[19]中华人民共和国国家知识产权局

[51]Int. Cl[7]
C21D 8/12
H01F 1/16

[12]发明专利说明书

[21] ZL 专利号 98800062.8

[45]授权公告日 2002 年 5 月 1 日

[11]授权公告号 CN 1083895C

[22]申请日 1998.1.26 [24]颁证日 2002.5.1
[21]申请号 98800062.8
[30]优先权
[32]1997.1.24 [33]JP [31]11718/97
[32]1997.4.24 [33]JP [31]107748/97
[86]国际申请 PCT/JP98/00303 1998.1.26
[87]国际公布 WO98/32884 日 1998.7.30
[85]进入国家阶段日期 1998.9.24
[73]专利权人 新日本制铁株式会社
地址 日本东京都
[72]发明人 坂井辰彦 浜田直也 南田胜宏
杉山公彦 坂井田晃 茂木尚
[56]参考文献
JP59－33802A 1984. 2.23
JP6－57335A 1994. 3. 1
审查员 葛松生

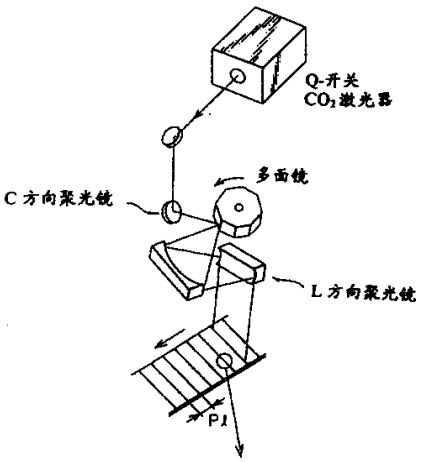
[74]专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专利商标事务所
代理人 王以平

权利要求书 2 页 说明书 16 页 附图页数 18 页

[54]发明名称 具有优良磁性能的晶粒取向性电工钢薄板及其生产工艺和设备

[57]摘要

本发明提供一种晶粒取向性电工钢薄板，该钢板通过用脉冲激光照射减小180°磁畴壁间距提高了磁性能，其特征在于，激光照射产生的周期闭合磁畴在轧制方向上的宽度≤150μm，在钢板厚度方向上的深度≥30μm，宽度和深度的乘积≥4500μm^2，而且，板厚0.23mm的材料的磁致收缩（λ19p－p压缩）≤0.9×10^{-6}，板厚0.27mm的材料的磁致收缩（λ19p－p压缩）≤1.3×10^{-6}。用Q－开关CO_2激光器在晶粒晶粒取向性电工钢薄板表面照射，聚光形状为长轴是钢板宽度方向的椭圆形。而且，激光脉冲的照射功率密度调节到不高于钢板表面的薄膜损阈值以防止对表面的薄膜造成损伤。椭圆光束的长轴长度设置为不小于钢板宽度方向的脉冲光束照射间距，以在钢板表面重叠形成连续脉冲光束，为磁性能的提高提供所必需的足够的累积照射能。而且，在钢板宽度方向上提供把照射光束独立地聚光的透镜或平面镜之类的聚光部件，还提供了独立地调整每一聚光部件到被照射钢板表面距离和能在钢板宽度方向和轧制方向上的照射光束直径的调节部件。



ISSN1008-4274

00·10·20

权 利 要 求 书

1.一种晶粒取向性电工钢薄板，该晶粒取向性电工钢薄板通过用脉冲激光照射减小 180° 磁畴壁间距而提高磁性能，其特征在于：

激光照射产生的周期闭合磁畴在轧制方向上的宽度≤150μm，在钢板厚度方向上的深度≥30μm，宽度和深度的乘积≥4500μm^2。

2.如权利要求 1 所述的晶粒取向性电工钢薄板，其特征在于：

薄板厚度为 0.23mm 的材料的磁致收缩(λ19p-p 压缩)≤0.9×10^{-6}。

3.如权利要求 1 所述的晶粒取向性电工钢薄板，其特征在于：

薄板厚度为 0.27mm 的材料的磁致收缩(λ19p-p 压缩)≤1.3×10^{-6}。

4.一种生产晶粒取向性电工钢薄板的工艺，该晶粒取向性电工钢薄板通过在其表面进行脉冲激光束照射而提高磁性能，其特征在于：

照射的激光束聚光的形状是长轴为钢板宽度方向的椭圆，用连续的脉冲激光束照射的部分在空间上是重叠地进行连续照射的，而且所述钢板表面的薄膜不受任何损伤。

5.如权利要求 4 所述的生产晶粒取向性电工钢薄板的工艺，其特征在于：

单个激光脉冲的照射功率密度不大于钢板表面损伤的阈值。

6.如权利要求 4 或 5 所述的生产晶粒取向性电工钢薄板的工艺，其特征在于：

用 Q－开关 CO_2 激光器产生所述脉冲激光。

7.如权利要求 4 或 5 所述的生产晶粒取向性电工钢薄板的工艺，其特征在于：

单个聚光脉冲的峰值功率密度≤12kW/mm^2。

8.如权利要求 4 或 5 所述的生产晶粒取向性电工钢薄板的工艺，其特征在于：

所述照射的椭圆激光束的短轴为 0.25 ~ 0.35mm，长轴为 6.0 ~ 10.0mm。

00.10.20

9.一种生产晶粒取向性电工钢薄板的设备，该晶粒取向性电工钢薄板通过在其表面进行脉冲激光束照射而提高磁性能，其特征在于：

对于照射的激光束，钢板宽度方向上的聚光元件和钢板轧制方向上的聚光元件是各自独立地设置的。

10.如权利要求9所述的生产晶粒取向性电工钢薄板的设备，其特征在于：

为了独立地调整钢板宽度方向和轧制方向上的上述聚光装置和被照射的晶粒取向性电工钢薄板间的距离，设置了调节机构。

11.如权利要求9所述的生产晶粒取向性电工钢薄板的设备，其特征在于：

在钢板宽度方向上的聚光元件的焦距比轧制方向上的聚光元件的焦距长。

说　　明　　书

具有优良磁性能的晶粒取向性电工钢薄板及其生产工艺和设备

技术领域

本发明涉及一种通过激光束照射提高了磁性能的晶粒取向性电工钢薄板，特别涉及钢板表面没有照射损伤的高磁性能的晶粒取向性电工钢薄板及其生产工艺和设备。

背景技术

在生产晶粒取向性电工钢薄板的传统工艺中，已提出许多在钢板表面进行动态变形，为了 180 ° 磁畴的碎化产生周期闭合磁畴以降低铁损的方法。在这些工艺中，例如在日本专利公报 No.55-18566 中公开的，在钢板表面照射聚焦脉冲 YAG 激光束，通过钢板表面薄膜的蒸发抗力造成形变，这些工艺由于大大降低了铁损而且是非接触加工，得到的晶粒取向性电工钢薄板具有非常高的可靠性和可控制性。

然而，虽然这些方法中使用的脉冲激光能有效地得到钢板表面上的玻璃膜蒸发抗力，却由于表面绝缘涂层的破坏造成了激光照射损伤。这使得必须在激光照射后再提供绝缘涂层，从而很不方便。

因此，已经公开了不同的通过采用瞬时功率较低的连续波激光器以减小玻璃膜损伤的方法，例如日本专利公报 No.62-49322 中描述的连续波 CO_2 激光器技术和日本专利公报 No.5-32881 中描述的连续波 YAG 激光器技术。尤其是在后一专利的说明书中清楚地描述了 Q-开关 YAG 激光器具有短脉冲时间宽度和高的峰值功率，难以避免玻璃膜上的蒸发和照射损伤，从而不适合晶粒取向性电工钢薄板的激光处理。而且还清楚地说明用作脉冲灯激发之类的普通脉冲激光器也不适合晶粒取向性电工钢薄板的激光处理，其原因如下：第一，这种激光器基本上具有非常低的脉冲重现率，跟不上高速的生产线；第二，使用这种激光器时为了实现必须的磁畴控制，照射面的平均能量密度应提高到大于 Q－开关脉冲

激光器的值，而提高照射面的能量密度又出现钢板的平整面发生物理形变的新问题，这些变形表现为钢板上的翘曲或形成表面上的条纹，这种条纹对于脉冲激光处理的钢板的抗铁损是有害的，对用这种脉冲激光处理的钢板制成的变压器的层状器件也是有害的。

另外，采用连续波激光器进行变形而不留下照射痕迹的原理在于激光照射的快速加热和快速冷却。与脉冲激光方法的变形起因，即玻璃膜的蒸发抗力相比，这是一个主要差别。

然而，虽然连续波激光器因其低能量密度可以有效地控制照射损伤，但因其快速加热和快速冷却的能力与高峰值功率脉冲激光相比较小，从而造成形变的效率也低。因此，为了得到与通过脉冲激光方法进行变形造成的同样的抗铁损的提高，必须使钢板上的全部照射能相当高。另外，取向钢板的磁致收缩在其用作变压器时与产生的噪声成正比，对于晶粒取向性电工钢板是和铁损一样重要的性能，已经发现磁致收缩与全部照射能有正向关系，因此用连续波激光器的磁畴控制方法与脉冲激光方法相比，产生了磁变形大的问题，这是连续波激光器方法的缺点，尽管其产生的照射损伤可以忽略。

而且，如果对出现的表面照射损伤靠近观察，会发现这种现象很大程度上依赖于由光束形状和激光功率决定的照射能量密度。因此，通过降低能量密度可以控制照射损伤。然而，必须保证最小的总热输入以产生足够的热变形。在这些传统的连续波激光器照射设备中，可通过形成椭圆状的激光束，长轴方向是钢板宽度方向即扫描方向，并延长激光束在照射点上的照射时间以保证热输入。因此，当用减小激光照射损伤和具有可调节的热输入的照射设备时，必须对照射条件即激光功率，扫描速度和椭圆光束形状进行复杂和精确的控制。

另外，晶粒取向性电工钢薄板的生产步骤包括退火和绝缘涂覆，因此钢板表面包括退火时形成的氧化膜和在其上加的绝缘/防锈涂层。因此，钢板表面的激光抗力根据退火温度、时间和涂层溶液的类型有微小变化。所以，为了减小激光照射损伤，必须根据钢板表面性能调节每一激光照射条件。在这些照射条件中，通过激光设备的功率调节功能可以控制激光功率，通过调节在扫描光学系统中普遍使用的多面镜或电流镜

的转速可以容易地控制扫描速度。然而，在为降低照射损伤减小激光功率时，会伴随着入射热量的减小，导致变形不充分，进一步导致不好的铁损性能。可以考虑降低扫描速度，但又产生牺牲加工速度的问题。因此，激光能量密度的控制要求控制设备可灵活地调节不同激光功率、扫描速度和椭圆光束形状的设备。

在传统的照射设备中，如上述日本专利公报 No.5-32881 中公开的，激光束聚焦设备是简单的圆柱透镜。这样的聚焦元件只能在短轴方向上调节扁平光束，不能在长轴方向上改变从激光设备照射的尺寸。因此自由和准确的椭圆形状调节是不可能的。所以由于钢板对激光抗力的微小波动使现有技术在减小激光束损伤方面受到限制，由此导致了在不同钢板连续加工的生产步骤的实际问题。

考虑到该背景，本发明致力于提供一种工艺以及实现这种工艺的设备，可以生产具有优良磁性能的晶粒取向性电工钢薄板，该工艺不会产生脉冲激光方法存在的问题即激光照射损伤，可以提高抗铁损和磁致收缩的性能。

本发明的目的之一在于提供一种具有铁损低、磁致收缩性能优异的晶粒取向性电工钢薄板。

本发明的目的之二在于提供一种降低晶粒取向性电工钢薄板的铁损的工艺，该工艺防止了传统脉冲激光照射造成的表面激光照射损伤，大大减小了连续被激光的问题即磁致收缩的增加，而且包含适于高速、连续加工的激光加工步骤。

本发明的目的之三在于提供一种生产通过激光照射降低铁损、且减小表面激光照射损伤的晶粒取向性电工钢薄板的设备，该设备是一种在连续地减小激光照射损伤时可方便地适应给定钢板表面的激光抗力波动的激光照射设备。

发明内容

本发明涉及一种晶粒取向性电工钢薄板，通过脉冲激光照射降低磁畴壁间距提高了磁性能，其特征在于：通过激光照射产生的周期闭合磁畴的轧制方向的宽度≤150μm，钢板厚度方向的深度≥30μm，宽度和深度的乘积≥4500μm^2。

本发明还涉及一种晶粒取向性电工钢薄板，通过脉冲激光照射降低180°磁畴壁间距提高了磁性能，其特征在于：激光照射产生的周期闭合磁畴的轧制方向的宽度≤150μm，薄板厚度方向的深度≥30μm，宽度和深度的乘积≥4500μm^2，其中板厚0.23mm的材料（λ19p-p压缩）的磁致收缩≤0.9 × 10^{-6}，板厚0.27mm的材料（λ19p-p压缩）的磁致收缩≤1.3 × 10^{-6}。

磁致收缩（λ19p-p压缩）是在1.9T的磁场中0.3kg/mm^{2}压应力下的延伸率。

本发明还涉及一种生产通过在晶粒取向性电工钢薄板表面等间距地照射激光提高了磁性能的晶粒取向性电工钢薄板的工艺，其中，激光是脉冲振荡Q－开关CO_2激光，照射光束的形状是长轴为钢板宽度方向的椭圆形，激光脉冲的照射能量密度设置为不高于钢板表面的玻璃膜损伤阈值以减小激光照射损伤，椭圆光束的长轴长度设置为不小于钢板宽度方向的脉冲光束照射间距，以在钢板表面重叠形成连续脉冲光束，为磁性能的提高提供所必需的足够的累积照射能。

本发明还涉及一种生产通过在晶粒取向性电工钢薄板上激束照射以提高磁性能的晶粒取向性电工钢薄板的设备，这种生产具有优异磁性能的晶粒取向性电工钢薄板的设备具有：把钢板宽度方向和轧制方向上加的照射激光束独立地聚光的透镜或平面镜之类的聚光元件，以及独立地调整每一聚光元件到被照射钢板表面距离和能自由调节在钢板宽度方向和轧制方向上的激光照射束直径的调节元件。在根据本发明的生产具有优良磁性能的晶粒取向性电工钢薄板的设备中，照射激光束在钢板宽度方向上聚光元件的焦距被调节为比轧制方向上的焦距长。

附图简述

图1是入射激光功率和铁损的关系图。

图2（a）和2（b）是根据本发明一实施方案的激光照射方法图，其中图2（a）是整体示意图，图2（b）是照射区域的放大图。

图3（a）是不同激光的波形图，图3（b）是对不同激光采用本发明的激光照射方法时，扫描线上的被选择点的温度随时间的变化图。

图4是表面薄膜损伤等级和激光峰值功率密度的关系图。

图 5 是抗铁损的提高和照射功率密度的关系图.

图 6 是磁致收缩和照射功率密度的关系图.

图 7 是抗铁损的提高和椭圆形光束 L 方向上的光束直径的关系图.

图 8 是磁致收缩和椭圆形光束 L 方向上的光束直径的关系图.

图 9 是抗铁损的提高和椭圆光束 C 方向上的光束直径的关系图.

图 10 是磁致收缩和椭圆光束 C 方向上的光束直径的关系图.

图 11（a）和 11（b）分别是现有技术和本发明的周期闭合磁畴的宽度.

图 12（a）和 12（b）是现有技术和本发明在钢板厚度方向不同深度弹性变形的磁畴型式的系列图，其中图 12（a）的深度是 6.5mm，图 12（b）是 10mm.

图 13 是根据本发明的激光照射设备的整体图.

图 14（a）和图 14（b）是根据本发明的激光照射设备从钢板宽度方向上看的示意图，其中，图 14（a）表示了平台 7 的定位机构，图 14（b）表示了聚光镜 6 的定位机构.

图 15 是激光束传播长度和光束直径的关系图,

图 16（a）和 16（b）是两个光束形状控制方案的图，其中，图 16（a）是聚光镜 f_1 = 375mm， f_2 = 200mm，设置 Wdl = 420mm，Wdc = 207mm 的钢板表面上的光束形状,图 16（b）是用与图 16（a）同样的聚光镜，设置 Wdl = 420mm， Wdc = 207mm 的钢板表面上的光束形状.

图 17（a）和图 17（b）是说明激光脉冲峰值功率密度和钢板上的激光照射损伤评价结果的两个图，其中图 17（a）是钢板 A 的耐激光抗力，图 17（b）是钢板 B 的耐激光抗力.

实施本发明的最佳方式

根据本发明，对于晶粒取向性电工钢薄板用脉冲激光照射降低磁畴壁间距以提高磁性能. 要得到优良的磁性能必须满足的条件是激光照射产生的周期闭合磁畴≤150μm，在钢板厚度上的深度≥30μm，宽度和深度的乘积≥4500μm^2. 其原因如下所述.

晶粒取向性电工钢薄板的铁损分类为反常铁损和磁滞铁损. 对于具

有较窄的 180° 磁畴壁间距的钢板的不均匀铁损比较低. 通过激光磁畴控制，在轧制方向上周期性地进行激光照射弹性变形得到闭合磁畴（即 90° 磁畴）. 结果使得 180° 磁畴壁间距变窄，不均匀铁损减少，在 180° 磁畴壁（主磁畴）产生的碎化效应随产生的闭合磁畴的尺寸而增加，如果仅从降低不均匀铁损上看，更希望（体积）大的闭合磁畴。

另一方面，磁滞铁损与轧制方向上闭合磁畴的宽度成正向关系，因此，当进行大的形变或产生大的闭合磁畴以降低不均匀铁损时，通常会增加闭合磁畴，从而增加了磁滞铁损大小。其结果使得铁损总量增加。

从宏观上看，闭合磁畴的体积与入射激光的平均功率成正比。图 1 是入射激光平均功率和不均匀铁损、磁滞铁损和总铁损的关系图。

磁致收缩与轧制方向上闭合磁畴的宽度也成正比关系。因此，为了同时减小反常铁损、磁滞铁损和磁致收缩，可以在减小轧制方向上宽度的同时增加闭合磁畴的体积。即，闭合磁畴的最佳形状是在轧制方向上窄，在钢板厚度方向上深，且具有规定的或更大的体积。

本发明人测量了闭合磁畴的宽度和深度，以及它们与照射激光束形状的关系，以确定具有最高磁性能的磁畴形状。首先，闭合磁畴的轧制方向上的宽度与光束在轧制方向上的直径成正比，从这一点上看，dl 最好尽可能地小。如图 8 所示，当 dl 小于 0.28mm 时，磁致收缩明显地降低。这时测得的闭合磁畴宽度为 150μm，深度至少为 30μm。从图 7 所示 dl 和铁损的提高的关系看，dl 在 0.28mm 左右时，铁损的提高最多，这导致因闭合磁畴宽度下降引起的磁滞铁损的减小.然而，dl 为 0.20mm 时，铁损的增加量却减小，这是因为，尽管闭合磁畴深度为 30μm，宽度却为 100μm 左右，导致得到的闭合磁畴体积更小。

这些结果表明，闭合磁畴的轧制方向的宽度优选为≤150μm，这时深度也必须≥30μm。因此，磁畴面积与轧制方向宽度和钢板厚度方向深度的乘积成正比，具有优选值≥4500μm^2.

本发明的激光闭合磁畴控制方法的另一重要特征在于有效地进行热变形的同时减小了表面损伤。

图 2（a）是本发明激光磁畴控制方法的一个实施例的说明图，图 2（b）是照射区域的放大图. 钢板是轧制方向（方向 1）与容易磁化方

向（180°磁畴）平行的晶粒取向性电工钢薄板。照射的Q－开关CO_2激光脉冲光束通过在两个垂直方向L和C上独立的聚光镜或透镜聚光成短轴dl为轧制方向，长轴dc为钢板厚度方向的椭圆。扫描方向与椭圆光束的长轴方向平行，聚焦光束通过多面镜之类以预定间距Pc扫描照射。在轧制方向上也以预定间距Pl照射，这里，为了在钢板上连续地叠加脉冲激光，dc设置为大于Pc。

这种方法的激光照射参数的关系式如下式（1）和（2）所示。其中，Pp是脉冲峰值功率，Ip是峰值功率密度，Ep是脉冲能量，Up是在扫描线上给定点的累积能量密度。S是光束面积，Vc和Fp分别是C方向扫描速度和脉冲的重复频率。n是脉冲重叠的次数。

$$Ip = (Pp/S) \qquad \text{式（1）}$$

$$Up = (Ep/S) \cdot n = (4Ep)/(\pi \cdot de \cdot Pc) \qquad \text{式（2）}$$

$$[n=dc/Pc,\ s=(\pi/4)(de \cdot dc)]$$

用连续波激光器时的照射参数由下式（3）和（4）表示。其中，Pav是连续波激光器的平均输出，τ是在扫描线给定点的光束照射时间。

$$Ip = (Pav/S) \qquad \text{式（3）}$$

$$Up = Ip \cdot \tau = (4 \cdot Pav)/(\pi \cdot de \cdot Vc)$$

$$(\tau = dc/Vc) \qquad \text{式（4）}$$

现在结合图3总结照射损伤和用脉冲激光和连续波激光器进行热变形的原理，以解释根据本发明的激光磁畴控制的效果。

图3（a）表示了Q－开关YAG激光器、Q－开关CO_2激光器和连续波激光器器的激光波形。如日本特开平5－32881号公报指出的，Q－开关YAG激光器的特征在于具有大约0.01μs的非常短的脉冲时间，尽管脉冲能量低，峰值功率很高。相比之下，具有和Q－开关激光器类型相似的CO_2激光器的脉冲时间宽度长，为0.2～0.5μs，其峰值功率较低。它们的特征在于在原脉冲后面有一个低的峰/高值能量尾部，可通过尾部时间长度调节热输入。

图3（b）是在钢板表面给定点上进行图3（a）所述的不同激光照射时的温度变化过程的图示。表面损伤的产生用阈值温度Π表示，产

生闭合磁畴的热变形用阈值温度T2表示。T1是表面绝缘膜软化/熔化的温度，即800℃左右。另一方面，如从热变形释放温度估计的一样，T2为500℃左右。因此，为了减小照射损伤和引入热变形，钢板温度可控制在500～800℃。

下面解释温度变化过程和引入变形的效果。图3（b）中的温度上升斜线对应的加热速率与照射激光单位时间的能量密度或功率密度Ip。由于热变形是通过对钢板的快速加热和快速冷却引入的，当采用高峰值功率激光时，进行变形的效率非常高。因此，与连续波激光器相比，脉冲Q－开关激光器具有较低的照射能量，能对磁性进行很大的提高。然而，总变形量和钢板厚度方向上的变形影响深度与总照射能量密度Up成正比，在图3（b）中与温度变化过程的时间积分值（图中阴影部分）成正比。

因此，根据本发明的理想的激光磁畴控制包括：在500～800℃范围内的钢板温度，用脉冲激光照射进行的重复快速加热和快速冷却，和在给定点引入的尽可能高效的总能量Up的引入。

下面详细描述基于这些发现的本发明的用Q－开关CO_2激光器进行的磁性能提高方法。本发明采用的Q－开关CO_2激光器具有比Q－开关YAG激光器低但比连续波激光器高的峰值输出，峰值输出值通常在10～1000kW的范围内。脉冲时间宽度的原脉冲时间宽度为200～500ns，包含尾部在内共1～10μs。

正如对图2的解释，脉冲激光束照射方法是扫描照射，L和C方向独立地聚焦。具体地，扫描方向即C方向与聚焦光束的长轴平行，扫描间距Pc设置为比椭圆的长轴长度dc长，使得脉冲激光束在钢板表面上重叠。通过改变峰值功率和光束聚焦面积调节脉冲峰值功率密度Ip，使得即使光束重叠钢板表面温度也不会到达薄膜损伤阈值温度T1。在具有以这种方式控制的Ip的照射条件下，每一个脉冲的照射能量密度同时也降低，使得一般不可能有效地进行变形。然而，根据本发明，由于光束重叠在钢板的任一给定点都照射许多个脉冲。照射在每一点的脉冲个数n根据上式（2）从光束长轴dc和扫描间距Pc得到。因此，如图3（b）所示，由于以脉冲重复频率Fp把间歇的快速加热和快速冷却重复n次，

从能量角度看，就可以通过脉冲重叠的累积效果把 Up 提高到足够进行磁畴碎化所需的变形。从而使变形大成为脉冲激光的优点。

通过上述机构，本发明具有减小激光照射损伤和提供足够磁畴控制效果的优点。

现在比较采用了 Q－开关 CO_2 激光器的本发明与采用 Q－开关 YAG 激光器的情形。如图 3（b）所示，Q－开关 YAG 激光器具有小的脉冲时间宽度和高的峰值功率。例如，用光电晶体在闪光灯激发的 YAG 激光媒质中伴随产生 Q－开关振荡时，脉冲时间宽度通常为≤0.01μs，脉冲峰值功率为≥1mw。对于这样的时间宽度小，峰值高的脉冲激光，难以进行精确的加热和温度控制，薄膜损伤容易发生。在此可以用与本发明的照射方法相同的方式增加光束直径，以减小每单个脉冲的 Ip。然而，由于同时每单个脉冲的能量密度也相当地低，而且脉冲时间宽度很短，只有以≥1MHz 的非常高的脉冲重复频率扫描才有可能实现脉冲能量累积效果，这在实际上是不可能的，因此，采用 Q－开关 YAG 激光器，难以提高晶粒取向性电工钢薄板避免产生照射损伤的性能。

从工业应用的角度看，Q－开关 CO_2 器激光也具有很大的优点。在晶粒取向性电工钢薄板的生产工艺中，为了提高激光处理速度，Q－开关激光器最好有大的平均输出，即脉冲能量和脉冲重复频率的乘积。Q－开关激光器的平均输出与作为它基础的连续波激光器的平均输出成正比。在固体晶体 YAG 激光器的情况下，平均输出限制在 5KW，另一方面，能够上对容易地生产大的气体媒质 CO_2 激光器，在工业可以得到输出>40KW 的连续波激光器设备。而且，CO_2 激光器的设备和操作费用低。因此，采用 Q－开关 CO_2 激光器具有低成本，而且可应用在高速度、大尺寸晶粒取向性电工钢薄板的磁性能提高技术中的优点。

图 13 和图 14 是本发明的设备图。根据本发明的晶粒取向性电工钢薄板的生产工艺，如图 13 所示，激光束以椭圆形状聚焦在钢板 8 的表面上，长轴 d1 是板宽度方向，短轴 dc 是轧制方向。聚焦激光束以一定速度在钢板宽度方向上扫描。当采用连续波激光器束时，给定点的激光照射时间 T 由式（5）表示。当采用脉冲激光束时，照射是间歇的，扫描方向上的照射间距 P1 用式（6）表示，其中，Fp（Hz）是脉冲重复

频率．在轧制方向上照射以一定的间距P1发出，且采用激光束间歇中断设备（未示出）：

$$T = dl/V \qquad \text{式（5）}$$

$$Pl = V/Fp \qquad \text{式（6）}$$

图14（a）和（b）是本发明的设备从钢板宽度的横截面方向看的示意图．激光设备1发出的激光束LB通过镜面2被导向平台7．在平台7上提供焦距为f1在钢板宽度方向聚焦的聚光柱镜3、多面镜4、扫描镜5和焦距为f2在轧制方向聚焦的聚光柱镜6．入射到平台7的激光束LB仅在薄板宽度方向上被聚光柱镜3以焦距f1聚焦，然后激光束被多面镜4和扫描镜的转换成与钢板宽度方向平行的扫描光束．该光束也只在轧制方向上被聚光柱镜6以焦距f2聚焦，并照射在钢板8上．图15是激光束传播距离和光束直径关系的说明图．激光束以f1、f2和Wdl、Wdc确定的光束直径dl和dc聚焦在钢板表面．

如图13所示，在平台7上提供了相对于钢板8作垂直运动并通过定位设备9安装在固定底座11上的机构．在聚光柱镜6上提供了可沿轧制方向平行移动并通过定位设备10安装在平台7上的机构．由此，如图14所示，平台7的垂直运动同时改变了钢板宽度方向聚光镜3和钢板8的距离Wdl以及钢板轧制方向聚光镜6和钢板8的距离Wdc．同时，轧制方向上聚光柱镜6的平行运动仅仅独立地改变Wdl．这样，这两种运动的组合就可以进行自由移动和Wdl和Wdc的调节．结果使得，在不改变焦距f1和f2，即聚光镜的曲率半径的前提下，可以容易地对钢板表面的钢板宽度方向直径d1和轧制方向dc进行精确的调整．

如图13和图14所示，该照射设备的特征在于，激光束的直径被薄板宽度方向（C）和轧制方向（L）上的聚光镜3、6分别独立地控制，C方向的聚光系统比L方向聚光系统的焦距长．

因为根据本发明的技术，把L方向光束直径dl精确聚焦到0.2～0.3mm左右，聚光柱镜6的焦距必须比较短．结果使得聚焦深度较小，由于聚光镜6和钢板8之间的距离Wdc需要精确调节机构，必须有定位机构9．然而，在本发明的构造中独立地提供钢板宽度方向聚光镜3时，它的焦距比轧制方向上的聚光镜6的焦距长，焦深也比聚光镜6的大．

因此，钢板厚度方向直径 dc 通过定位机构 9 在 Wdc 调节范围内的波动大部分可被忽略。

因此，尽管最好提供图 13 所示的定位机构 9、10 以进行 Wdl 和 Wdc 的独立控制，定位机构 10 可从上述构造中省去。

通过对根据本发明的脉冲激光磁畴控制的晶粒取向性电工钢薄板的周期闭合磁畴的观察发现，如表 1 和图 11（b）所示，与传统方法（通过具有表面照射损伤的脉冲激光产生的磁畴的控制）的钢板相比，本发明有更深的闭合磁畴，闭合磁畴的宽度减小到 150μm，轧制方向上的宽度比图 11（a）所示传统方法相比更窄。因此，如表 1 和图 11 中清楚表明的，根据本发明得到的晶粒取向性电工钢薄板具有比根据现有技术得到的更窄和更深的闭合磁畴。

表 1

腐蚀深度	0(μm)	20	25	32	44	52	60
本发明	O	O	O	O	O	△	X
现有技术	O	O	O	X	X	X	X

O 存在闭合磁畴

△部分地存在闭合磁畴

X 没有闭合磁畴

晶粒取向性电工钢薄板材料的磁致收缩值与变压器的噪声成正比，一般情况下，当磁致收缩≤1.3×10^{-6} 时变压器噪声减小到不会让人不舒服的程度，如果磁致收缩甚至低于 0.9×10^{-6}，变压器噪声显著地下降，甚至消除了任何轻微的不适。由于其闭合磁畴的形状，本发明的晶粒取向性电工钢薄板（厚度为 0.23mm 的材料）具有非常小的磁致收缩，如下表所示，磁致收缩值为≤0.9×10^{-6}。因此，用本发明的晶粒取向性电工钢薄板可以生产与现有技术相比噪声非常低的变压器。

表 2

薄板厚度：0.23mm	连续波激光器法	传统脉冲激光器法	本发明
光束形状(dl×dc)	0.28×9.5mm	0.43×0.43mm	0.28×9.5mm
磁致收缩(λ19p-p 压缩)	1.2×10^{-6}	1.5×10^{-6}	0.9×10^{-6}

表 3

薄板厚度:0.27mm	连续波激光器法	传统脉冲激光器法	本发明
光束形状(dl × dc)	0.28 × 9.5mm	0.43 × 0.43mm	0.28 × 9.5mm
磁致收缩(λ19p-p 压缩)	1.6×10^{-6}	2.0×10^{-6}	1.3×10^{-6}

表 2 和表 3 分别示出了钢板厚度为 0.23mm 和 0.27mm 时，根据连续波激光器方法，传统脉冲激光器方法和本发明的磁致收缩（λ19p-p 压缩）值。

由表 2 和表 3 可清楚地看出，根据本发明得到的晶粒取向性电工钢薄板具有高于传统的连续波激光器方法或脉冲激光器方法生产的晶粒取向性电工钢薄板的磁致收缩性能。

实施例

用本发明的方法采用 Q－开关 CO_2 激光器照射 0.23mm 厚、具有高磁通密度的晶粒取向性电工钢薄板表面，评价了照射损伤和磁性能提高的效果。为了调节 Ip，L 方向光束直径 d1 设定为 0.30mm，C 方向光束直径 dc 在 0.50 ~ 12.00mm 间变化。Q－开关振荡的峰值输出 Pp 是 20KW，脉冲能量 Ep 是 8.3mJ，脉冲重复频率 Fp 是 90KHz，平均输出是 750W。扫描速度 Vc 为 43m/s，C 方向照射间距 Pc 在 Q－开关激光器照射时为 0.50mm 左右，L 方向间距 Pl 为 6.5mm。用连续波激光器时，平均输出 Pav 是 850W，其它条件与 Q－开关激光器相同。

图 4 表示了 Ip 和激光照射损伤表面等级的关系。激光照射损伤的评价等级根据视觉观察和抗蚀试验分为五级。具体地，第 1 评价级是清楚的白亮损伤，第 2 级是在 dl 方向上比第 1 级的缺陷更细小的白亮损伤，第 3 级是微细白亮损伤，第 4 级是只有通过显微镜观察才能确定的损伤，第 5 级是即使在显微镜下也没有可以观察到的损伤。第 3 级以下包含产生的铁锈，第 4 级以上没有铁锈。图 4 表明用 Q－开关激光器产生照射损伤的阈值能量密度比用连续波激光器高出一位数。其原因在于，如图 3（b）所示，尽管 Q－开关激光器的峰值功率高，但照射是间歇的，钢板温度并不达到损伤阈值 T1。比较而言，具有较低的瞬时功率的连续波激光器器，造成热量的连续累积，使得薄膜即使在低功率的情况下也会产生熔化损伤。从图 4 可以看出，在 Q－开关 CO_2 激光器的情况下，薄

膜损伤的阈值功率密度是 12kW/mm^2，因此通过把 Ip 值调节到此值以下用脉冲激光提高磁性能可以不产生照射损伤。

图 5 是连续波 CO_2 激光器方法和 Q－开关 CO_2 激光器方法的铁损提高量－Up 关系的比较结果，C 方向的光束直径是特别选择的，在图 4 中所述的照射条件下不会产生激光照射损伤，其中，对于 Q－开关激光器 C 方向光束直径是 8.7mm，对于连续波激光器为 10.5mm 左右。由此可看出，本发明采用 Q－开关 CO_2 激光器以较小的每次照射能，可以提供与传统的连续激光器方法相当的铁损提高。

另外，对于晶粒取向性电工钢薄板来说和铁损一样重要的磁性能－磁致收缩和钢板用作变压器时产生的噪声成正比，而且最好尽可能地低。图 6 示出了 Q－开关 CO_2 激光器和连续波 CO_2 激光器的磁致收缩－总照射能 Up 关系的比较结果。由该图可看出，磁致收缩随 Up 增加而增加。如对图 5 所解释的，用 Q－开关 CO_2 激光器处理可以用较小的照射能得到大的抗铁损的提高，由此导致与连续波激光器器处理材料相比，其磁致收缩减小。

而且，钢板的磁畴形状也与传统方法不同，如图 11（b）所示闭合磁畴的宽度很窄，并且由图 12 的磁畴形状变化可看出，深度方向上的弹性变形大于 30μm，这表明在本发明的产品中闭合磁畴甚至出现在 30μm 或更深的区域。

本实施例涉及用 Q－开关 CO_2 激光器的椭圆光束重叠照射方法的基本效果，这是本发明的基本要点。然而，通过限制钢板类型、椭圆光束形状、照射间距、照射功率密度和脉冲重复频率，根据本发明可以实现更大的磁性能提高，下面就是一个通过限制照射条件提高性能的例子。

图 7 和图 8 是利用本发明的照射方法，在椭圆光束的短轴和长轴长度变化时，长轴长度 dl 和抗铁损的提高、磁致收缩的关系图。其中，厚度为 0.23mm 的高磁通密度晶粒取向性电工钢薄板作被照射材料，照射条件是：Pc=0.5mm，Pl=6.5mm，Fp=90kHz，Vs=43m/s，Ep=8.3mJ，Pp=20kW．图 6 是 dc 在 0.5～12.0mm 范围内变化，dl 在 0.2～0.4mm 范围内变化时，抗铁损的提高和 dl 的关系。图 7 清楚地表

明 dl 在 0.25 ~ 0.35mm 范围时可以实现更大的抗铁损提高. 其原因如下: 根据式（ 2 ）， Pc 一定时， dl 减小， Up 增加，变形有效地进行。而且，轧制方向宽度的减小和磁滞铁损的减小都有助于提高抗铁损，这都导致更大的抗铁损的提高. 然而，当 dl 减小太多时 L 方向上变形的长度也减小，从而减小了变形体积. 因为磁畴的碎化（变形的起始点）产生抗铁损的提高，变形体积的大量减小会导致磁畴碎化效果减小. 这一点被认为是可以解释图 7 所示 dl 对应的最佳点的。

图 8 是表示 d1 和磁致收缩关系的类似的图. 磁致收缩随 dl 的减小线性地减小，其原因在于沿 180 ° 磁畴方向施加外部磁场时产生的闭合磁畴的膨胀，且在 L 方向上的膨胀效果最大. 因此，闭合磁畴在 L 方向上的宽度越小，即 L 方向上的变形宽度越小，磁致收缩越小. 因此如图 8 所示，照射光束 L 方向上的宽度 dl 越小，磁致收缩越小. 基于图 7 和图 8，当 dl 在 0.25 ~ 0.35mm 的范围内时，抗铁损和磁致收缩性能都提高。

下面讨论椭圆光束 C 方向直径 dc 的最佳值，图 9 和图 10 是在 dl 为固定值 0.28mm 及与上述相同的照射条件下， dc 和抗铁损的提高，磁致收缩的关系. 根据图 9，抗铁损的提高随 dc 的增大而增大，但增加到 10mm 以上时，急剧下降. dc≥6mm 时不产生激光照射损伤， dc 小到大约 1mm 时，式（ 1 ）表示的峰值功率密度 Ip 较高，留下激光照射的痕迹，但是由于薄膜的蒸发还在表面产生等离子体. 由于等离子体是激光吸收媒质，降低了钢板表面的激光热输入效率. 然而，当 dc 增加时 Ip 下降，实际上观察不到等离子体的产生，而且，由于在式（ 2 ）中 Up 对于 dc 是常数，对于铁损提高效果的增加，随离子体的减少，热输入更加有效. 然而，如果 dc 继续增加，每个脉冲的能量密度就显著减小，使得即使利用脉冲重叠也不能引入足够的热和变形，从而得到更小的抗铁损提高. 因此，从防止激光照射损伤和提高抗铁损的角度上讲，最优选地 dc 在 6.0 ~ 10.0mm 范围内.

图 10 表明，磁致收缩随 dc 的增加而线性地减小，这也可以用等离子体的出现与否来解释. 如果最初的热源是激光的直接加热，等离子体在钢板非常近的地方产生成为第二热源，由于在钢板上等离子体的面积比激光光束直径大，等离子热源变形的宽度大于光束的 L 方向的直径。

如上所述，磁致收缩与 L 方向的宽度成正比，因此由于出现等离子体磁致收缩增加。另一方面，由于随 dc 增大，等离子体的影响减小，在 dc≥10mm 的范围不能有效地进行变形，如图 8 所示，磁致收缩非常地低。因此，dc 的理想范围再一次被限制在 6.0～10.0mm。

图 16（a）和（b）对光束形状进行控制的本发明设备的一实施例的光束形状测量结果。这里用的激光器是连续波 CO_2 激光器，其 M^2 值（表征光束聚光性能的参数）是 5.7。聚光镜 3 的入射光束直径大约 68mm。图 16（a）是在本发明的聚光设备中设置 f1=375mm，f2=200mm 的聚光镜，调节机构分别设为 Wdl=430mm，Wdc=210mm 时在钢板表面测量光束形状的结果。这种设置得到的对应于钢板宽度方向直径的椭圆长轴 dl=4.3mm，对应于轧制方向直径的椭圆短轴 dc=1.1mm。

图 16（b）是用同样的聚光镜，根据本发明的调节机构设置为 Wdl=420mm，Wdc=207mm，这种设置得到的 dl=2.9mm，dc=1.4mm。

通过上述的实施方案用根据本发明的照射装置，可以无须改变聚光的光学部件的焦距就可以容易地调节聚光椭圆形状。

下面是用于照射损伤小的、抗铁损提高的晶粒取向性硬电工钢薄板生产设备的实施方案。图 17（a）和（b）是在生产高磁通密度晶粒取向性电工钢薄板的工艺中退火条件和绝缘涂覆液不同的两种不同钢板 A 和 B 的激光抗力测量结果。其中，Q－开关脉冲振荡 CO2 激光器被用作激光器。图 17 的水平轴是激光脉冲的峰值功率密度，垂直轴是表面照射损伤的评价等级（1－5）。在评价等级 5，没有发现可见的损伤，在腐蚀加速试验中也没有发现生锈，其表面性能和未进行激光照射的材料完全一样。这些结果清楚地表明，退火条件和涂覆液不同，产生的激光抗力也不同。

用图 13 和图 14 所示的本发明的光束照射设备照射钢板，形成的光束形状基于上述评价方法在钢板 A 和 B 上不产生激光照射损伤。表 2 表示了这些激光照射条件和抗铁损提高的结果。这里用的激光是 Q－开关 CO_2 激光，光束聚光参数 M^2 是 1.1。聚光镜 3 的入射光束直径是 13mm

左右。而且，抗铁损的提高指的是激光照射前后的铁损的差值与激光照射前的铁损值的比值。

表 4

钢板	A	B
激光平均输出	1000W	
钢板宽度方向的扫描速度：V	43m/sec	
激光脉冲重复频率：Fp	90kHz	
钢板宽度方向的照射间距：P1	0.5mm	
轧制方向的照射间距：P2	6.5mm	
聚光镜 3 的焦距：f1	300mm	
聚光镜 6 的焦距：f2	200mm	
聚光镜 3 和钢板间的距离：Wdl	541mm	509mm
聚光镜 6 和钢板间的距离：Wdc	210mm	212mm
钢板宽度方向的聚焦光束直径：dl	10.40mm	7.90mm
轧制方向的聚焦光束直径：dc	0.28mm	0.30mm
抗铁损的提高	12.0%	11.3%

结果表明，即使改变取向收电工钢薄板表面的激光抗力，本发明也可以连续地生产抗铁损性能提高的晶粒取向性电工钢薄板，而不产生表面激光照射损伤。

工业可应用性

如上所述，根据本发明的利用 Q－开关 CO_2 激光器提高晶粒取向性电工钢薄板抗铁损性能的方法，具有以下优点：可以避免表面激光照射损伤，这曾是传统脉冲激光器方法的缺点；可以防止不好的磁致收缩性能，这曾是连续波激光器方法的缺点。而且，通过根据激光照射条件限制聚焦光束形状，可以得到更好的磁性能，最后，由于采用了 Q－开关 CO_2 激光器，具有比 YAG 激光器更高的平均输出振荡和更低的设备和操作费用，可以应用到高速、大规模连续加工中，而且可以减小生产成本。

说　明　书　附　图

图 1

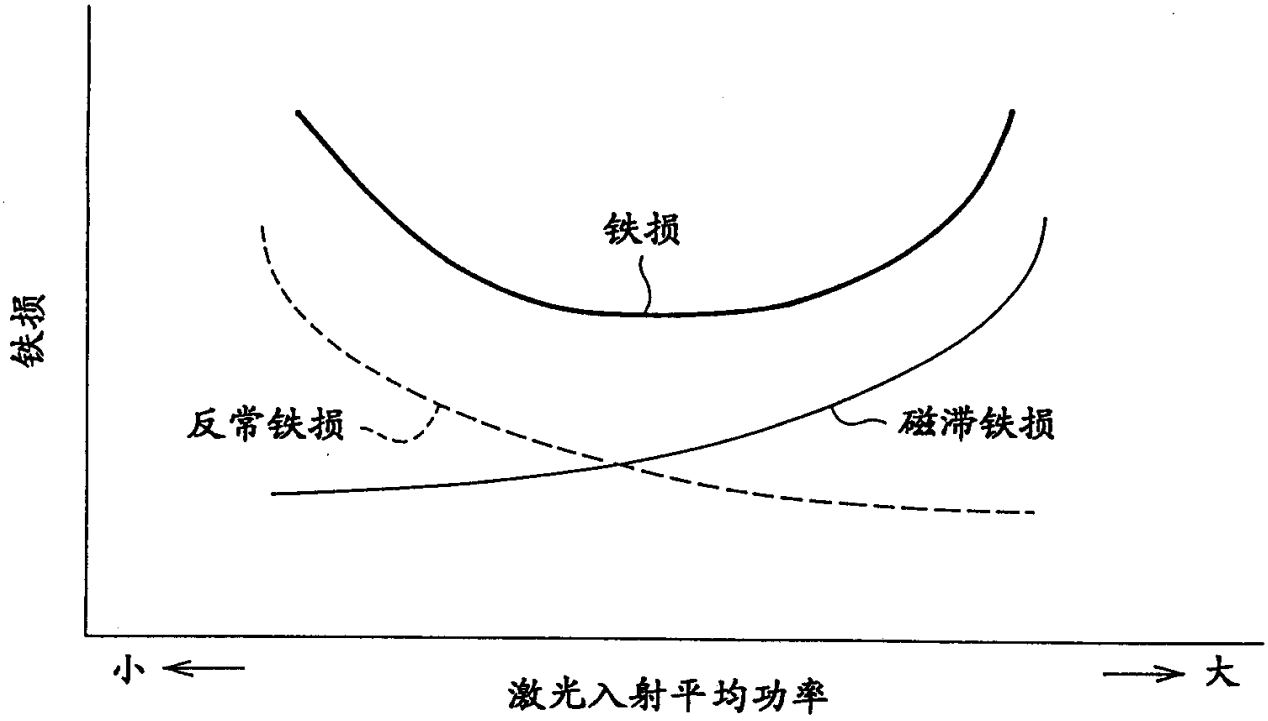


图 2(a)

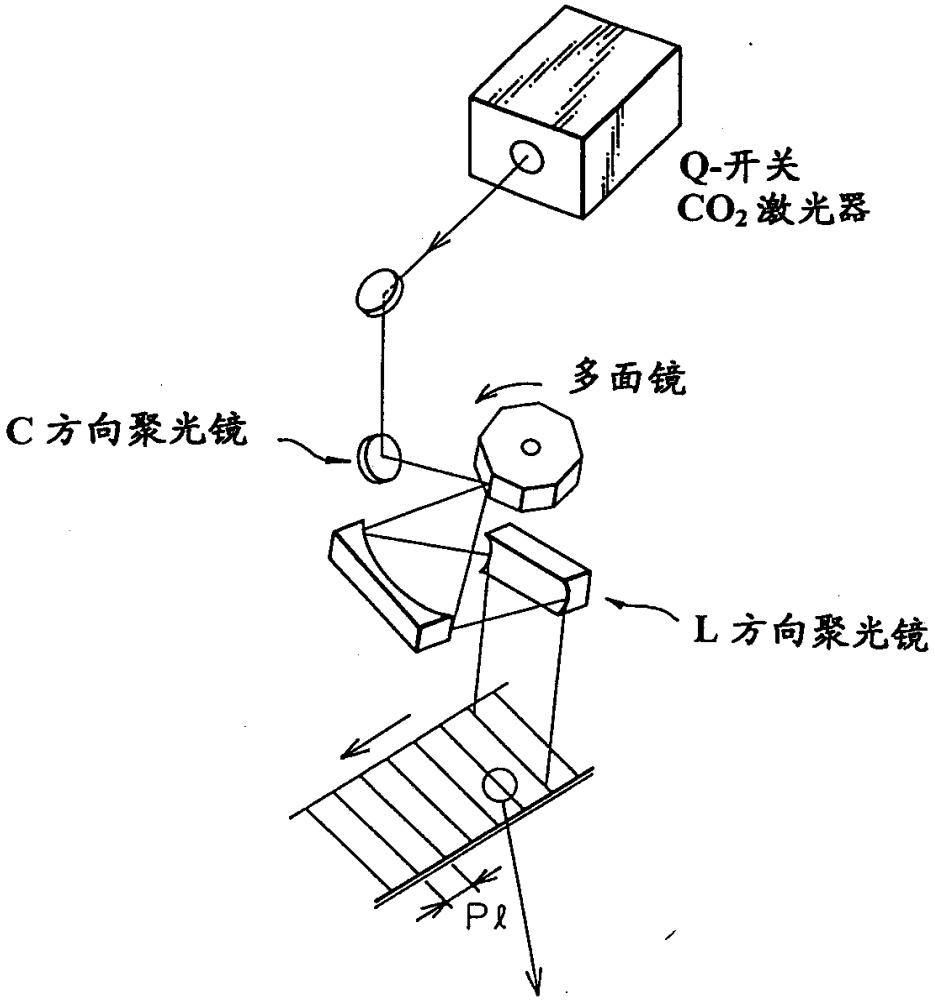


图 2(b)

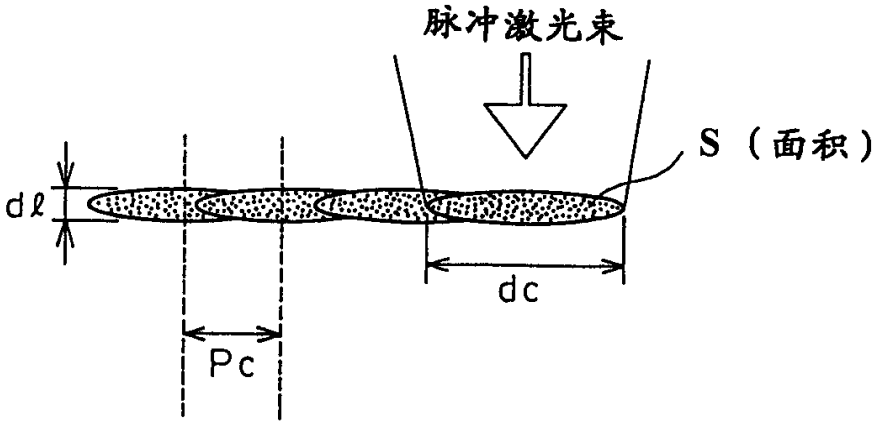


图 3(a)

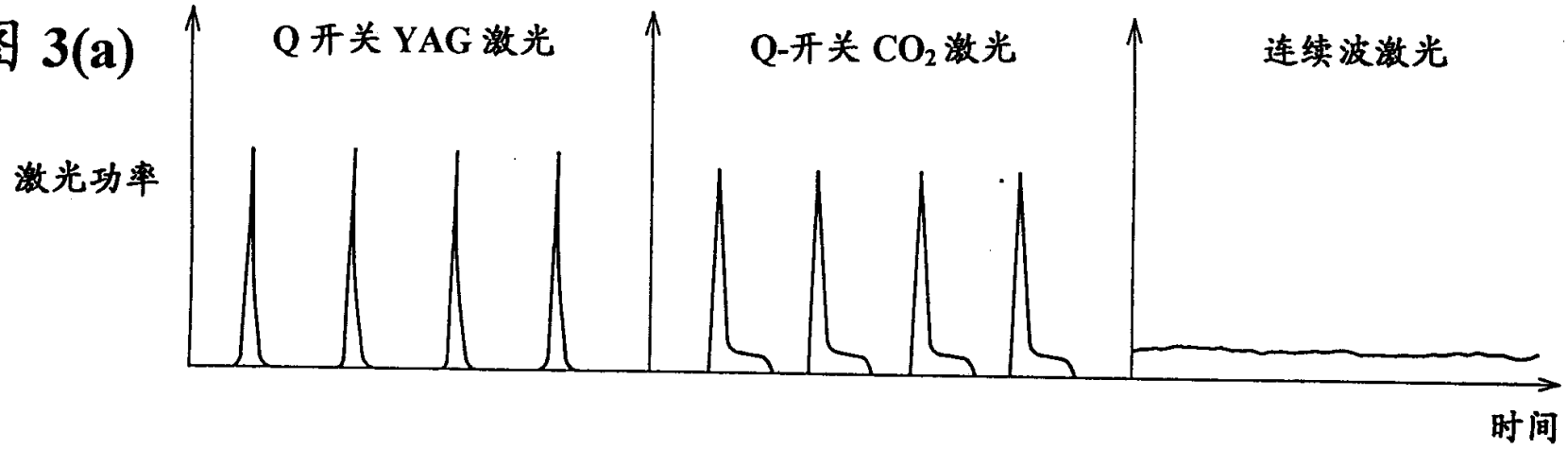


图 3(b)

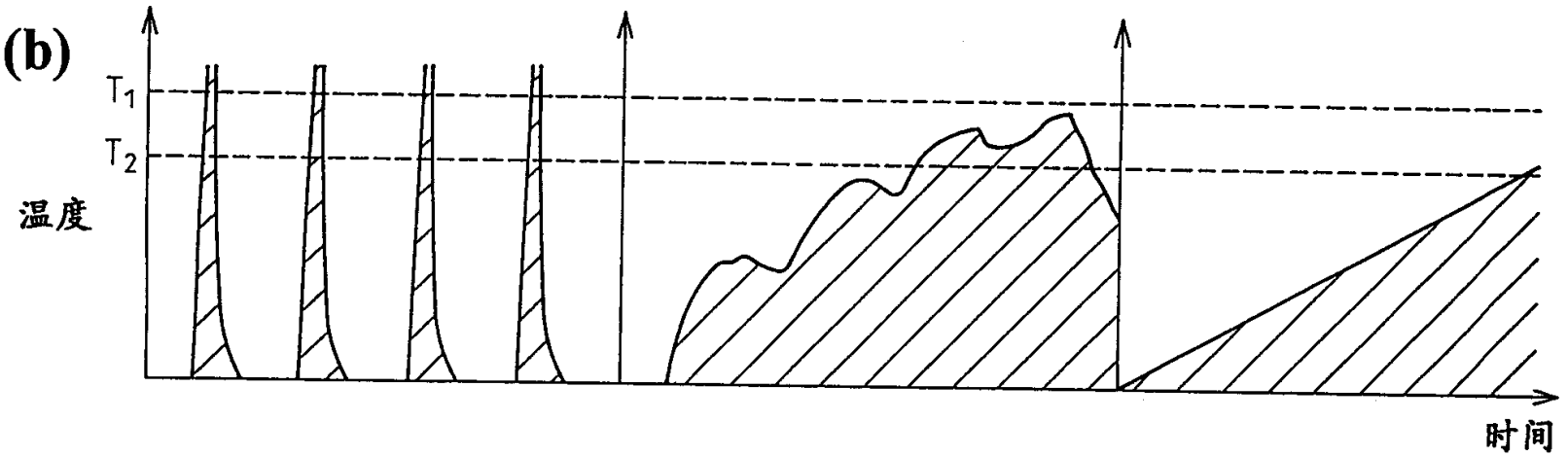


图 4

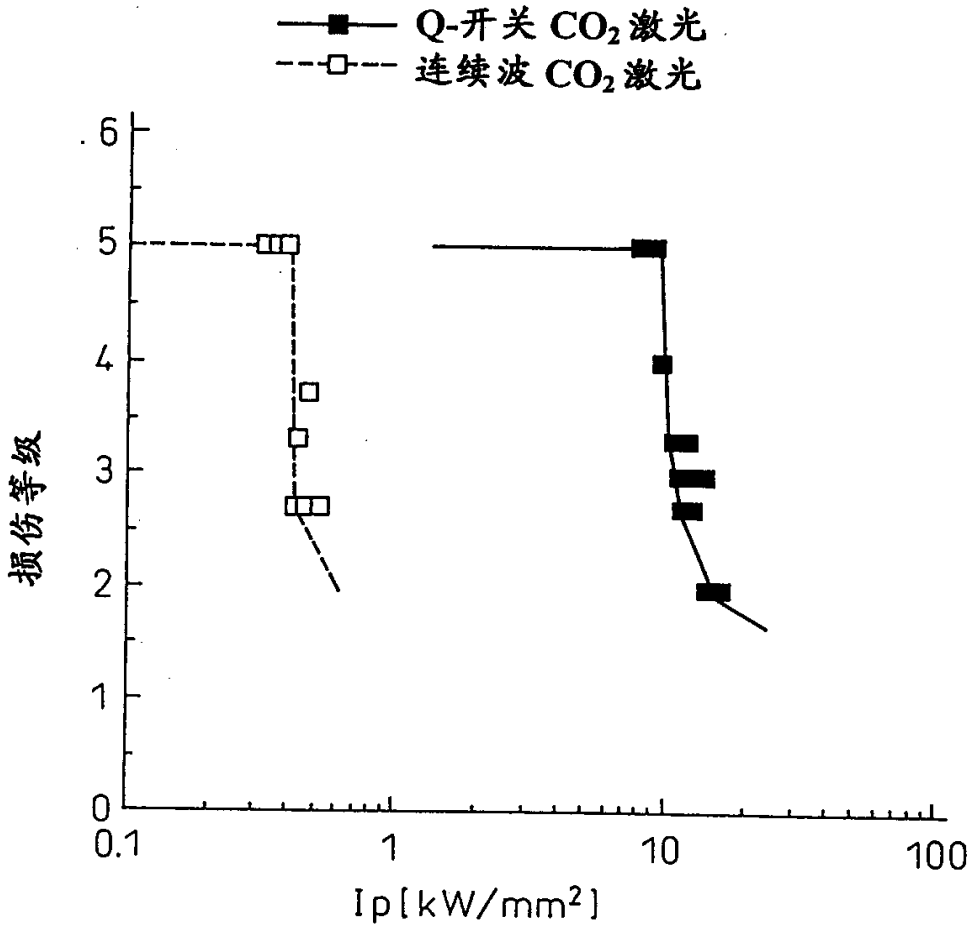


图 5

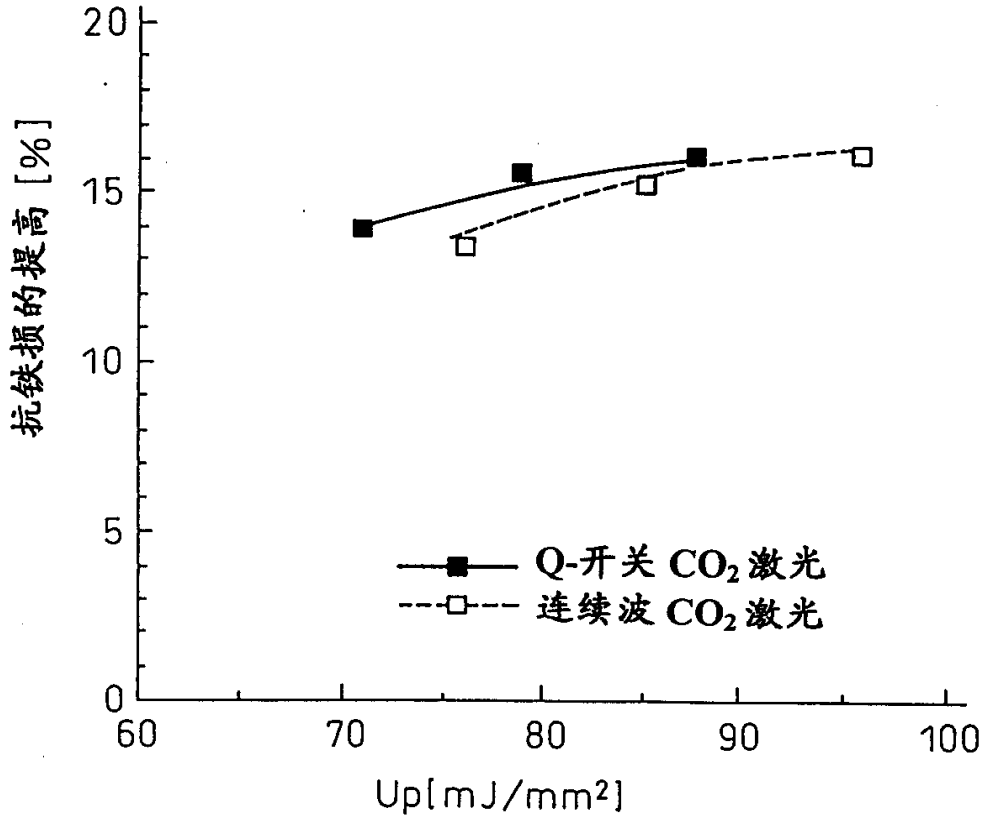


图 6

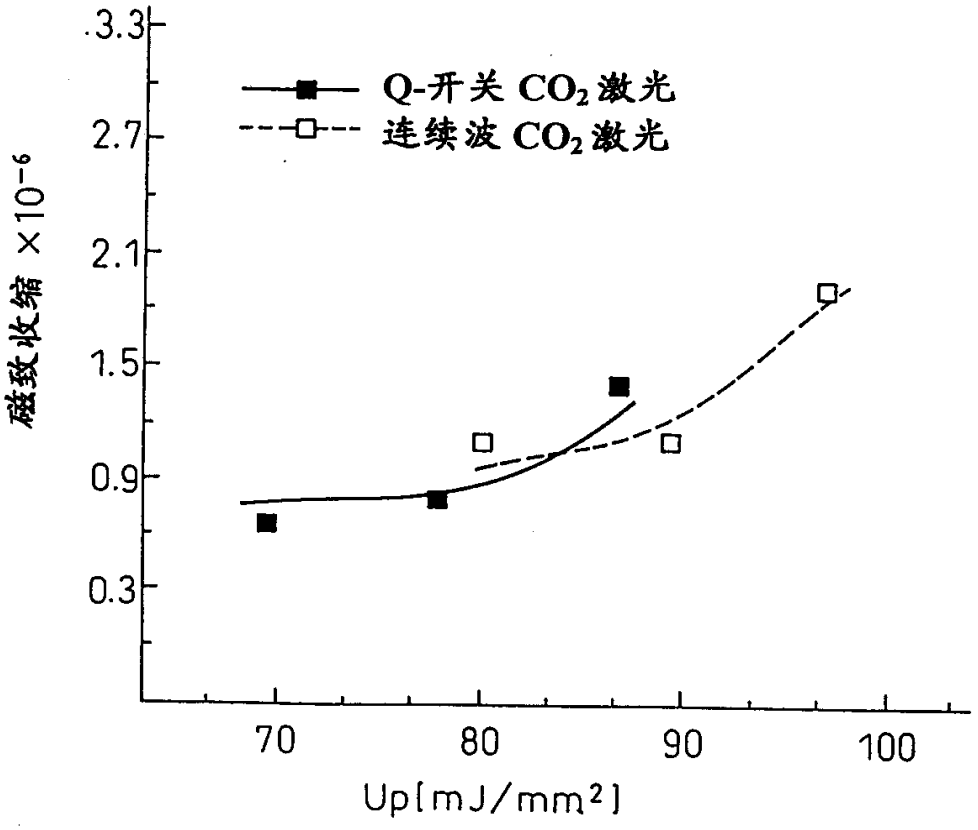

3.3
2.7
2.1
1.5
0.9
0.3
磁致收缩 ×10⁻⁶
Q-开关 CO₂ 激光
连续波 CO₂ 激光
70
80
90
100
Up[mJ/mm²]

图 7

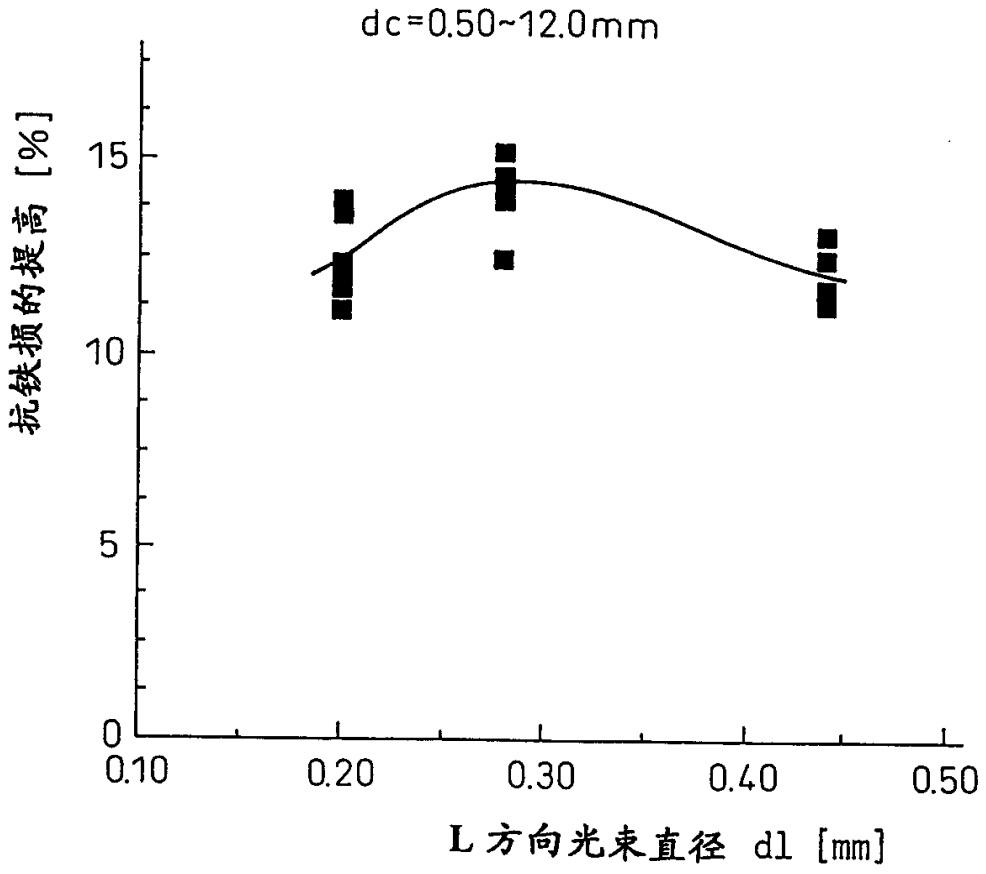


图 8

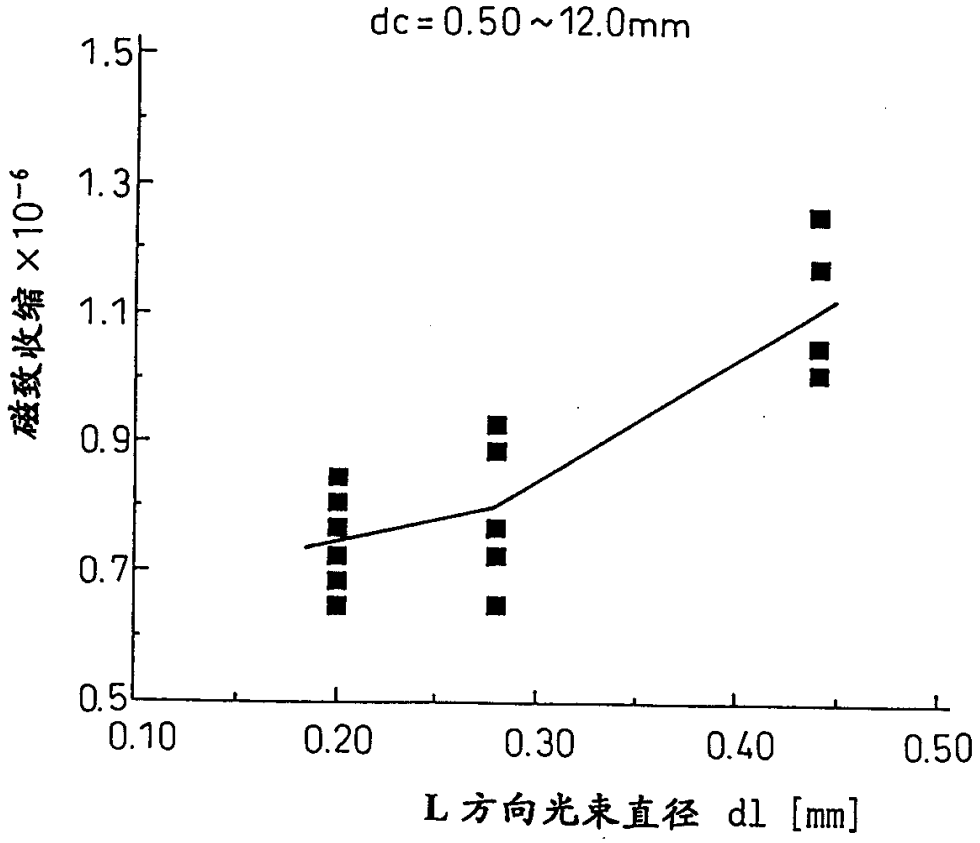

dc = 0.50 ~ 12.0mm
磁致收缩 ×10⁻⁶
1.5
1.3
1.1
0.9
0.7
0.5
0.10
0.20
0.30
0.40
0.50
L 方向光束直径 dl [mm]

图 9

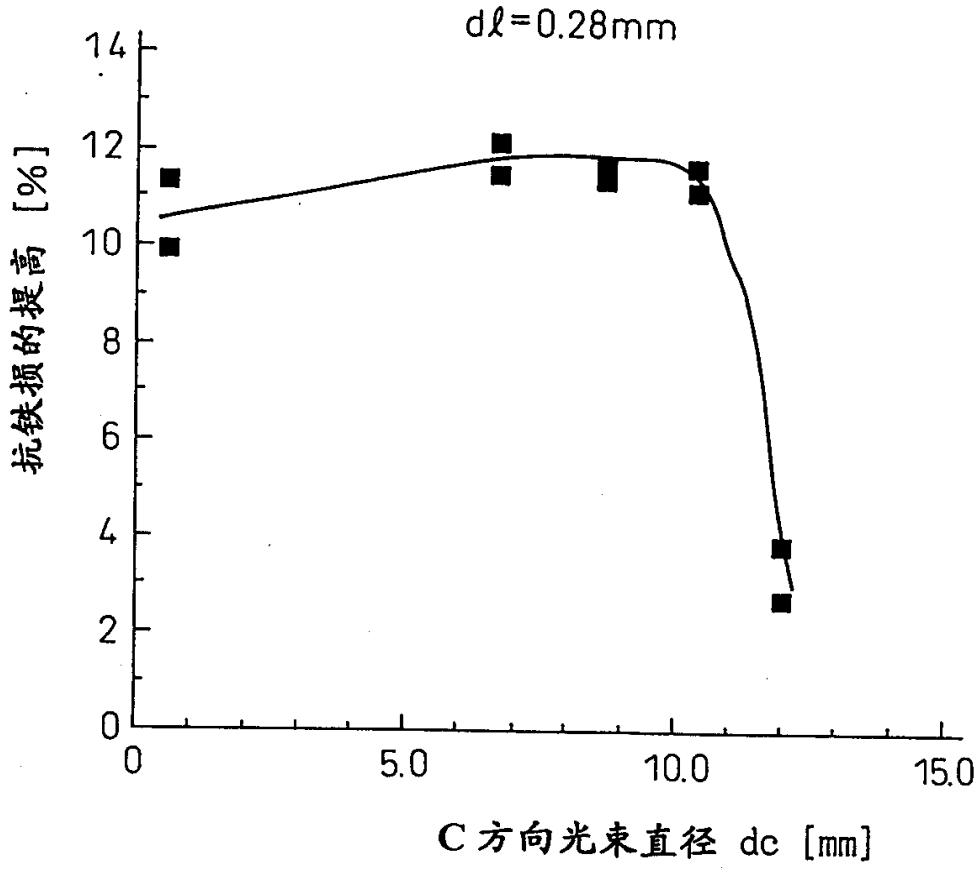


图 10

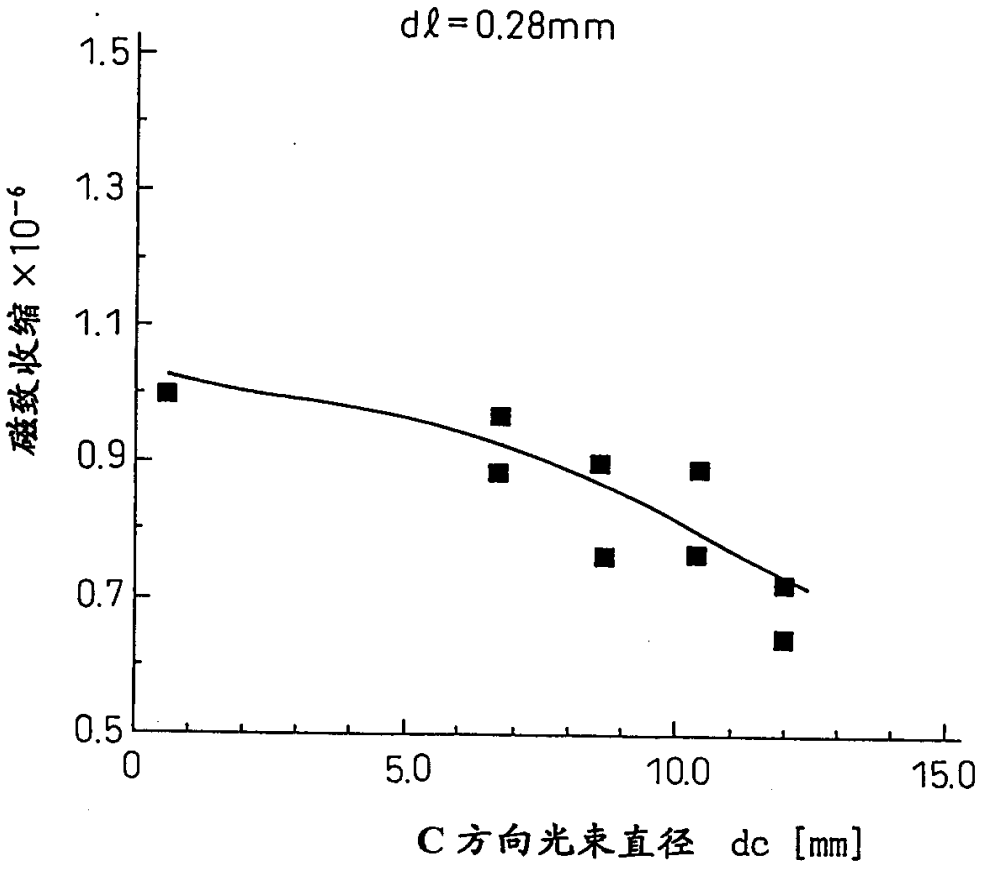


图 11(a)

（现有技术）

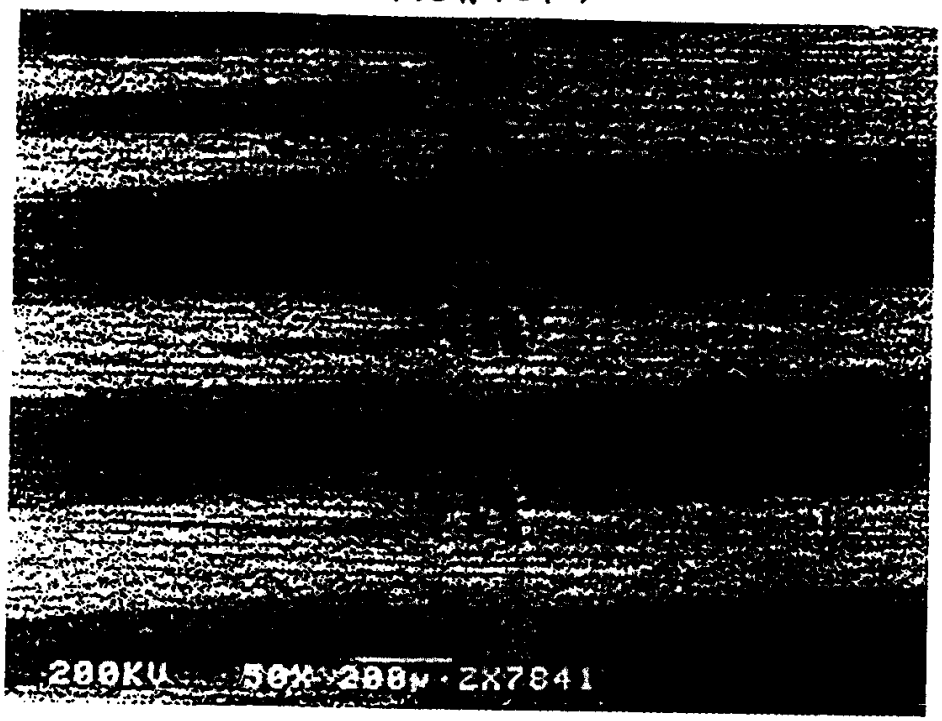


图 11(b)

（本发明）

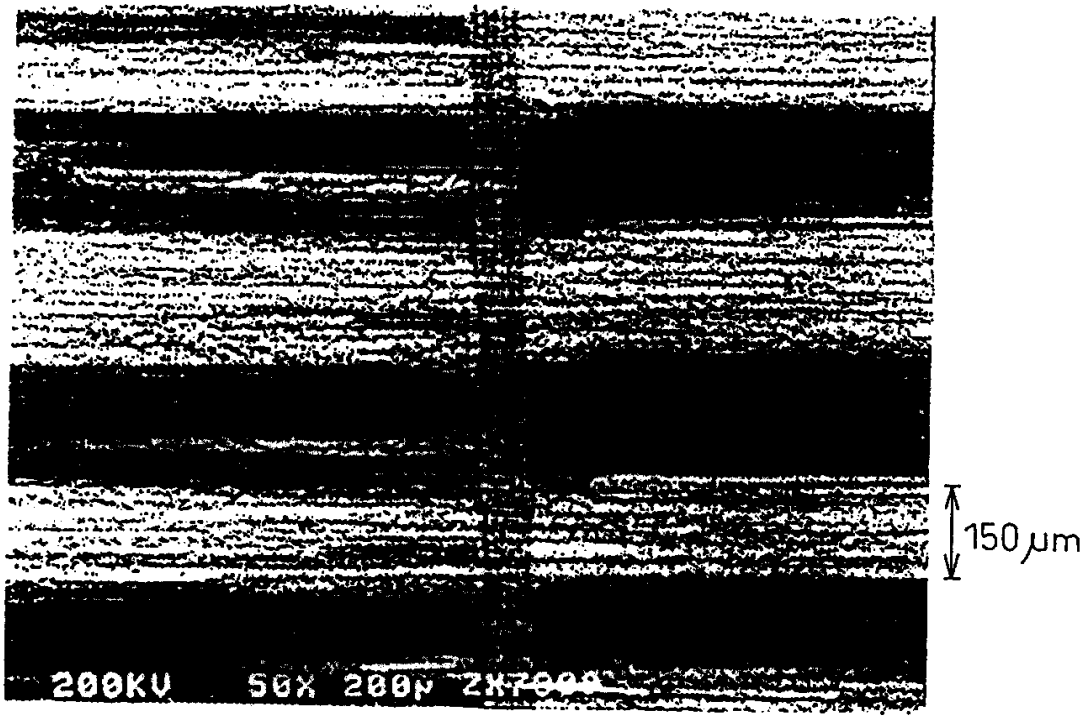


图 12(a)

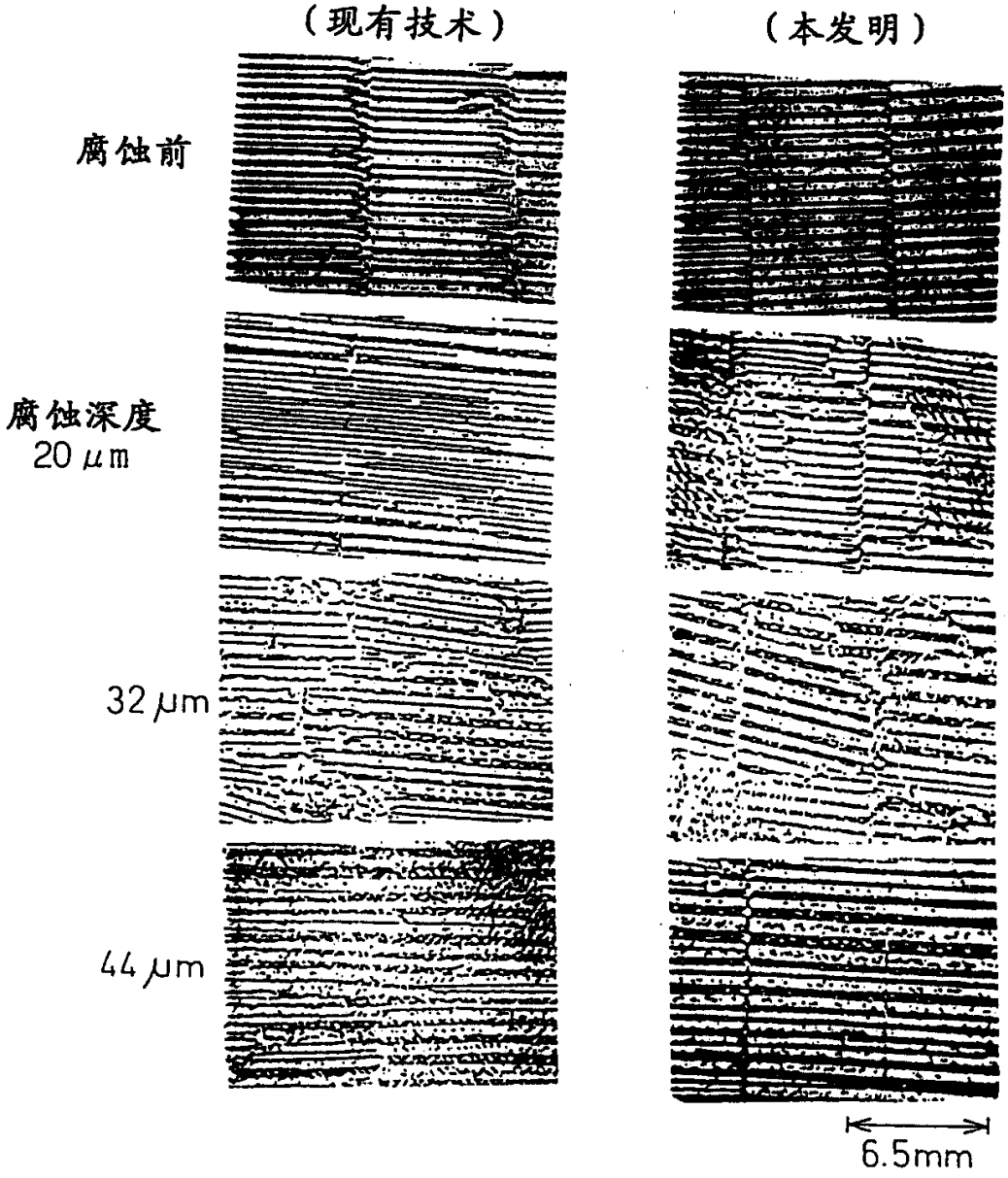


图 12(b)

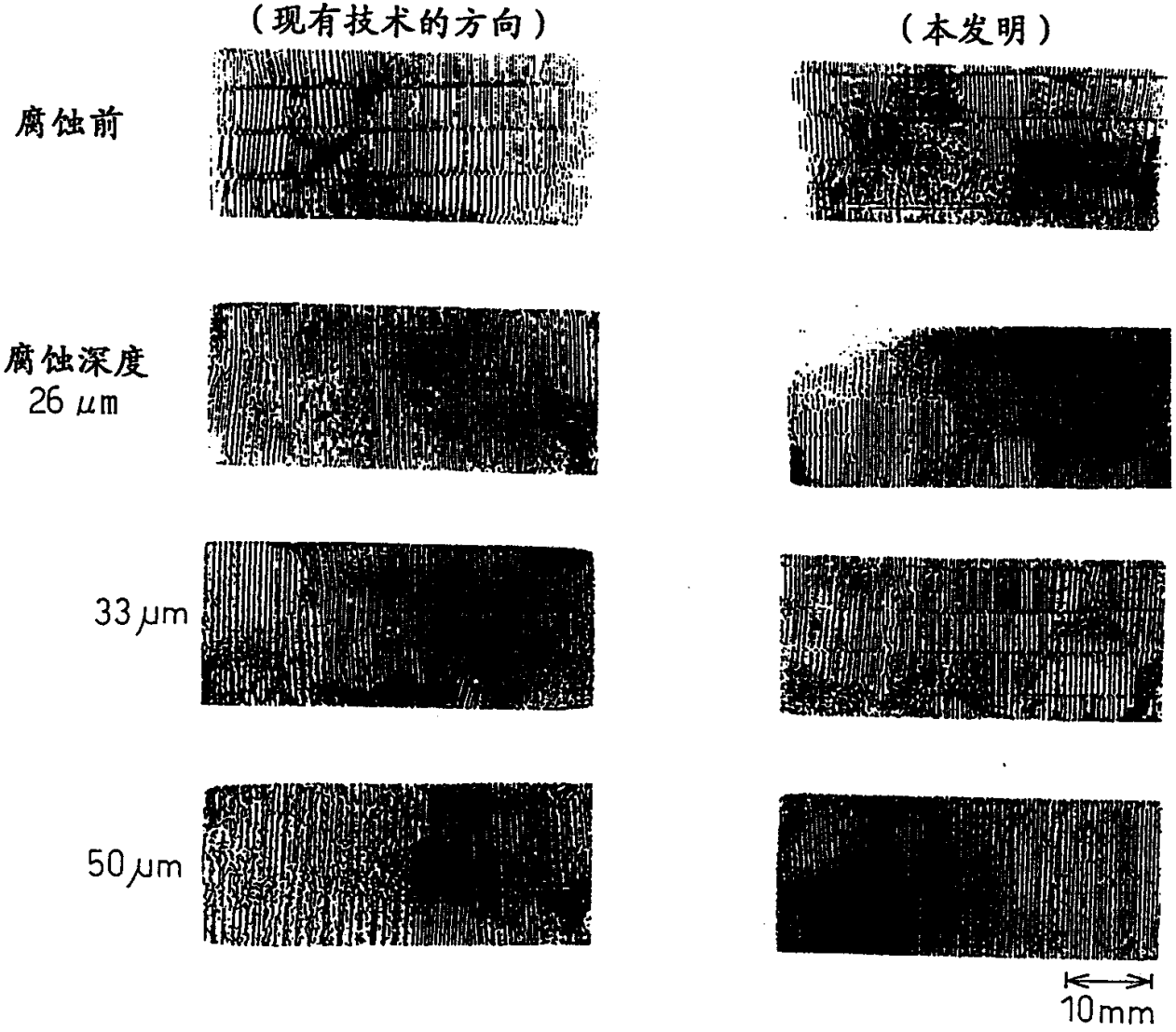


图 13

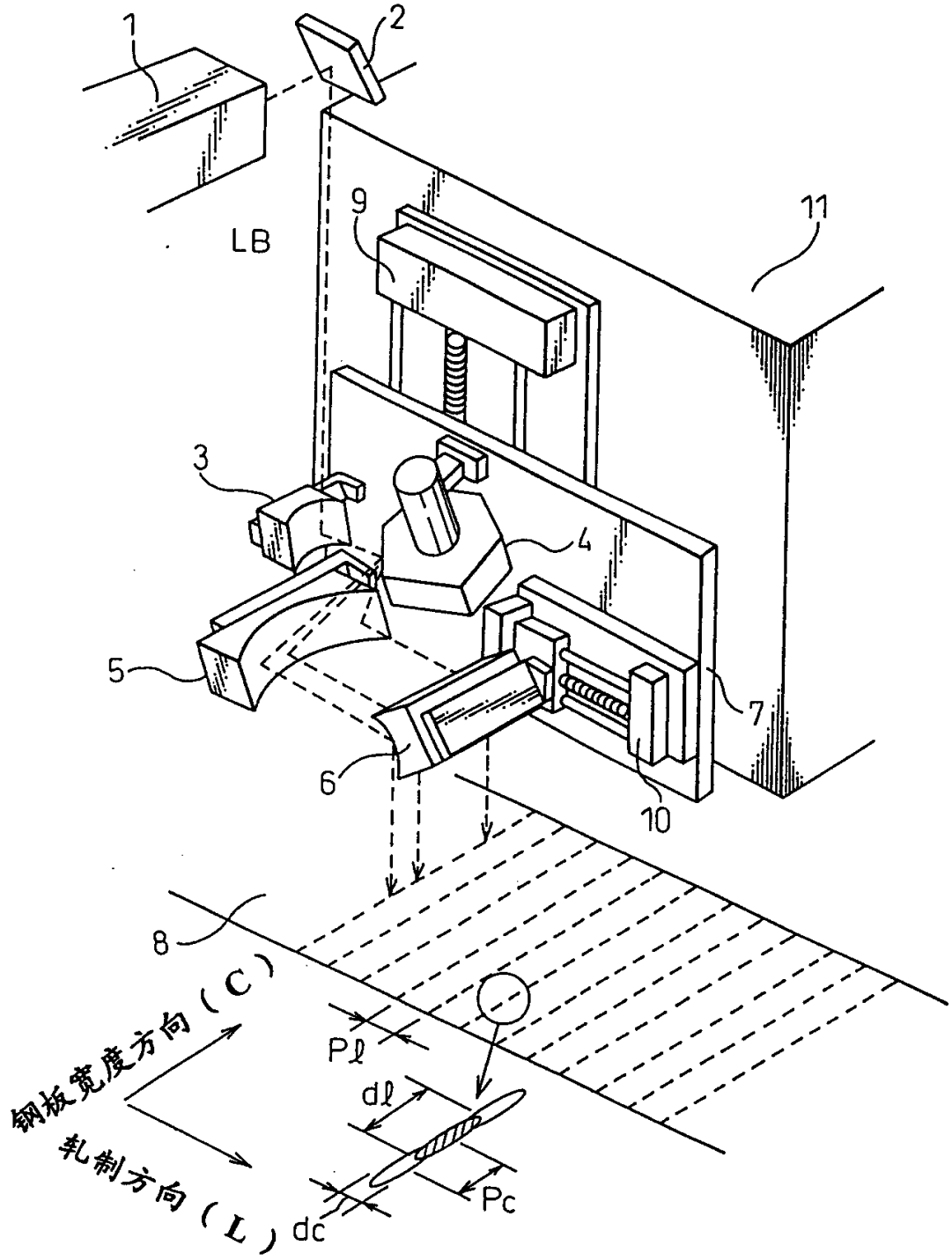


图 14(a)

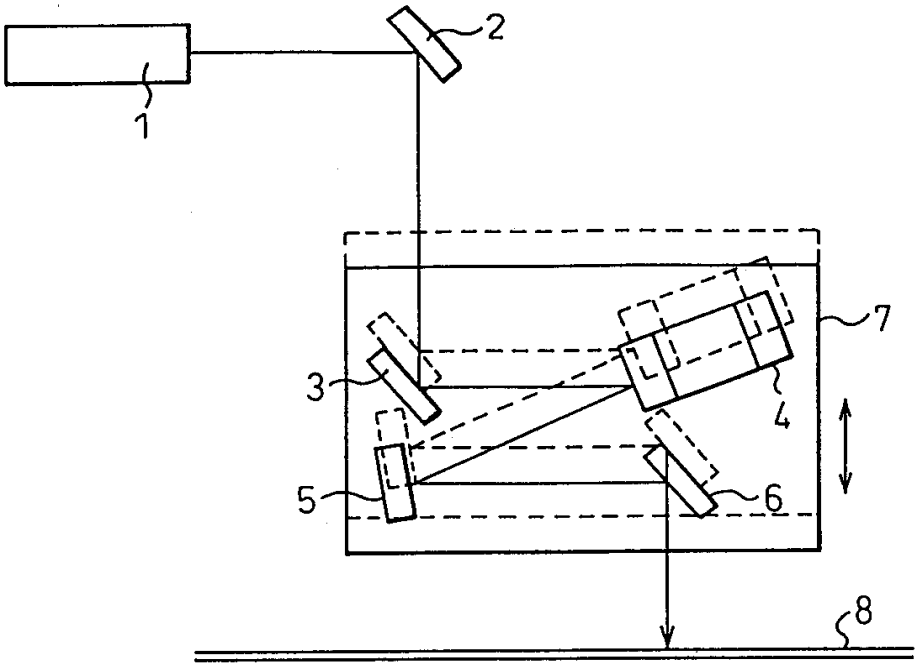


图 14(b)

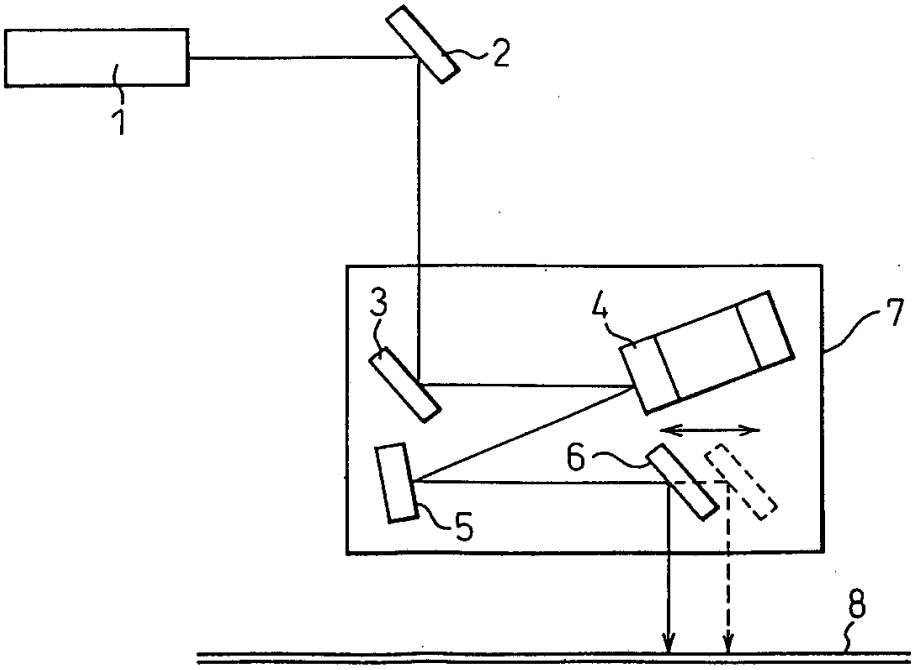


图 15

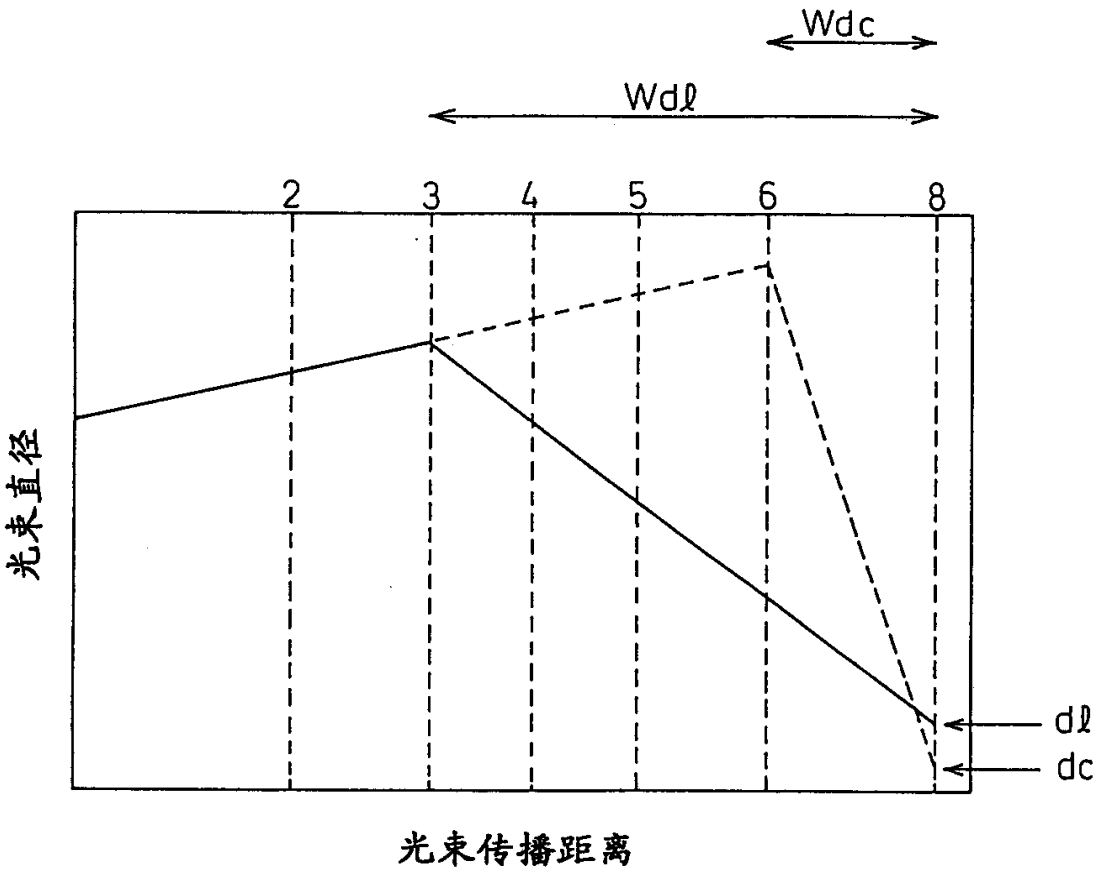


图 16(a)

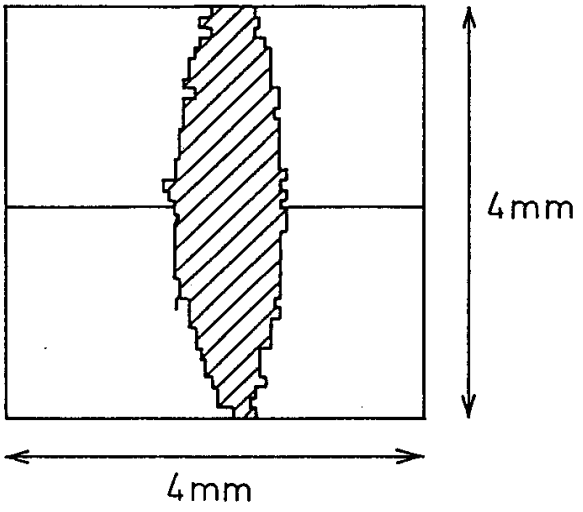


图 16(b)

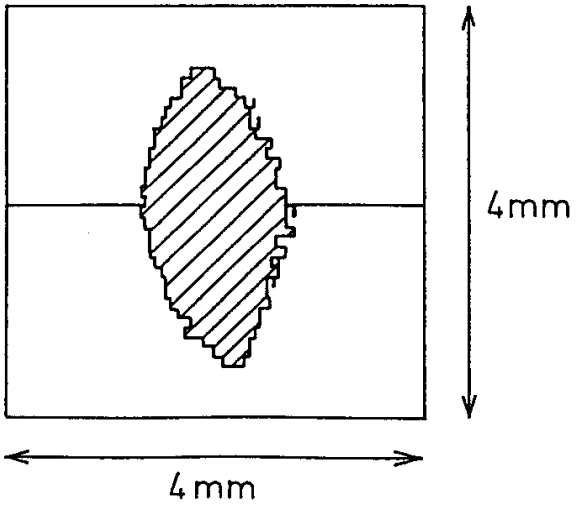


图 17(a)

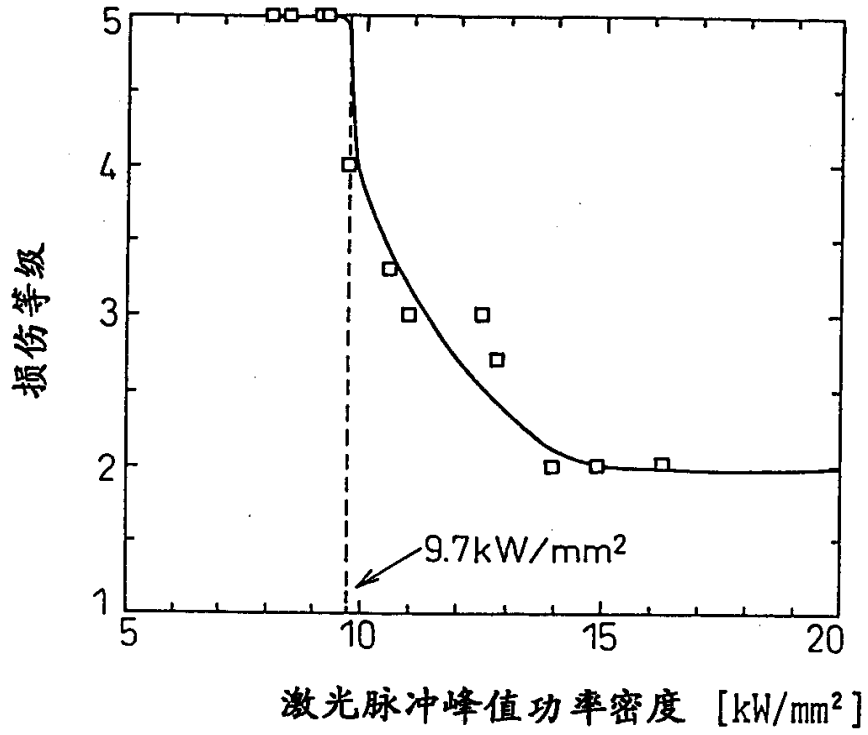
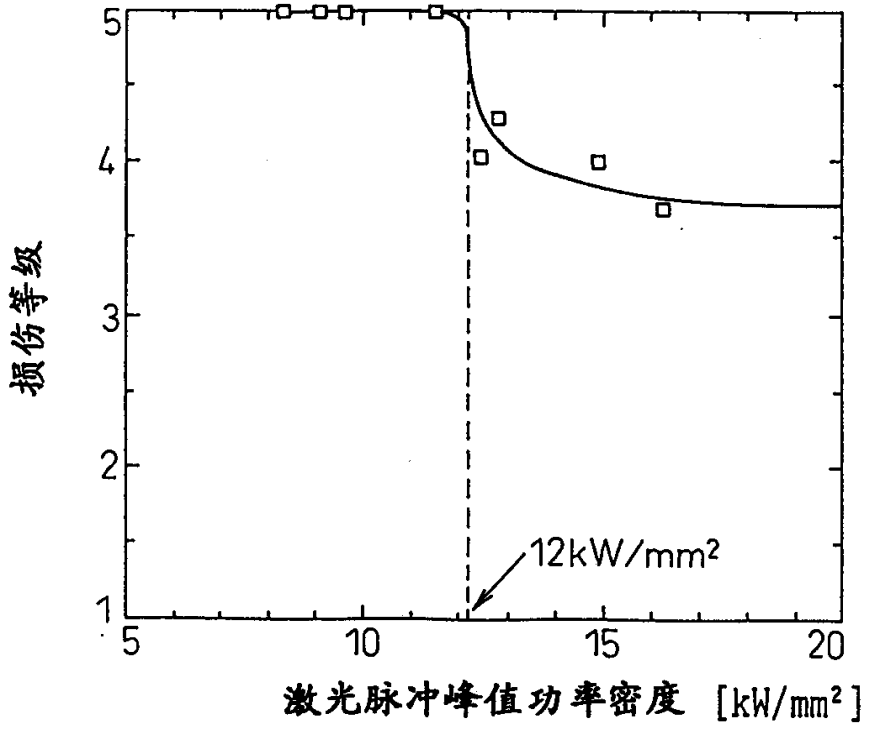

损伤等级
5
4
3
2
1
9.7kW/mm²
5
10
15
20
激光脉冲峰值功率密度 [kW/mm²]

图 17(b)


损伤等级
5
4
3
2
1
12kW/mm²
5
10
15
20
激光脉冲峰值功率密度 [kW/mm²]