

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl⁷

H01S 3/10

G02F 1/37



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 01124582.4

[45] 授权公告日 2005 年 9 月 7 日

[11] 授权公告号 CN 1218449C

[22] 申请日 2001.8.9 [21] 申请号 01124582.4

[30] 优先权

[32] 2000. 8. 9 [33] JP [31] 241787/2000

[71] 专利权人 索尼株式会社

地址 日本东京

[72] 发明人 金田有史

审查员 李 璐

[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

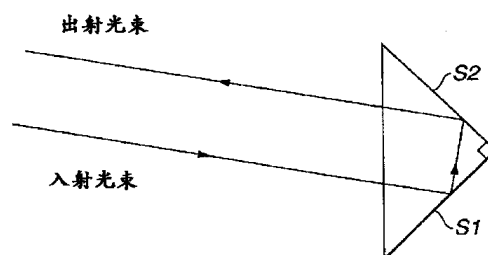
代理人 罗亚川

权利要求书 1 页 说明书 19 页 附图 8 页

[54] 发明名称 激光束产生装置

[57] 摘要

深紫外激光束是一种谐波，它产生于非线性光学部件(101)里面，它在非线性光学部件(101)外面被发射，并且跟作为基波的绿色激光束分隔开。在非线性光学部件(101)的外面被发射的绿色激光束被输入耦合镜(102)所反射，并且再次被施加到非线性光学部件(101)，以便形成针对基波的一条闭合的光路。同样，在非线性光学部件(101)外面被发射的深紫外激光束，被输入耦合镜(102)以外的反射镜(28)所反射，以便从深紫外激光束产生部分(20)发出深紫外激光束。



I S S N 1 0 0 8 - 4 2 7 4

1. 一种激光束产生装置，包括：

用于产生基波的波产生装置；

非线性光学部件，用于接收由波产生装置产生的基波，并且让基波通过一条满足相位匹配条件的光路，由此产生谐波，所述非线性光学部件具有多个内部全反射平面，同时它被配置成：按照与被施加到非线性光学部件的基波的轴相交的方向，发射在内部全反射平面上被顺序地反射的基波，以及借助于在非线性光学部件中的双折射以及在内部全反射各平面上的内部全反射，发射在内部全反射各平面上被顺序地反射的谐波，上述谐波在空间上偏离于基波；

波反射装置，设置在被施加到非线性光学部件的基波的轴与从非线性光学部件发射的基波的轴的交点上，用以反射从非线性光学部件发射的基波，并将该基波再次施加到该非线性光学部件；以及

谐波反射装置，用于反射从非线性光学部件发出的、并且在空间上偏离于基波的谐波，由此从激光束产生装置发出谐波。

2. 根据权利要求1所述的激光束产生装置，其中，该谐波是连续的深紫外激光束。

3. 根据权利要求1所述的激光束产生装置，其中，该非线性光学部件包括一块BBO晶体。

4. 根据权利要求1所述的激光束产生装置，其中，该非线性光学部件具有一个平面，基波被施加到该平面，并且它与被施加到非线性光学部件的基波的轴之间的倾角约为一个布鲁斯特角。

激光束产生装置

本发明涉及激光束产生装置，它借助于非线性光学部件，对输入光束进行波长变换，并且发射特定波长的激光束。

用光学谐振器对输入光束进行波长变换，由此产生基波的二次谐波，这种技术已为人们所熟知。另一种技术也是人们熟知的，在其中，不同波长的光束被混频，由此发出所需波长的激光束。（见 A. Ashkin, G. D. Boyd, 和 J. M. Dziedzic 等人所写的“谐振法光学二次谐波的产生与混频”一文，该文发表于《IEEE J. Quant. Electron.》，Vol. QE-2, pp. 109-124, 1966）。

利用这样一种技术来发射波长为 266 nm 的深紫外激光束的激光束产生装置已经投入实际使用。这种激光束产生装置使用绿色激光束作为基波。它包括一个光学谐振器，其中含有非线性光学部件，后者是一块 BBO（ β -硼酸钡： β -BaB₂O₄）晶体。绿色激光束被施加到光学谐振器，并在光学谐振器中发生谐振，由此产生深紫外激光束，即，二次谐波。激光束产生装置被用来作为一种高效的光源，例如用于激光显微镜之中。

激光束产生装置包括一个光学谐振器，它改变输入光束的波长。光学谐振器具有光能损耗。即使光能损耗只增加一点点，波长变换效率也会大大降低。因而，光学谐振器的输出将成比例地降低。为了有效地使用激光束产生装置，重要的是在谐振腔中减少光能损耗的增加，由此改进激光束产生装置的可靠性。

为了在任何光学谐振器中减少光能损耗的增加，重要的是避免脏物停留在构成光学谐振器的各种光学部件的表面上。众所周知，每一个光学部件上的脏物都是空气中杂质的沉积物，例如硫酸铵，它形成于被二次谐波（即，深紫外激光束）所照射的部件的表面上。空气中杂质是如何沉积到各光学部件上面去的现在还没有搞清楚。然而，脏

物被认为是由深紫外激光束引起的化学反应所导致的。这是因为，杂质仅沉积在每一个部件中被深紫外激光束照射的那一部分上面。

被纳入上述激光束产生装置的光学谐振器具有一块 BBO 晶体，作为非线性光学部件。之所以使用几乎是一块矩形平板的 BBO 晶体，是因为它容易加工。绿色激光束，或者基波，被施加到 BBO 晶体。在 BBO 晶体中，绿色激光束通过满足相位匹配条件的光路。激光束就立即从 BBO 晶体发射出来。随着绿色激光束通过 BBO 晶体中的光路，就从绿色激光束产生二次谐波，即深紫外激光束。深紫外激光束从 BBO 晶体发出，并且沿着几乎相同于绿色激光束（即，基波）的光轴行进。

在 BBO 晶体中行进的绿色激光束和深紫外激光束二者，被施加到位于它们的共同光轴上的一个反射器。该反射器对绿色激光束（即，基波）具有高的反射率，同时对深紫外激光束（即，二次谐波）具有高的透过率。反射器反射绿色激光束，后者又被其他反射器进一步地反射，并且被返送回 BBO 晶体。另一方面，深紫外激光束则通过反射器，并且最后从光学谐振器发射出去。

由于深紫外激光束引起的化学反应，诸如硫酸铵那样的杂质可能沉积在反射器上通过深紫外激光束的那一部分上面。（要注意的是，这个反射器被安装在绿色激光束与深紫外激光束的共同光轴上面，以上两种激光束都在 BBO 晶体中行进）。由于绿色激光束在反射器的所述部分被反射，所以这样的杂质沉积导致基波，即绿色激光束，能量的减少。

为了避免杂质的沉积，在激光束产生装置的生产过程中采取了下列措施。首先，在组装光学谐振器之前，不仅构成光学谐振器的各光学部件，而且用于支撑各光学部件的各机械零件都要彻底地进行清洗。还有，光学谐振器在壳体内组装完毕之后，要连续地将干燥、清洁的空气施加到激光束产生装置的壳体里面。

虽然采取了这些措施，仍然不能完全避免杂质沉积在反射器上面，该反射器被安装在行进于 BBO 晶体之中的绿色激光束和深紫外激光束的共同光轴之上。这就不可避免地增加了属于基波的光能损耗。因而，

在某些情况下，波长变换效率大为降低，由此导致激光束产生装置输出的降低。

已经提出的本发明着眼于上述问题。本发明的一个目标就是提供一种激光束产生装置，在其中，杂质沉积在光学部件表面上的问题得以有效地避免，因此，能避免属于基波的的光能损耗的增加，能发出稳定而强烈的激光束，并且具有高的可靠性。

根据本发明的激光束产生装置包括：

波产生装置，非线性光学部件，波反射装置，以及谐波反射装置。波产生装置产生基波，非线性光学部件接收由波产生装置产生的基波，并且让基波通过一个满足相位匹配条件的光路，由此产生谐波。非线性光学部件具有多个内部全反射平面。它按照与被施加到非线性光学部件的基波的轴相交的方向，发射在内部全反射各平面上顺序地被反射的基波。还有，它通过利用在非线性光学部件的双折射以及在内部全反射平面的内部全反射，发射在内部全反射平面上被顺序地反射的谐波，上述谐波在空间上偏离于基波。波反射装置被安装在施加到非线性光学部件的基波的轴与从非线性光学部件发射的基波的轴的交点上，波反射装置反射从非线性光学部件所发射的基波，并将该基波再次施加到该非线性光学部件。谐波反射装置反射从非线性光学部件发出的、并且在空间上偏离于基波的谐波，由此从激光束产生装置发出谐波。

在激光束产生装置中，波产生装置产生基波。基波被施加到非线性光学部件。在该部件中，基波在内部全反射各平面上被顺序地反射。这样反射的基波从非线性光学部件中发出，其轴与被施加到非线性光学部件的基波的轴相交。波反射装置被安装在被施加到非线性光学部件的基波的轴与从非线性光学部件发出的基波的轴的交点上。它反射从非线性光学部件发出的基波。经过这样的反射之后，基波被再次地施加到该非线性光学部件。因此，就形成了针对基波的闭合光路。因此，就提供了一个光学谐振器。

随着基波在非线性光学部件中沿着满足相位匹配条件的光路中行

进，就从基波中产生二次谐波。该谐波在内部全反射各平面上被顺序地反射，并从非线性光学部件中发出。由于在非线性光学部件中的双折射，以及在内部全反射平面上的内部全反射，它在空间上跟基波分隔开。谐波反射装置反射从非线性光学部件发出的谐波。随后，从激光束产生装置发射该谐波。

在激光束产生装置中，由于从非线性光学部件中发出的基波和谐波二者在空间上是互相分隔的，所以就有可能不把谐波施加到反射基波的波反射装置上。因此，不会发生化学反应，也不会在反射基波的装置上沉积各种杂质，这些杂质可能是由这样的化学反应产生的。这就可靠地避免了在波反射装置上的光能损耗。

在根据本发明的激光束产生装置中，非线性光学部件中产生并发射谐波，它在空间上偏离于被施加到该非线性光学部件的基波。因此，就有可能不把谐波施加到波反射装置。不发生化学反应，若把谐波施加到波反射装置，则会发生化学反应。也没有因化学反应而产生的杂质沉积到波反射装置上。因此，激光束产生装置能获得高的波长变换效率。

图 1 是立方角反射器的侧视图；

图 2 是类似于立方角反射器的棱镜的侧视图；

图 3 是一份图，表示一个光学谐振器，它包括一个非线性光学部件以及一块输入耦合镜；

图 4 是光学谐振器的一份图，表示产生于非线性光学部件的深紫外激光束如何从非线性光学部件发射出去，并且跟作为基波的绿色激光束分隔开；

图 5 是一份图，表示当光线以正数值的入射角施加到非线性光学部件之上时，深紫外激光束是如何跟绿色激光束分隔开的；

图 6 是一份图，表示当光线以负数值的入射角施加到非线性光学部件之上时，深紫外激光束是如何跟绿色激光束分隔开的；

图 7 是一份图，用以说明将深紫外激光束跟绿色激光束分隔开的优选的光学设计；

图 8A 是非线性光学部件的侧视图，它具有一个输入/输出平面，该平面与施加到该光学部件的绿色激光束的轴之间的倾角约为一个布鲁斯特（Brewster）角；

图 8B 是图 8A 所示的非线性光学部件的底视图；

图 9 是根据本发明的激光束产生装置的概略表示；

图 10 表示另一种类型的非线性光学部件，它具有一个发射深紫外线光束的输入/输出平面，该平面与深紫外线光束的轴之间的倾角约为一个布鲁斯特角。

下面，将参照诸附图，对本发明的各优选实施例进行说明。

根据本发明的激光产生装置具有一个非线性光学部件，它进行波长变换，由此产生谐波。谐波从非线性光学部件输出，并与基波分隔开。

在叙述激光产生装置之前，先说明本发明的基本概念。

假定一根光束通过具有折射率 n_1 的介质，并且该光束以大于一个特定数值的入射角被施加到具有折射率 n_0 的另一种介质。在这种情况下，该光束发生全反射，不通过介于两种介质之间的界面。这种现象被称为“内部全反射”。内部全反射被用于称为“立方角反射器”的光学部件上。如图 1 所示，立方角反射器具有两个内部全反射平面 S1 和 S2。表面 S1 和 S2 定义了一个 90° 的顶角。被施加到立方角反射器的光束首先被反射平面 S1 全反射，然后被反射平面 S2 全反射。被表面 S2 反射之后，光束按照平行并相反于它投射到立方角反射器的方向从立方角反射器发射出去。立方角反射器被用来作为道路防护栏杆或自动灯光反射器。

如图 2 所示，考虑这样一块棱镜，它类似于上述的立方角反射器，但是具有小于 90° 的顶角。如同从图 2 所看到的那样，光束在从棱镜发射出去之前，在棱镜中被反射两次，首先被内部全反射表面 S1 反射，然后被内部全反射表面 S2 反射。输出光束的轴与输入光束的轴相交。可以在输入光束与输出光束相交处，放置一块输入耦合镜。在这种情况下，就形成了一条闭合的光路，提供一个光学谐振器。组成具有两

个内部全反射平面 S1 和 S2 以及一块输入耦合镜，由此形成一个光学谐振器的技术在业界中是众所周知的。使用这样一种光学谐振器来进行非线性波长变换，由此从基波产生二次谐波的技术在业界中同样是众所周知的。（参考 D. C. Gerstenberger, G. E. Tye, 和 R. W. Wallace 等人合写的“通过将频率锁定于单片环形倍频器来有效地实现连续波单频 Nd:YAG 激光器的光的二次谐波变换”一文，该文发表于《光学通讯》，1991 年，第 16 卷，第 992—994 页。）

具有上述结构的光学谐振器可以被用来产生深紫外线激光束。光学谐振器的棱镜（非线性光学部件）由例如 BBO（ β -硼酸钡： β -BaB₂O₄）晶体制成是最好的。跟大多数用于紫外区域的其他晶体相比，BBO 晶体表现出较高的非线性。该晶体在宽波长范围内进行显著的双折射并能获得相位匹配。借助于这种非线性波长变换，它已经被用来产生深紫外激光束。

特别是，近年来激光束产生装置已经投入实际应用。在激光束产生装置中，从 Nd:YAG 激光器或 Nd:YVO₄ 激光器发射绿色激光束（波长 532 nm）或者激光束的二次谐波。绿色激光束被施加到具有 BBO 晶体的光学谐振器，该光学谐振器产生深紫外线光束（波长 266 nm），它是绿色激光束的二次谐波。

在这种激光束产生装置中，绿色激光束，或者基波，被施加到 BBO 晶体。在 BBO 晶体中，激光束在跟晶体的轴 c 倾斜 47.5° 的光路中行进。在 BBO 晶体中行进绿色激光束（正常光线）以及深紫外激光束（非常光线）在相速度的意义上实现匹配。换句话说，它们进行相位匹配。因此，绿色激光束（即基波）的能量，被有效地变换为深紫外激光束（即二次谐波）的能量。

图 3 的光学谐振器 100 由用 BBO 晶体制成的非线性光学部件构成，其中产生了诸如棱镜那样的内部全反射，输入耦合镜将在下文中加以说明。

BBO 晶体具有大约 1.674 的折射率 n_1 。由于空气的折射率 n_0 为 1，所以在非线性光学部件 101（即 BBO 晶体）中，光束发生全反射

的临界角 θ_c 为约为 36.7° ，如下面的方程式（1）所示：

$$\theta_c = \sin^{-1} n_0/n_1 \quad \dots (1)$$

因此，若非线性光学部件 101 具有接近 90° 的顶角 α_0 ，并且若绿色激光束以最多为大约 52° 的角度被施加到内部全反射平面 S2，则绿色激光束将以等于或大于该临界角的角度被施加到该内部全反射平面 S2。在这种情况下，绿色激光束在它从非线性光学部件 101 中发出之前，就在两个内部全反射平面 S1 和 S2 处发生全反射。可以在输入绿色激光束与输出绿色激光束相交处，放置一块输入耦合镜 102。这样一来，非线性光学部件 101 以及输入耦合镜 102 就构成一条闭合光路，提供光学谐振器 100。

输入的绿色激光束在光学谐振器 100 的非线性光学部件 101 中通过 3 条光路行进，直到它从该非线性光学部件 101 中发射出去为止。首先，光束沿着第 1 光路 P1 行进，直到它被第 1 内部全反射平面 S1 全反射为止。然后，它沿着第 2 光路 P2 行进，直到它被第 2 内部全反射平面 S2 全反射为止。最后，它沿着第 3 光路 P3 行进，直到它从非线性光学部件 101 中发射出去为止。

第 1 光路 P1 可以倾斜于 BBO 晶体的轴 c 大约 47.5° ，这样就满足了相位匹配条件。如果这样的话，当绿色激光束沿着第 1 光路 P1 在非线性光学部件 101 中传播时将产生深紫外激光束，它是绿色激光束的二次谐波。在首先被第 1 内部全反射平面 S1 随后被第 2 内部全反射平面 S2 反射之后，如此产生的深紫外激光束在部件 101 中发射出去。从部件 101 发射的深紫外激光束在一条与绿色激光束（即，基波）隔开的路径中行进，如图 4 所示。这是因为深紫外激光束在非线性光学部件 101 中已经经过两次折射，并且已经被反射两次，首先在内部全反射平面 S1，然后在内部全反射平面 S2。

若第 2 光路 P2 满足相位匹配条件，就有可能在绿色激光束通过第 2 光路 P2 时产生深紫外激光束。同样有可能从非线性光学部件 101，通过一条跟从部件 101 发出的绿色激光束隔开的路径来发射深紫外激光束。然而，在这种情况下，跟第 1 光路 P1 满足相位匹配条件的情况

相比, 深紫外激光束将在更大程度上偏离绿色激光束。

如上所述, 在非线性光学部件 101 中产生的深紫外激光束从部件 101 被发射出去, 并在空间上偏离于绿色激光束。输入耦合镜 102 以外的反射绿色激光束的镜也反射从部件 101 发射的深紫外激光束。在不施加到输入耦合镜 102 的前提下, 深紫外激光束也可以从光学谐振器 100 发出。

下面, 将在假定绿色激光束在非线性光学部件 101 (即, BBO 晶体) 中发生全反射的入射平面包含 BBO 晶体的轴 c 的基础上, 来说明深紫外激光束 (即, 绿色激光束的二次谐波) 是如何从空间上偏离绿色激光束 (即基波) 的。

作为基波的绿色激光束是正常光线。它沿着垂直于 BBO 晶体的轴 c 的方向被极化。因此, 相对于内部各全反射平面而言, 它通常是一根“s-极化束”。换句话说, 当绿色激光束在非线性光学部件 101 中, 首先从内部全反射平面 $S1$, 随后从内部全反射平面 $S2$ 被反射时, 入射角等于反射角的正常的反射定律是成立的。

与此相对照, 作为绿色激光束的二次谐波的深紫外激光束是一根非常光线。当深紫外激光束在非线性光学部件 101 中, 首先从内部全反射平面 $S1$, 随后从内部全反射平面 $S2$ 被反射时, 正常的反射定律是不成立的。这是因为深紫外激光束在每一个内部全反射平面上都经过双折射。如图 5 所示, 介于光束入射到全反射平面 $S1$ 的光轴以及 BBO 晶体的轴 c 之间的角度 θ_1 不同于介于从全反射平面 $S1$ ($S2$) 所反射的光束以及 BBO 晶体的轴 c 之间的角度 θ_2 。其结果是, 入射到平面 $S1$ ($S2$) 的光束以及从平面 $S1$ ($S2$) 反射的光束, 在折射率和相速度方面是不同的。要注意的是, 图 5 所示的 Ψ_1 和 Ψ_2 分别是入射角和反射角。而且, 图 5 所示的 Φ 是介于平面 $S1$ ($S2$) 的法线以及 BBO 晶体的轴 c 之间的角度。

为了预报双折射的特性, 需要进行某些计算。在计算中应当满足的边界条件是, 矢量 k (波的法线) 具有在全反射平面 $S1$ ($S2$) 上的分量, 他们彼此相等。因此, 图 5 所示的在平面 $S1$ ($S2$) 上的双折射

可以由下列方程式 (2) 和 (3) 给出:

$$n(\theta_1) \sin(\Psi_1) = n(\theta_2) \sin(\Psi_2) \dots (2)$$

$$n(\theta_1) \sin(\theta_1 - \Phi) = n(\theta_2) \sin(\theta_2 - \Phi) \dots (3)$$

因此, 绿色激光束, 即从内部全反射平面 S1 (S2) 全反射的基波具有特定角度的矢量 k 以及深紫外激光束, 即二次谐波, 具有另一个矢量 k , 其角度不同于绿色激光束的矢量 k . 由于在每一个内部全反射平面上都发生双折射, 所以从部件 101 发射的深紫外激光束在空间上偏离绿色激光束. 还由于 BBO 晶体中的双折射的离散效应, 使得绿色激光束和深紫外激光束被进一步地互相分隔开.

为了确定绿色激光束 (即, 基波) 和深紫外激光束 (即, 二次谐波) 在多大程度上被分隔开, 我们需要考察在光学谐振器 100 里面的光路. 这里所涉及的自由变量就是 BBO 晶体的交互作用时间, 光束在到达 BBO 晶体之前在光学谐振器 100 中行进的距离, 光束从 BBO 晶体发射之后, 在光学谐振器 100 中的行进距离, 非线性光学部件 101 的顶角 α_0 , 以及入射到第 1 内部全反射平面 S1 的入射角 Ψ_1 .

介于第 1 光路 P1 以及 BBO 晶体的轴 c 之间的角度 (θ_1) 是一个常数 (大约 47.5°). 被施加到非线性光学部件 101 的光束的方位角等于从部件 101 发射的光束的方位角. 激光束在光学谐振器 100 中行进的光路取决于角度 (θ_1) 以及施加到部件 101 并且从该部件 101 发射的光束的方位角. 光束施加到非线性光学部件 101 的第 1 内部全反射平面 S1 的角度 Ψ_1 是两种可能性其中之一. 第 1 种可能性是光束从正方向施加时的角度, 如图 5 所示. 第 2 种可能性是, 光束从负方向施加时的角度, 如图 6 所描绘的那样. 在这种情况下, 该角度被表示为 “ $-\Psi_1$ ”.

如上所述, 光束在非线性光学部件 101 中发生全反射的临界角 θ_c 近似为 36.7° (即, BBO 晶体的折射率约为 1.674). 光束的入射角 Ψ_1 必须大于 36.7° . 为了让单输入耦合镜 102 反射从部件 101 发射的绿色激光束 (即, 基波), 由此形成一条闭合的光路, 非线性光学

部件 101 必须具有小于 90° 的顶角 α_0 。到达第 1 和第 2 内部全反射平面 S1 和 S2 的入射角之和等于非线性光学部件 101 的顶角 α_0 。因此，要求被施加到第 1 和第 2 内部全反射平面 S1 和 S2 的入射角 Ψ_1 不大于 53.3° 。

考虑到上述各项因素，本发明人设计了一种最佳激光束产生装置。他们发现，当满足下列两个条件时，深紫外激光束（即，二次谐波）将偏离绿色激光束（即，基波）。首先，如图 7 所示，非线性光学部件 101 具有 88.5° 的顶角 α_0 。其次，如图 7 所示，到达第 1 内部全反射平面 S1 的入射角 Ψ_1 为负方向的 50° ，即， $-\Psi_1 = 50^\circ$ 。

更明确地说，非线性光学部件 101 具有一条 5 mm 长的第 1 光路 P1，并且绿色激光束分别施加到部件 101 以及从部件 101 发出的两个点，被隔开大约 2 mm 的距离 L1。介于深紫外激光束从部件 101 发出的点以及绿色激光束从部件 101 发出的点之间的距离 L2 为 0.9 mm 以上。从部件 101 发出的绿色激光束和深紫外激光束二者的轴，在离开非线性光学部件 101 的输入/输出平面 S3 10 mm 的位置上，被隔开 1.5 mm 以上。已经证实，绿色激光束和深紫外激光束互相之间已被很好地分隔开。

图 8A 和 8B 表示非线性光学部件 101，它具有一个输入/输出平面 S3，S3 与被施加到光学部件 101 的绿色激光束的轴之间的倾角约为一个布鲁斯特（偏振）角。图 8A 是非线性光学部件 101 的侧视图，图 8B 是部件 101 的底视图。

非线性光学部件 101 的输入/输出平面 S3 与被施加到该光学部件 101 的绿色激光束的轴之间的倾角约为一个布鲁斯特角。因此，在输入/输出平面 S3 上的光能损耗（即，反射损耗）得以最小化。这使得在光学谐振器 100 中的波长变换效率得以提高。

虽然非线性光学部件 101 具有如上述那样设计的输入/输出平面 S3，但是绿色激光束（即，正常光线）偏振的方向跟输入/输出平面 S3 不完全一致。光能损耗虽然受到限制，但还是不可避免地发生。光能损耗取决于被施加到部件 101 的绿色激光束相对于输入/输出平面 S3

的方位角。该损耗是非线性光学部件 101 的顶角 α_0 的函数。正如上面所指出的那样，该顶角 α_0 为 88.5° 。被施加到部件 101 的绿色激光束相对于输入/输出平面 S3 的方位角为 1.5° 。由于绿色激光束的偏振方向跟输入/输出平面 S3 不一致这个事实所导致的光能损耗是很小的，仅为 0.15%。要注意的是，光能损耗是当绿色激光束进入部件 101 时所造成的损耗以及当绿色激光束从部件 101 发射时所造成的损耗之和。

下面的表 1 表示介于绿色激光束（即，具有 532 nm 波长的基波）在非线性光学部件 101 中行进时，各方向（第 1 到第 3 光路）之间的角度，另一方面，还表示深紫外激光束（即，具有 266 nm 波长的二次谐波）的方向与 BBO 晶体的轴 c 之间的角度。应当指出，在这里，矢量 k 沿着波的法线延伸，并且矢量 s 是沿着能量传输方向延伸的一个指向矢量。由于作为基波的绿色激光束是正常光线，所以矢量 k 和矢量 s 在相同的方向上延伸。

表 1

	绿色激光束 矢量 k ， 矢量 s	深紫外激光束 矢量 k	深紫外激光束 矢量 s
第 1 光路	47.5°	47.5°	52.3°
第 2 光路	327.5°	326.15°	321.47°
第 3 光路	224.5°	226.78°	231.64°

可以将输入耦合镜 102 放置在被施加到非线性光学部件 101 的绿色激光束的轴以及从该部件 101 发射的绿色激光束的轴的交点上。这样一来，在光学谐振器中，部件 101 的光能损耗得以最小化。此外，深紫外激光束（即，二次谐波）从非线性光学部件 101 发出，在空间上偏离于绿色激光束（即，基波）。因此，深紫外激光束在从部件 101 发出之前，可以被输入耦合镜 102 以外的镜所反射，而不施加到输入

耦合镜 102。由于深紫外激光束没有被施加到输入耦合镜 102，所以在镜 102 上不会发生化学反应，也就不会产生沉积在镜面 102 之上的杂质。因此，能减小在输入耦合镜 102 上的光能损耗，即使有也极小，这就大大地提高了在光学谐振器 100 中的波长变换效率。

由于深紫外激光束完全没有被施加到输入耦合镜 102，所以镜面 102 可以采用任何一种结构，只要能反射绿色激光束就行。用不着采用像二色镜那样的具有波长选择性的那一种。而且，光学谐振器仅包括少数部件，即，一个非线性光学部件 101 以及一个输入耦合镜 102。因此，就能以低成本来生产光学谐振器 100。

下面，将参照图 9 来详细说明含有上述光学谐振器 100 的、根据本发明的激光束产生装置 1。

激光束产生装置 1 被设计用来产生绿色激光束（波长：532 nm），它是 Nd: YAG 激光器的二次谐波，随后产生深紫外激光束，它是绿色激光束（即基波）的二次谐波。如图 9 所示，装置 1 包括绿色激光束产生部分 10 以及深紫外激光束产生部分 20。部分 10 被构成以产生绿色激光束。部分 20 被这样构成，用以对由部分 10 产生的绿色激光束进行波长变换，由此产生深紫外激光束。

在绿色激光束产生部分 10，半导体激光器 11 发出波长为 808 nm 的强激光束。聚焦棱镜 12 对来自半导体激光器 11 的强激光束进行聚焦。经过这样聚焦的光束被施加到非平面型的单片环状 Nd: YAG 激光器 13，对该激光器 13 进行激励。受到该光束的激励后，Nd: YAG 激光器 13 发出波长为 1064 nm 的红外激光束。

在绿色激光束产生部分 10，从 Nd: YAG 激光器 13 发出的红外激光束通过模式匹配棱镜 14。随后，该光束被施加到单片环状的 MgO: LN 晶体 15。在晶体 15，其谐振波长等于红外激光束的波长。因此，晶体 15 对红外激光束起着光学谐振器的作用。它对红外激光束进行波长变换，产生绿色激光束，后者是红外激光束的二次谐波，波长为 532 nm。

在绿色激光束产生部分 10，反射镜 16 对从 MgO: LN 晶体 15 发出的绿色激光束进行反射。被这样反射的绿色激光束施加于棱镜 17，

它形成具有预定直径的光束。这样形成的绿色激光束从绿色激光束产生部分 10 输出。

从绿色激光束产生部分 10 发出的绿色激光束被施加到深紫外激光束产生部分 20。部分 20 包括一个非线性光学部件 101，该部分 20 包括由例如 BBO (β -硼酸钡: β -BaB₂O₄) 晶体制成的非线性光学部件。部分 20 被这样构成，用以对绿色激光束进行波长变换，由此产生深紫外激光束，后者是绿色激光束的二次谐波，其波长为 266 nm。

在深紫外激光束产生部分 20 中，绿色激光束，或者基波，通过相位调制器 21 以及各模式匹配棱镜 22。绿色激光束被施加到光学谐振器 100。在光学谐振器 100 中，绿色激光束通过输入耦合镜 102 被施加到非线性光学部件 101。

在激光束产生装置 1 中，输入耦合镜 102 被安装到高精度定位装置 23 之上，后者包括一个压电元件，一个音圈马达，或诸如此类。当定位装置 23 被驱动时，光学谐振器 100 的谐振波长具有非常高的精度。

在激光束产生装置 1 中，输入耦合镜 102 对施加到光学谐振器 100 的绿色激光束的一部分进行反射。还有，镜面 24 反射绿色激光束，后者被光检测器 25 检出。光检测器 25 产生一组信号，它被送往控制电路 26。在深紫外激光束产生部分 20，相位调制器 21 按照来自相位调制器驱动电路 27 的一组调制信号，对施加到光学谐振器 100 的绿色激光束的相位进行调制。

控制电路 26 使用该调制信号，对来自光检测器 25 的信号进行同步检测，并由此检出一个误差信号，它表示在光学谐振器 100 中，沿着各光路行进的光束之间的相位差。控制电路 26 根据该误差信号来驱动高精度定位装置 23。受到这样的驱动之后，定位装置 23 以高精度连续地改变输出耦合镜 102 的位置。由此，光学谐振器 100 就能经常得到所需的谐振波长。可以采用业界所熟知的技术来检出误差信号。这些技术当中的一种就是被称为“Pound-Drever 方法”的调频边带方法，在 R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski, J. Hough, G. M. Ford, A. J. Munley 和 H. Ward 等人所写的“使用光学谐振器的激光

器相位与频率稳定”一文中，公开了这种方法，该文发表于《应用物理学，B 集》，1983 年，第 31 卷，第 97—105 页。这些技术中的另一种就是被称为“Hansch—Couillard 方法”的偏振方法，在 T. W. Hansch 和 B. Couillard 所写的“采用反射参考腔的偏振光谱仪的激光器频率稳定”一文中，公开了这种方法，该文发表于《光学通讯》，1980 年，第 35 卷，第 441—444 页。

在激光束产生装置 1 中，由控制电路 26 检出的误差信号驱动高精度定位装置 23。受到这样的驱动之后，定位装置 23 以高精度连续地改变输出耦合镜 102 的位置。由此，光学谐振器 100 就能经常得到所需的谐振波长。换句话说，部件 101 能够以高效率对绿色激光束进行波长变换。

在光学谐振器 100 中，绿色激光束通过输入耦合镜 102，并从输入/输出平面 S3 施加到非线性光学部件 101，平面 S3 与绿色激光束的轴之间的倾角约为一个布鲁斯特角。在非线性光学部件 101 中，绿色激光束沿着第 1 光路 P1 行进，路径 P1 与 BBO 晶体的轴 c 之间的倾角约为 47.5° 。随后，绿色激光束被施加到第 1 内部全反射平面 S1。

随着绿色激光束在非线性光学部件 101 中沿着第 1 光路 P1 行进，就产生波长为 266 nm 的深紫外激光束。深紫外激光束是绿色激光束的二次谐波。

在其中，绿色激光束从第 1 内部全反射平面 S1 被全反射，并且被施加到第 2 内部全反射平面 S2。第 2 内部全反射平面 S2 对从非线性光学部件 101 发出的绿色激光束进行全反射。输入耦合镜 102 反射被再次施加到非线性光学部件 101 的绿色激光束。

如上面所指出的那样，当绿色激光束在满足相位匹配条件的非线性光学部件 101 中沿着第 1 光路 P1 行进时，就产生深紫外激光束。深紫外激光束还首先在第 1 内部全反射平面 S1 进行全反射，然后在第 2 内部全反射平面 S2 进行全反射。其后，从输入/输出平面 S3 发出深紫外激光束。因此，它是从非线性光学部件 101 发出的。要注意的是，在非线性光学部件 101 中，深紫外激光束在第 1 和第 2 全反射平面 S1

和 S2 进行双折射，并且被反射两次。因此，深紫外激光束从部件 101 被发射，在空间上偏离于绿色激光束，即基波。在非线性光学部件 101 的外面，含有刀刃状棱镜或诸如此类的反射镜 28 反射深紫外激光束，后者是从深紫外激光束产生部分 20 发出的。

具有上述结构的深紫外激光束产生部分 20 可以以高效率来产生以时间相干特性见长的深紫外激光束。当绿色激光束产生部分 10 向深紫外激光束产生部分 20 施加一根大约 600 mW 的绿色激光束时，部分 20 就产生一根最大约为 200 mW 的深紫外激光束。部分 20 的这个输出数值揭示，在输入/输出平面 S3 上出现的反射损耗约为 22 %。在平面 S3 上，若在深紫外激光束的强度的意义上的反射损耗得以降低，则深紫外激光束产生装置 20 将产生大小为 250 mW 以上的深紫外激光束。随之，波长变换效率将高达 40 % 以上。此外，光束产生部分 20 被发现能连续工作 300 小时，发出大约 100 mW 以上的深紫外激光束，并且不需要将它的内部从大气中加以密封，或者向它输入清洁的空气。

准直棱镜 30 将从光束产生部分 20 发出的深紫外激光束改变为平行的深紫外激光束。矫正棱镜对 31 调整从激光束产生装置 1 输出的平行的深紫外激光束的形状。应当指出的是，由于在非线性光学部件 101 中发生的双折射的离散效应，使得从部分 20 发出的深紫外激光束具有椭圆形的截面。矫正棱镜对 31 将光束的截面改变为接近于圆形。因此，从激光束产生装置 1 输出具有接近于圆形截面的深紫外激光束。

如上所述，在激光束产生装置 1 中，单片环状的 MgO: LN 晶体 15 对从 Nd: YAG 激光器 13 发出的红外激光束进行波长变换。晶体 15 产生绿色激光束，它是红外激光束的二次谐波。非线性光学部件 101 包括，例如，一块 BBO 晶体，它对绿色激光束进行波长变换，产生一根深紫外激光束，它是绿色激光束的二次谐波。深紫外激光束从激光束产生装置 1 发出。这就是说，在激光束产生装置 1 中，仅使用各种固态部件来产生深紫外激光束。

由于仅包括各种固态部件，所以从整体上来看，激光束产生装置 1 是很小的。装置 1 还能达到高的变换效率，低功耗以及高的工作稳

定性，并能产生高质量的激光束。简而言之，它以工作性能见长。而且，装置1产生的深紫外激光束表现出良好的时间相干特性。

在激光束产生装置1中，深紫外激光束永远不会被施加到作为光学谐振器100的主要部件的输入耦合镜102，像非线性光学部件101那样。因此，在设计输入耦合镜102时，对深紫外激光束而言，用不着考虑反射率，透过率或诸如此类。因此，对装置1来说，用不着纳入像二色镜那样的具有波长选择性的部件。这就增加了设计输入耦合镜102时的自由度。因此，输入耦合镜102可以是一块低能耗的镜面。如上面所指出的那样，输入耦合镜102可以反射波长比绿色激光束更长的激光束。因此，可以用任何这样的材料制成，虽然这些材料不可以被用来形成能反射深紫外激光束的镜面，但是，这些材料可以被用来以现有镜面生产技术来提供低能耗的镜面。这种材料的一个实例就是五氧化钽。

在激光束产生装置1中，深紫外激光束永远不会被施加到输入耦合镜102。因此，在设计输入耦合镜102时，就用不着考虑镜面102应当具有的对深紫外激光束的损伤耐力。在设计一个光学部件时，通常难以降低光能损耗并提高对各种激光束的损伤耐力。这就是说，光能损耗的降低和损伤耐力的提高通常是此消彼长的。在光学谐振器100中，可以将输入耦合镜102设计成能使光能损耗最小化。因此，激光束产生装置1能够达到高的变换效率。

而且，在激光束产生装置1中，在输入耦合镜102上不会发生化学反应，也不会产生沉积于镜面102之上的杂质。这是因为深紫外激光束没有被施加到输入耦合镜102之上。这样一来，在输入耦合镜102上就能降低绿色激光束的光能损耗，即使有也极小，由此使得波长变换效率大为提高。用不着如同在常规激光束产生装置所需要的那样，对各光学部件进行彻底清洗，或者向激光束产生装置施加清洁的空气，以避免在输入耦合镜102上沉积各种杂质。

本发明并不局限于上述的激光束产生装置1。必要时，可以作出各种更改。

在上述实施例中，非线性光学部件 101 具有它的输入/输出平面 S3，该平面 S3 与被施加到光学部件 101 的绿色激光束的轴之间的倾角约为一个布鲁斯特角。例如，输入/输出平面 S3 中发出深紫外激光束的部分可以倾斜于深紫外激光束的轴，其倾角约为一个布鲁斯特角，如图 10 所示。如果是这样的情况，则非线性光学部件 101 具有一种更为复杂的形状，使得难以生产这样的非线性光学部件 101。然而，仍然有可能降低出现在非线性光学部件 101 中的深紫外激光束的反射损耗。这就是说，由于输入/输出平面 S3 的所述部分跟深紫外激光束之间的倾角约为一个布鲁斯特角，使得在输入/输出平面 S3 上，深紫外激光束的反射损耗得以大大降低。与此相对照，在装置 1（图 9）中，当深紫外激光束从非线性光学部件 101 的输入/输出平面 S3 发出时，其反射损耗约为 22 %。因此，修改后的激光束产生装置可以获得极高的变换效率。

而且，如前面所指出的那样，由输入/输出平面 S3 反射的深紫外激光束可以确实地被用来作为激光束产生装置 1 的输出监视器上的一束光，在输入/输出平面 S3 上不降低深紫外激光束的反射损耗。更精确地说，可以在从非线性光学部件 101 的输入/输出平面 S3 所反射的深紫外激光束的轴上，安装一个光检测器。在这种情况下，光检测器检出从输入/输出平面 S3 所反射的深紫外激光束的强度，并且装置 1 被这样控制，使得深紫外激光束的强度保持恒定。激光束产生装置 1 可以比相反的情况更稳定地进行工作。

若由输入/输出平面 S3 所反射的深紫外激光束被用来作为输出监视器中的一束光，则希望非线性光学部件 101 的两面不进行抛光。换句话说，部件 101 的两面保持粗糙状态。随后，部件 101 的两面可以起到漫射板的作用，对深紫外激光束进行漫射。紫外线区的光束可以一致地被施加到光检测器的受光表面上。由于紫外光束并不聚焦于光检测器的受光表面上的一个限定的部分，所以它不会降低光检测器的灵敏度。

在某些情况下，有必要对被施加到深紫外激光束产生部分 20 的绿

色激光束的强度进行监测。随后，如同将要说明的那样，可以利用作为正常光线在非线性光学部件 101 中行进的绿色激光束。当绿色激光束进入非线性光学部件 101 时，它具有有一种成分，虽然很小，但是它将变为一束非常光线。如上所述，若非线性光学部件 101 具有 88.5° 的顶角，则这种成分仅占绿色激光束的 0.15 %。然而，它作为一根非常光线，在非线性光学部件 101 中，沿着与深紫外激光束差不多相同的路径行进，并且在与深紫外激光束差不多相同的位置上，从部件 101 发射出去。绿色激光束的这种成分沿着不同于深紫外激光束从平面 S3 发出的方向从输入/输出平面 S3 发出。这是因为，作为非常光线在部件 101 中行进的这种成分，其被反射的程度小于深紫外激光束。因此，光检测器可以安装在绿色激光束从部件 101 发射的路径上，其方向不同于深紫外激光束从部件 101 发射的方向。光检测器可以检测绿色激光束的强度。换句话说，它可以检测作为基波被施加到深紫外激光束产生装置 20 的绿色激光束的强度。

可以使用调频边带方法来检出误差信号，用以调节光学谐振器 100 的谐振波长。如果这样的话，则来自光检测器 25 的信号输出不被用来作为误差信号。宁可，使用光检测器在检测绿色激光束的强度时所产生的信号，该绿色激光束已经在非线性光学部件 101 中行进并且以不同于深紫外激光束从其中发射的方向的方向发射出去。控制电路 26 使用该调制信号，由此，对由该光检测器产生的信号进行同步检测。由此检出一个误差信号，该信号代表在光学谐振器 100 中，沿着各光路行进的各光束之间的相位差。

上述非线性光学部件 101 具有两个内部全反射平面 S1 和 S2。也可以用具有 3 个或更多内部全反射平面的非线性光学部件来代替。在这种情况下，被施加到非线性光学部件的绿色激光束的轴以及从该部件发射的绿色激光束的轴应当在该非线性光学部件以外的一个位置上相交。还有，非线性光学部件应当这样被成形，使之在发射深紫外激光束时，能够很好地偏离于从该非线性光学部件发出的绿色激光束。

迄今为止所描述的是激光束产生装置 1，它被设计用以产生波长

为 266 nm 的深紫外激光束。本发明并不局限于装置 1。它可以被应用于具有非线性光学部件的任何激光束产生装置之中，上述非线性光学部件被构成用于对输入光束进行波长变换，并且产生具有规定波长的激光束。

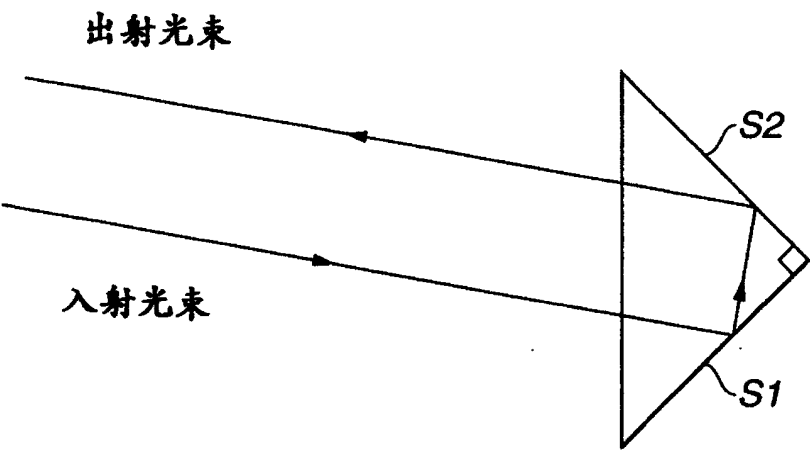


图1

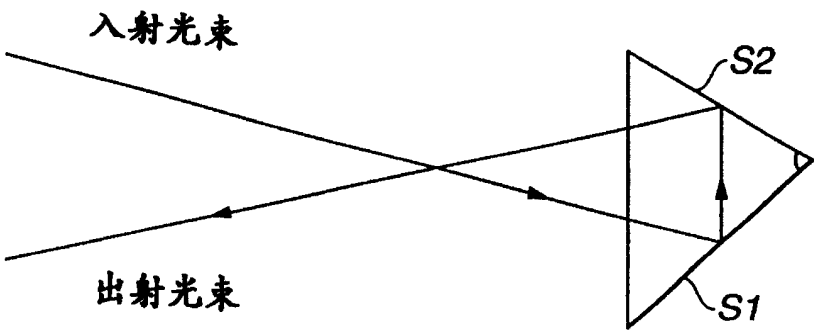


图2

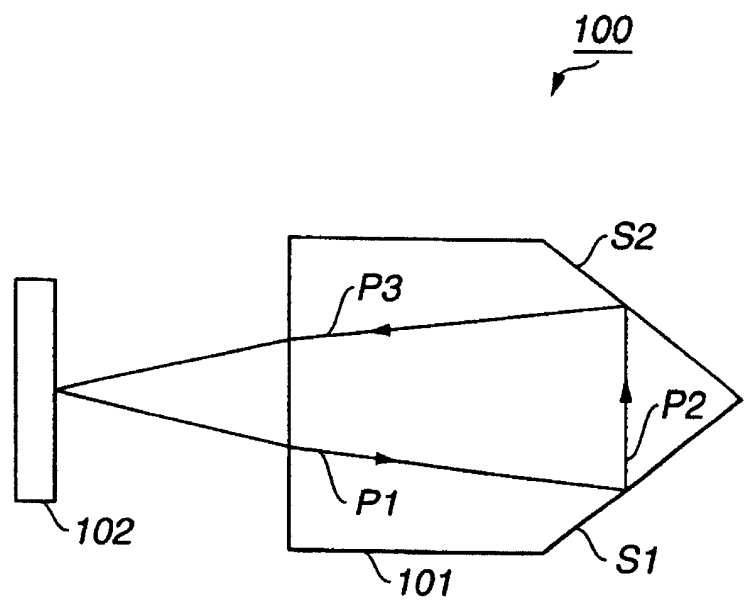


图3

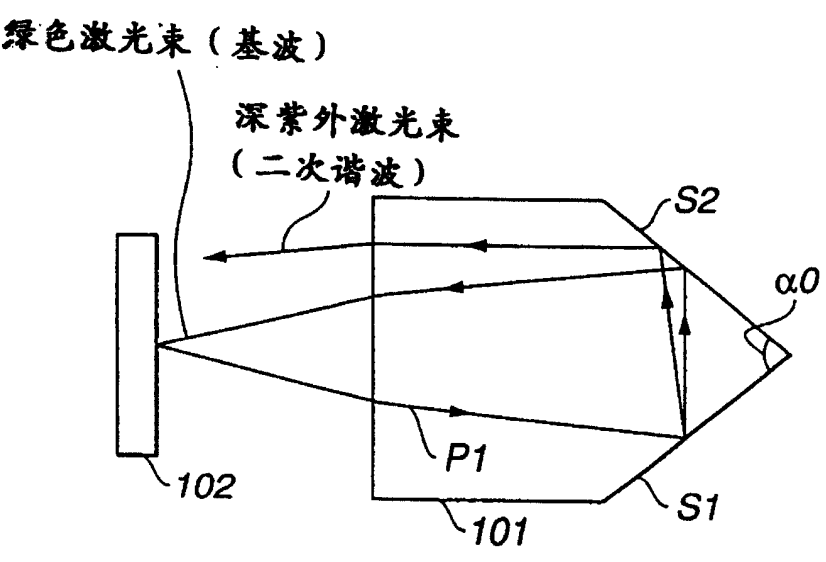


图4

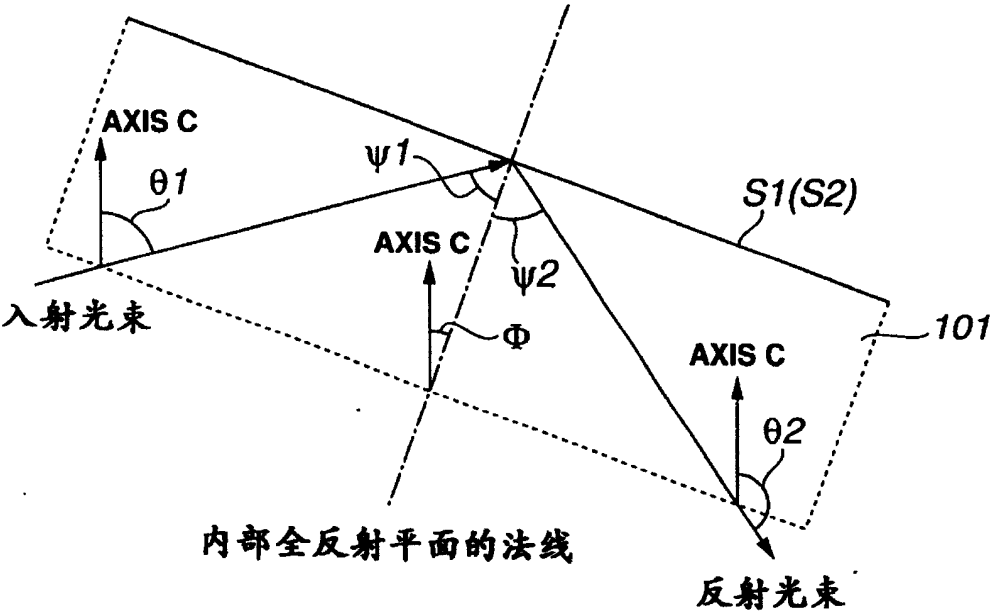


图5

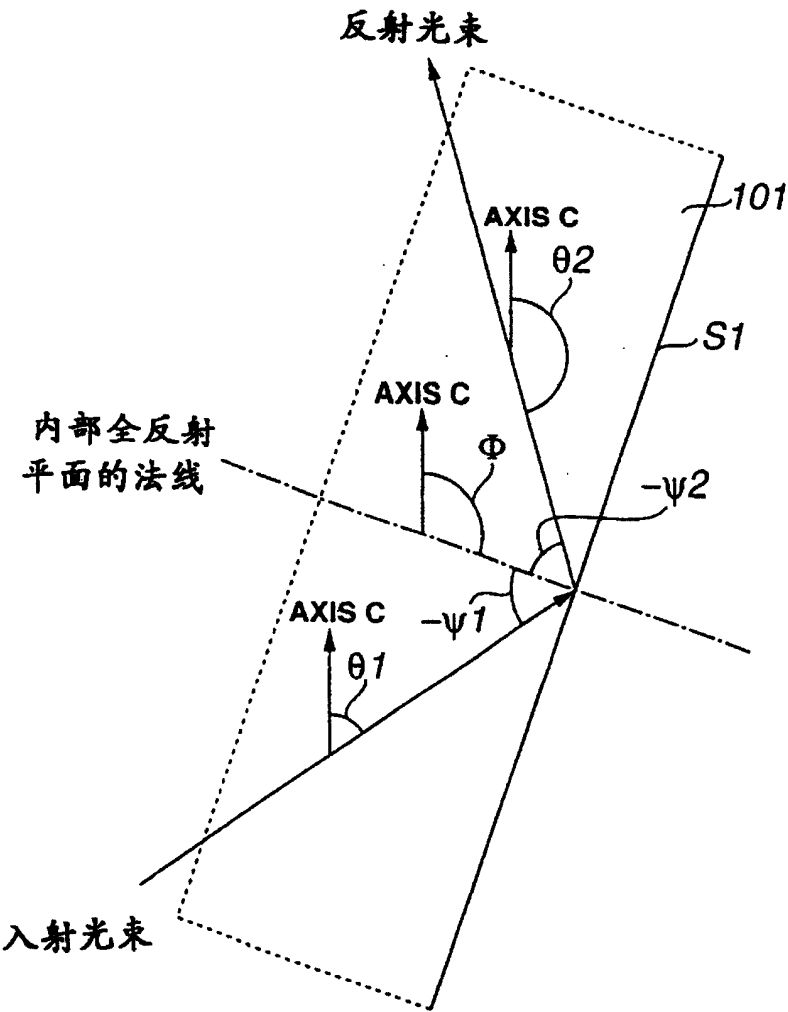


图6

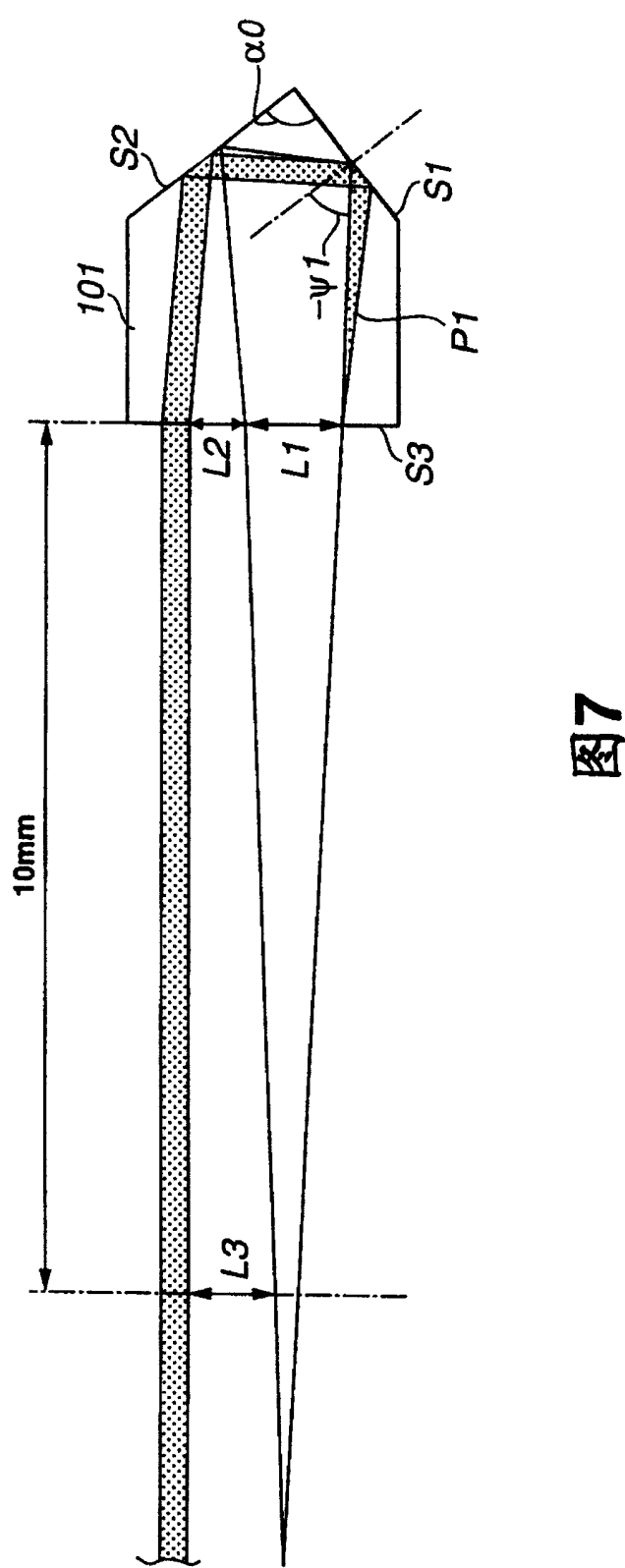


图7

图8A

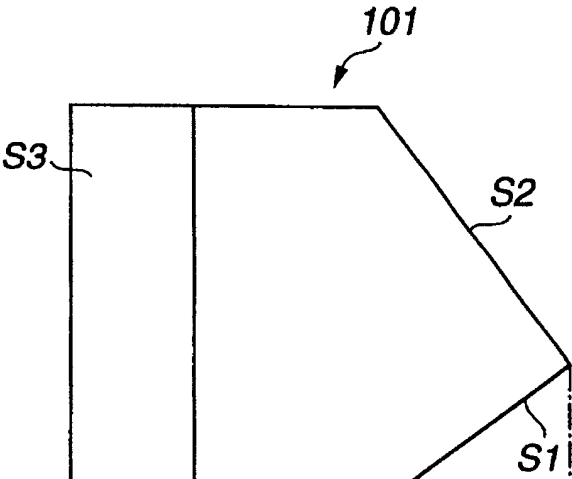
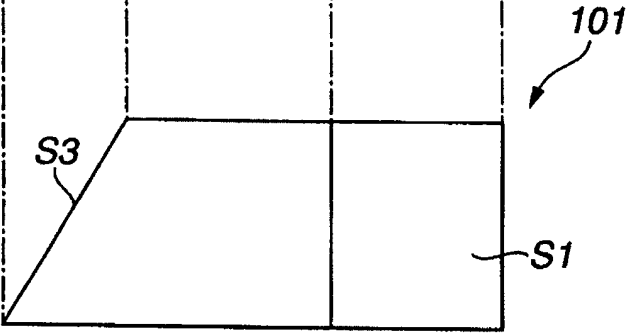


图8B



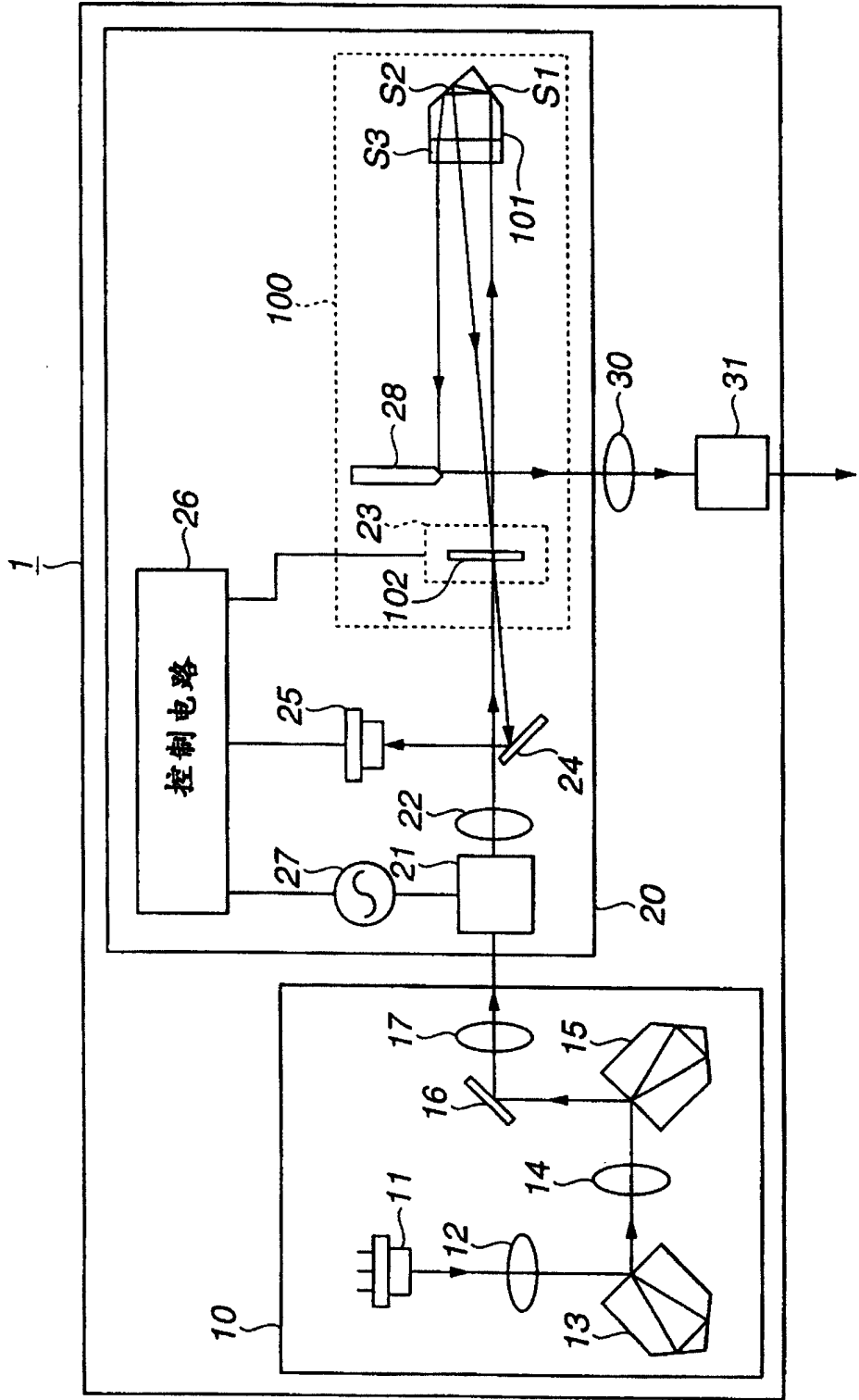


图9

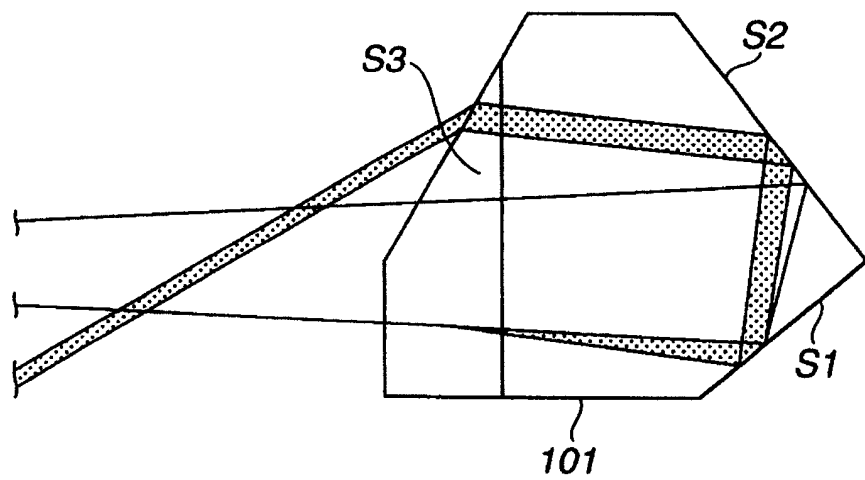


图10