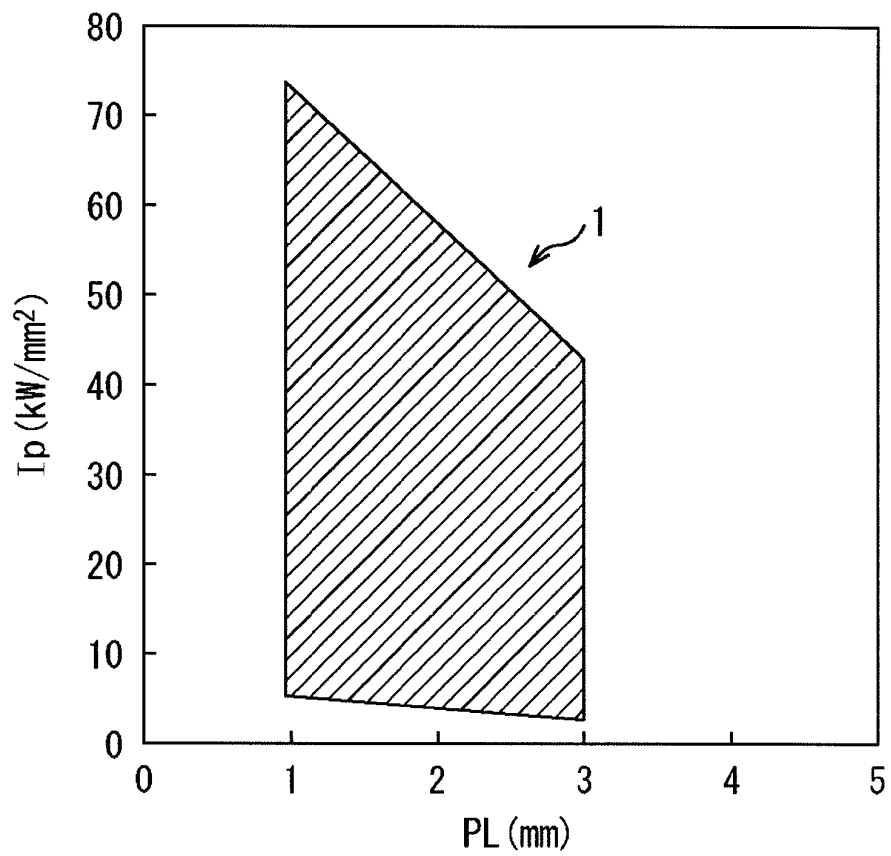


FIG. 3

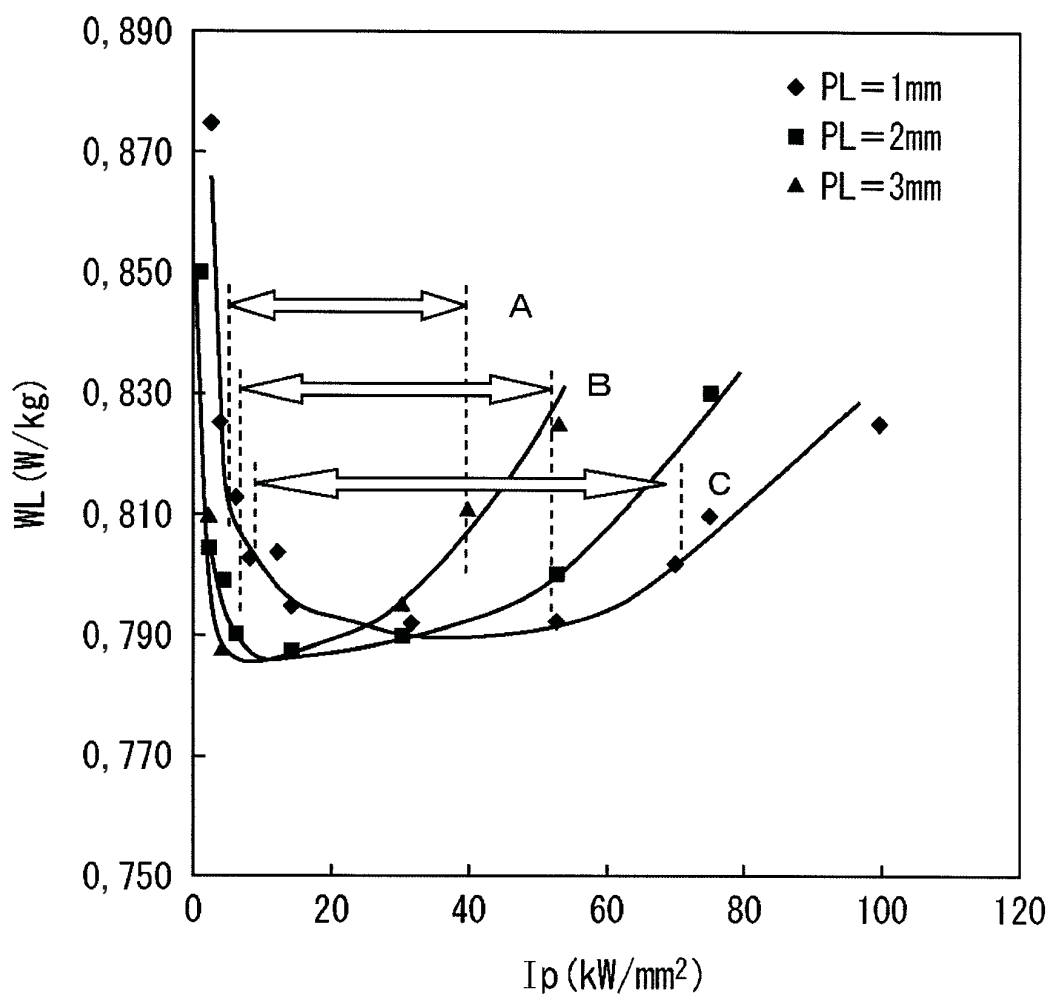


FIG. 4

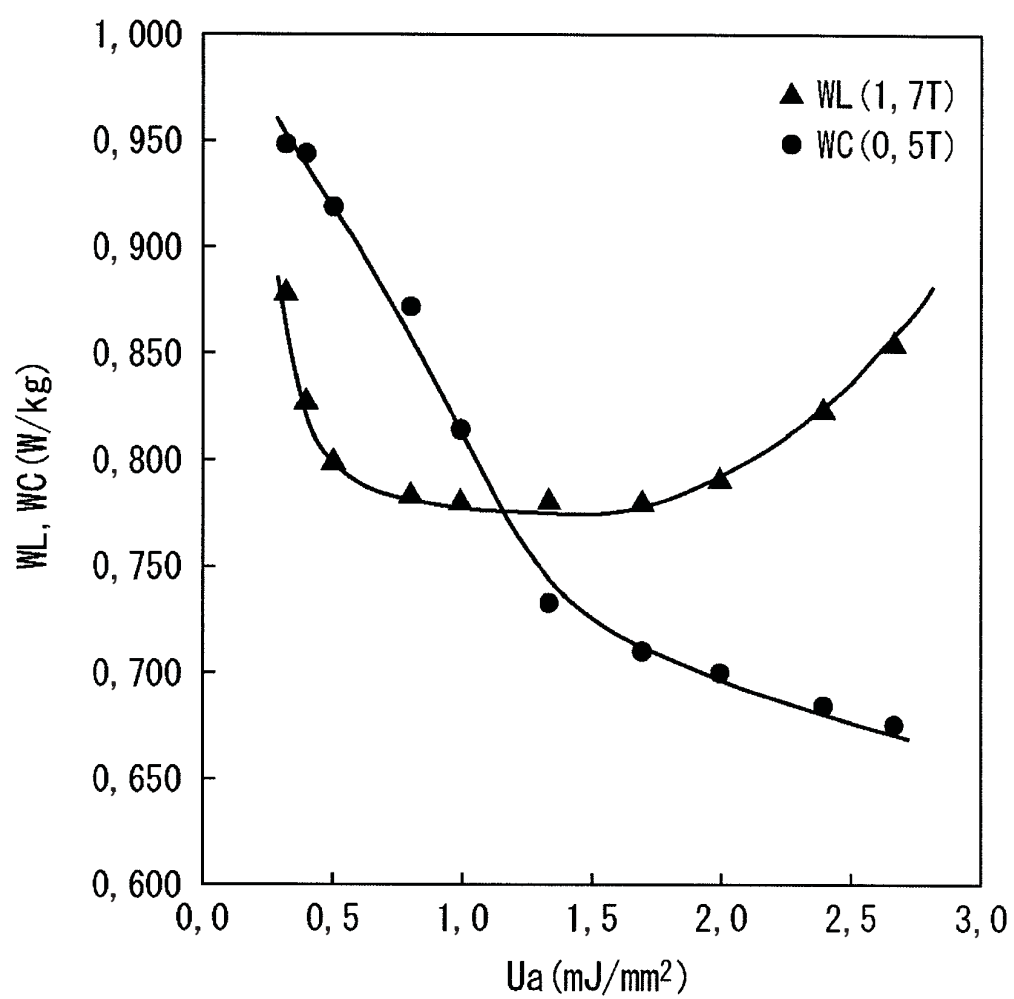


FIG. 5A

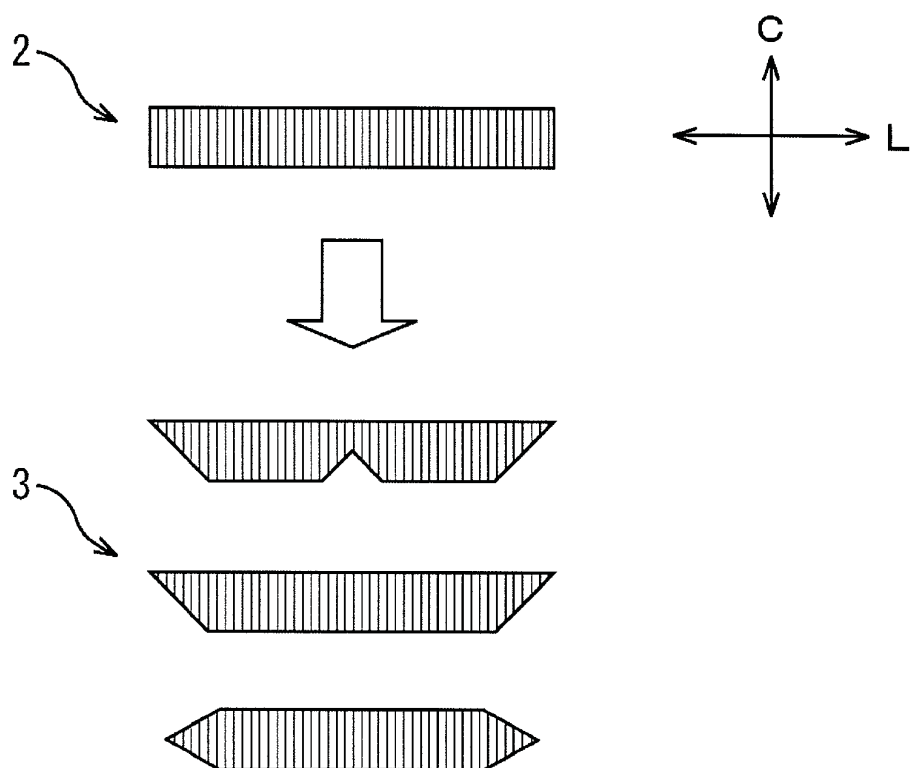


FIG. 5B

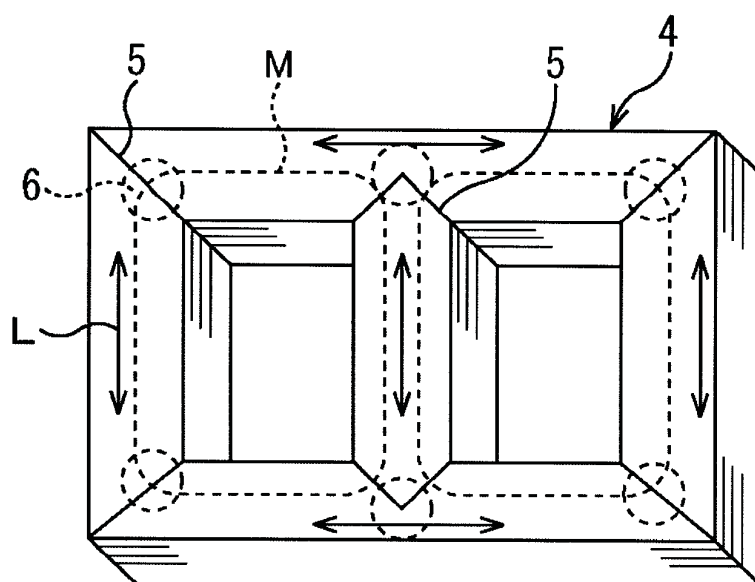


FIG. 6

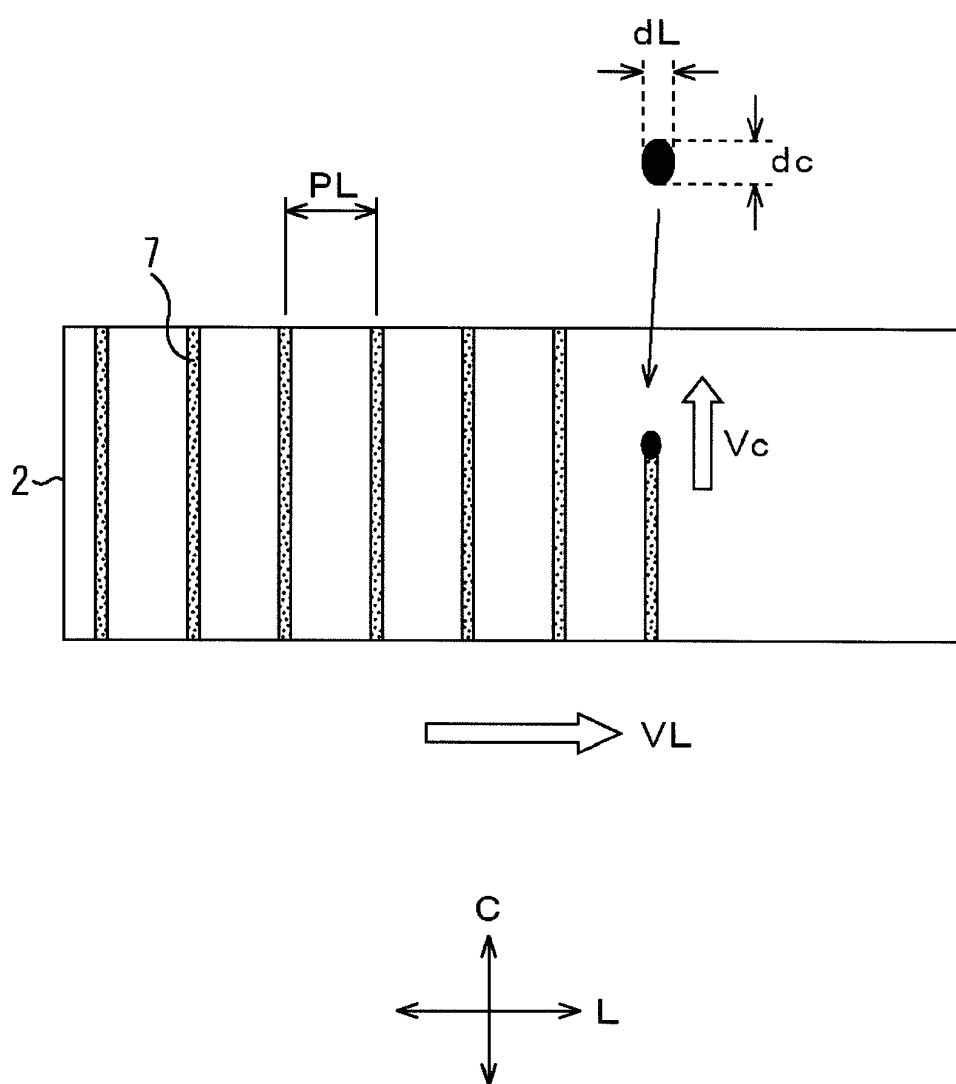


FIG. 7A

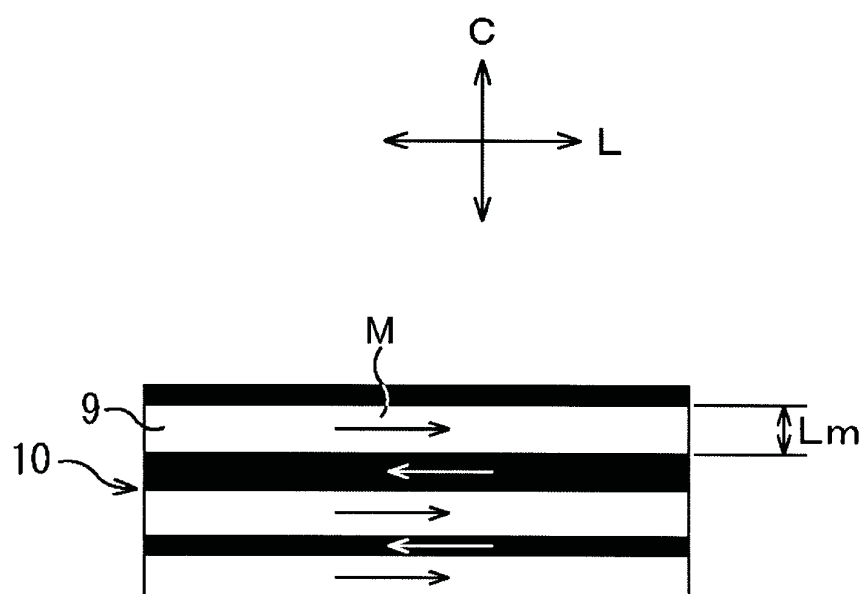


FIG. 7B

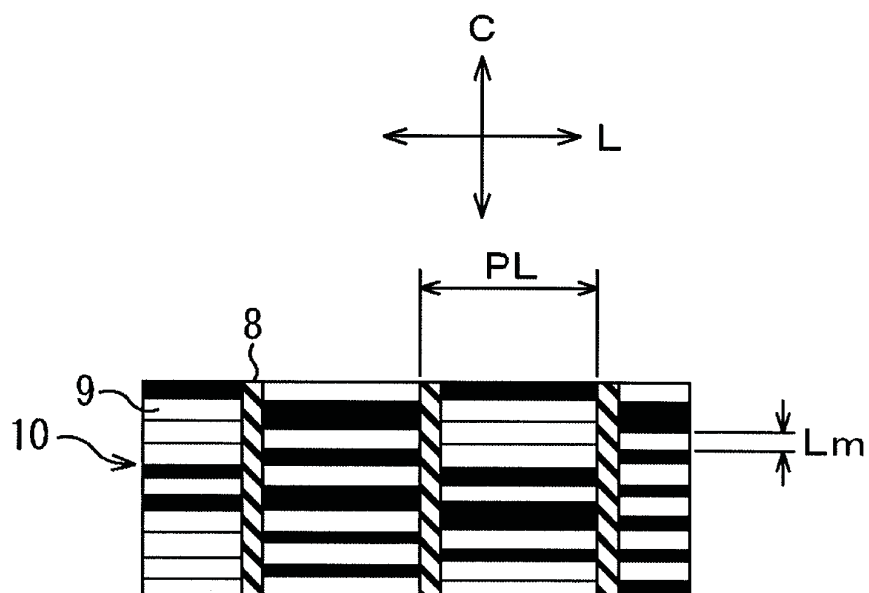


FIG. 8

