



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200480036388.5

[45] 授权公告日 2009年1月14日

[11] 授权公告号 CN 100452575C

[22] 申请日 2004.10.8

[21] 申请号 200480036388.5

[30] 优先权

[32] 2003.10.9 [33] FR [31] 0311809

[86] 国际申请 PCT/FR2004/002540 2004.10.8

[87] 国际公布 WO2005/036703 法 2005.4.21

[85] 进入国家阶段日期 2006.6.7

[73] 专利权人 奥克西斯股份有限公司

地址 法国拉尼永

[72] 发明人 T·乔治

[56] 参考文献

US5838713 A 1998.11.17

US5365539 A 1994.11.15

US6373865 B1 2002.4.16

US5206867 A 1993.4.27

US4809291 1989.2.28

US5809048 A 1998.9.15

US4884276 1989.11.28

CN1045200 A 1990.9.5

KNBO3 TEMPERATURE - TUNED BLUE LASER. LIU L. OPTICAL ENGINEERING, Vol. 38 No.11. 1999

SINGLE - AXIAL MODE, INTRACAVITY DOUBLEDND: YAGLASER. FAN T Y. IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, Vol. 27 No. 9. 1991

审查员 胡涛

[74] 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

代理人 龚海军 陈景峻

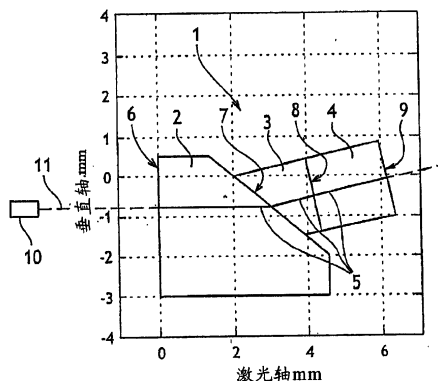
权利要求书 2 页 说明书 8 页 附图 2 页

[54] 发明名称

激光二极管泵浦单片固态激光装置以及所述装置的应用方法

[57] 摘要

本发明涉及一种腔内倍频激光装置，包括泵浦激光二极管；由激光二极管发射的具有基波波长的激光束激发的 Nd:YAG 放大介质，该放大介质的输出面按照对于所述基波波长的布儒斯特角进行切割；和双折射倍频 KNbO₃ 晶体。该装置进一步包括插入在双折射晶体的输入面(8)之间的各向同性介质(3)，放大介质和双折射晶体彼此固定以便提供单片谐振腔。此外，双折射晶体的晶轴“c”包括相对于基波的偏振的正交方向的非零角 θ_c ，其由布儒斯特表面来限定。



1. 一种激光装置，包括：

- 光泵浦设备（10），

- 由激光束（11）激发的放大介质（2），所述激光束（11）是由光泵浦设备发射的，该放大介质的输出面（7）按照对于在放大介质内激发的基波波长（5）的布儒斯特角进行切割，和

- 用于倍频的双折射晶体（4）；

其特征在于所述激光装置还包括插入在放大介质的输出面（7）和双折射晶体的输入面（8）之间的各向同性介质（3），放大介质（2）和双折射晶体（4）彼此牢固地连接以构成整体式谐振腔；以及双折射晶体的晶轴“c”相对于基波的偏振的正交方向形成不为零的角度 θ_0 ，所述正交方向由布儒斯特表面来限定。

2. 如权利要求1所述的装置，其特征在于双折射晶体的输入面（8）按照相对于基波（5）的传播方向的法线的小角度 ε 进行切割。

3. 如权利要求1或2所述的装置，其特征在于双折射晶体的输出面（9）按照相对于基波（5）的传播方向的法线的小角度 ε 进行切割。

4. 如权利要求2所述的装置，其特征在于角度 ε 小于或等于一度。

5. 如权利要求1或2所述的装置，其特征在于正交于基波的传播方向的平面包含晶轴“c”，该平面相对于双折射晶体的“a”轴和“b”轴形成角度，以便在操作温度下在基波和谐波之间得到相位匹配。

6. 如权利要求1或2所述的装置，其特征在于放大介质（2）由掺杂有钕Nd的钇铝石榴石YAG构成。

7. 如权利要求6所述的装置，其特征在于放大介质（2）是圆柱形Nd:YAG，所述圆柱形Nd:YAG的输入面形成平面镜。

8. 如权利要求1或2所述的装置，其特征在于光泵浦设备（10）是激光二极管。

9. 如权利要求1或2所述的装置，其特征在于双折射晶体（4）由铌酸钾 KNbO_3 制成。

10. 如权利要求1或2所述的装置，其特征在于各向同性介质是空气。

11. 如权利要求1或2所述的装置，其特征在于各向同性介质由钽

酸钾 KTaO_3 制成。

12. 如权利要求 1 或 2 所述的装置，其特征在于各向同性介质由各向同性晶体构成，所述各向同性晶体的折射率在双折射晶体的折射率的 10% 以内接近于双折射晶体的折射率。

13. 如权利要求 3 所述的装置，其特征在于角度 ε 小于或等于一度。

14. 一种在根据前述任一权利要求所述的激光装置中使用的方法，其特征在于通过相对于放大介质的输入面平移由光泵浦设备 (10) 发射的激光束而改变由激光束行过的光路长度，激光束沿平面移动，其中该激光束在放大介质中行过的距离作为放大介质中通路宽度的函数而改变。

激光二极管泵浦单片固态激光装置 以及所述装置的应用方法

技术领域

本发明涉及一种激光二极管泵浦单片固态激光装置，更具体地涉及一种单模腔内倍频固态激光器。本发明还涉及一种用于该装置的方法。

本发明可以特别有利但不排他地应用于产生蓝色或绿色激光发光的领域。

背景技术

例如利用多模二极管在 473nm 处的可见光谱中具有良好空间和光谱质量的光束的激光辐射特别对于工业和医学应用具有很大的好处。称为谐波的该波长可以通过下述方法得到：将来自掺杂有铈的钕铝石榴石 (Nd:YAG) 的在 946nm 的波长（称为基波）处的激光辐射进行倍频。

通常，腔内倍频激光器包括激光二极管，用于泵浦固态激光器如 Nd:YAG，例如在 946nm 处形成放大器。为了产生倍频，将非线性晶体连接到放大器，通过倍频将近红外基波信号转换为可见信号（也已知为“第二谐波产生 SHG”）。从而得到把基波波长除以 2。放大器和非线性晶体包含在腔内，在激光束的光路中所述腔的两个相对的端面反射某些波长。

然而，如果寻求连续辐射，则基波辐射的功率小于激光二极管的功率并且倍频因此效率非常低。

已知名称为“Diode pumped laser and doubling to obtain blue light”的美国专利 US 4809291，其中 R.L.Byer 和 T.Y.Fan 提出了一种腔内倍频以便增加在 946nm 处的基波的功率并且从而增加倍频效率。

于 1988 年在期刊 Optics Letters (第 13 卷, 第 137-139 页) 中公开的名称为“Efficient blue emission from an intracavity-doubled 946nm Nd:YAG laser”的文章中, Dixon 等提出了一种通过腔内倍频的基于 Nd:YAG 的微激光器得到 5mW 蓝色光 (473nm) 的辐

射。Nd 浓度为 1.1%。倍频效率仅为 2%。

利用这些腔内倍频激光器的主要问题在于轴向模式和寄生偏振的存在，它们减小了激光器的效率并且是高功率波动的源。作为一个例子，Matthews 等在名称为“Diode pumping in a blue (473nm) Nd:YAG/KNbO₃ microchip laser”的文章(CLEO'96, 第 9 卷, 第 174 页)中提出了强度波动大于 10% 的 26.5mW 的蓝色光。

更准确地，腔内倍频引起选择性损耗，其随着主激光辐射的泵浦功率而增加。当倍频效率增加时，腔的平均粒子数反转必须增加以便补偿过量的损耗。然而，这允许相邻模式和正交极化辐射开始产生激光。对于相邻模式，该作用是除“空间烧孔”以外的作用，该“空间烧孔”已经允许相邻模式产生激光。

在放大介质中（增益竞争 (gain competition)）以及在倍频介质中（频率增加 (frequency addition)）耦合在腔内产生激光的不同模式。这些耦合是非线性的并参与复杂的非线性动态。后者导致高或甚至混乱的功率波动。

如果倍频属于“类型 I”，则正交极化模式不经受有效的倍频（缺少基波和谐波之间的相位适配）。这些模式通过随泵浦功率而增加来稳定粒子数反转。它们降低转换效率，转换效率需要粒子数反转的增加来增加。仅“空间烧孔”作用允许转换效率的轻微增加。

已经提出许多方法用于产生激光单模或用于在非线性晶体中不耦合这些模式。它们可以分为下述三类：

a) 第一类是在腔中引入标准器。特别在 Y. Shimoji 的美国专利 US 5, 838, 713 中公开的该方法引起了几个问题。标准器引起腔中的损耗，除非它通过 YAG 以及双晶体的面形成。在后者的情况下，它需要非常高精度的定位（亚微米），这在工业上得到并使其稳定是困难的。解决这个问题一个方法是使放大介质与倍频晶体光学接触，该晶体在接触面的一个部分上引入一角度。该角度在两种材料之间产生小的空气间隙。该方法削弱了接触，因此削弱了单片激光器的完整性，以及不允许通过粘合剂保护界面。

b) 第二类包括基波的偏振。放大介质可以插入在两个四分之一波片之间以便避免“空间烧孔”作用，特别见 G. Hollemann 等的“Frequency-stabilized diode-pumped Nd:YAG laser at 946nm

with harmonics at 473nm and 237nm”, Opt. Lett. 19, 第 192 页, 1994 年 2 月。该方法的一个缺点是在腔中引入损耗。

通过类型 I 倍频, 意味着一个实施例, 在该实施例中基波激光束沿晶体的光轴之一 (通常是慢轴) 传播, 而谐波激光束沿晶体的与第一光轴正交的另一光轴传播。当能切割晶体以至于在基波长的光轴的折射率等于在谐波波长的另一光轴的折射率时, 类型 I 倍频发生。这是对于 KNbO_3 的情况。

通过类型 II 倍频, 意味着一个实施例, 在该实施例中当基波激光的偏振相对于光轴形成 45° 的角度时, 基波激光束存在于两个轴上并且转换系数得到最佳化的实施例。

c) 第三种方法在于减小腔的长度。它由 A. Mooradian 在 1993 年 10 月公开的美国专利 US 5, 256, 164 中提出。对于在 946nm 处的辐射的 1nm 线宽 (与对于在 $1.064\mu\text{m}$ 处的线的 0.6nm 相比), Mooradian 的公式要求腔长度小于 $300\mu\text{m}$, 包括 YAG 和 KNbO_3 。到此为止公开或授权的微芯片中的 Nd 浓度不超过 1.1%。这相应于在 808.4nm 处的 0.85mm^{-1} 的衰减, 即每 $100\mu\text{m}$ 厚度 8.1% 的吸收泵浦功率以及每 $200\mu\text{m}$ 15.6% 的吸收泵浦功率。然而, 100 或 200nm 的 KNbO_3 不提供足够的转换效率。从而, 根据 Mooradian 的不等式的微芯片激光器显示出不能够利用 1W 的激光二极管泵浦功率来发射超过几 mW 的蓝色光。

此外, 已知由 T. Y. FAN. 在 IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 27, 1991 年 9 月 9 日、名称为 “Single-Axial Mode, Intracavity Doubled Nd:YAG Laser” 的文献中提出的用于产生腔内倍频激光单频率的有效方法。在该方法中, 放大介质 (Nd:YAG) 相对于空气以布儒斯特角进行切割。非线性、双折射晶体由基波以 45° 入射 (类型 II 倍频)。布儒斯特窗引起正交极化中的显著损耗并防止它产生激光。它还引起在每个波长处的损耗, 在每个波长处偏振已经通过双折射晶体旋转。作为波长函数的损耗调制可以产生激光单模。另一方面, 当基频处的信号在非线性晶体的光轴之一上时, 该方法不适用于类型 I 倍频。然而, 由于双折射, 不可能将以布儒斯特角进行切割的放大晶体与非线性晶体连接。事实上, 双折射引入相位作用, 其意味着由腔的外部面反射的光束返回到放大器时不再重新组合。

发明内容

本发明的目的在于通过提出一种腔内倍频固态激光器来解决大多数上述缺点，该激光器具有紧凑的尺寸，提供大的操作稳定性，并允许类型 I 和 II 倍频。本发明的另一个目的是提出一种能够以单模操作的可调谐固态激光器。本发明还涉及一种固态激光器，其无论泵浦激光二极管的功率电平如何都是大功率的。

利用激光装置实现至少上述目标之一，该激光装置包括：

- 光泵浦设备，优选为激光二极管，
- 由光泵浦设备发射的具有基波波长的激光束激发的放大介质，该放大介质的输出面按照对于所述基波波长的布儒斯特角进行切割，和
- 用于倍频的双折射晶体。

根据本发明，该装置还包括插入在放大介质的输出面和双折射晶体的输入面之间的各向同性介质，放大介质和双折射晶体彼此牢固地连接以便构成单片或合成的谐振腔。此外，双折射晶体的晶轴“c”形成角度 θ_c ，角度 θ_c 相对于基波的偏振的正交方向不为零，该方向由布儒斯特表面来限定。

利用根据本发明的该装置，各向同性介质和双折射晶体之间的界面接近于法线。该插入的各向同性介质使双折射晶体的双折射作用被限制：事实上，当入射角度倾向于法线时，双折射的角度倾向于零。从而能将放大介质牢固地连接到双折射晶体（倍频器）以便得到紧凑的元件，在 1991 的 T. Y. Fan 的文献中则不是这种情况。

以布儒斯特角的界面和离轴的双折射晶体的组合允许单个模式被选择。事实上，布儒斯特界面引起正交极化中的选择损耗。仅对于由于双折射引起的相移是 2π 的倍数的波长保持布儒斯特界面处的低损耗偏振。通过特别是调节非线性晶体的长度，能在辐射频带中仅选择单个模式。换句话说，可以调节各向同性介质的折射率和与腔的长度相关的角度 θ_c 。以便在腔中仅允许单个模式。

从而，甚至在类型 II 倍频的情况下，选择不同于 45° 的角度 θ_c 是有利的。

此外，当倍频效率高时，能通过增加 θ_c 而增加相邻模式的损耗。

根据本发明的有利特征，双折射晶体的输入面和/或输出面按照相对于垂直于激光束的传播方向的线的微小角度 ε 进行切割。从而输入

和输出面不再完全平行。这个特征对于下述事实是值得注意的：在常规倍频中，角度 ε 总是等于零以便防止任何双折射。因此设置不为零的角度 ε 违背常规实践。根据该装置的特征（腔的尺寸、折射率、 θ_0 等），本领域的技术人员能确定最大角度 ε ，超过该最大角度，在布儒斯特面处的透射光谱不再具有透射峰。作为例子，可以选择 ε 小于或等于 1° 。

该角度 ε 引起沿两个平行和正交方向的微小的双折射。它可以在平行于偏振的维数中引入。然后通过由泵浦诱发的热透镜，可以补偿在信号的路径中被引入的微小的双折射，只要 ε 是微小的。但是优选在正交于偏振的维数中引入 ε 。

通常，该角度 ε 有利地允许双折射晶体的长度通过泵浦（从而信号）的简单平移而改变。该长度的变化允许腔的频率的调谐。

根据本发明，正交于基波的传播方向的平面可以有利地包含晶轴“c”，并形成相对于双折射晶体的“a”和“b”轴的角度，以便在基波和谐波（倍频波）之间的操作温度处得到相位匹配。

腔的尺寸不再是唯一的参数，其可以修改以便得到单模操作。仔细选择介质，它们的折射率和它们的尺寸以及双折射晶体的取向，允许单模和稳定的操作。

放大介质可以通过掺杂有钕（Nd）的钇铝石榴石（YAG）构成。该晶体可以是具有输入面的圆柱体，该输入面形成平面镜。

双折射晶体有利地由铌酸钾（ KNbO_3 ）制成。

根据本发明的第一变形，各向同性介质是由钽酸钾（ KTaO_3 ）制成的晶体介质。三种介质然后彼此连接。

根据本发明的第二变形，各向同性介质是空气。在该情况下，放大器的输出面的表面条件和双折射晶体的输入面的表面条件不需要过度的纯度。

优选地，应当注意选择由各向同性晶体构成的各向同性介质，该晶体的折射率例如在 10% 内接近于双折射晶体的折射率。这最小化了双折射作用，因此允许关于信号相对于界面（法线附近）的入射角的更大的容差。

根据本发明的另一方面，提出了一种方法，其中由激光束覆盖的光路长度通过相对于放大器的输入面平移由泵浦设备发射的激光束而改

变。更准确地，激光束沿平面移动，其中在放大器中由该激光束覆盖的距离作为通路宽度的函数而变化。

附图说明

本发明的其他优点和特征通过研究下述实施例和所附附图的详细描述而变得显而易见，所述实施例不是限制性的，在附图中：

图 1 是根据本发明的包括连接三个晶体的激光装置的图解剖面图；

图 2 至 7 是说明了在图 1 的装置的谐振腔中占主导的不同模式的功率电平的曲线图；和

图 8 是根据本发明装置的变形的图解剖面图，其中中间材料由环境空气取代。

具体实施方式

现在将描述腔内倍频单片激光装置，其包括利用 KNbO_3 晶体在 473nm 处的腔内倍频的以 946nm 发射的 Nd:YAG 激光器，尽管本发明不限于该实施例。

参考图 1，示出了泵浦激光二极管 10，其向腔 1 发射在 808nm 处的激光束 11，该腔 1 由三个晶体 2、3 和 4 的组合构成。放大晶体 2 是 Nd:YAG。其折射率在 946nm 处是 $n_1=1.82$ 。该晶体 2 的输入面 6 被处理以便构成平面镜。其输出面 7 以布儒斯特角进行切割，该布儒斯特角根据折射率 n_1 和各向同性晶体 3 的折射率 n_2 进行计算。两个晶体 2 和 3 在面 7 的一部分上彼此连接。

各向同性晶体 3 通过在 946nm 处具有等于 2.179 的折射率 n_2 的钽酸钾 KTaO_3 构成。在其输出面 8 上，连接倍频双折射晶体 4，倍频双折射晶体 4 由铌酸钾 KNbO_3 构成，其折射率和直径大约与各向同性晶体 3 的折射率和直径相同。

两个晶体 3 和 4 具有共线的几何轴。各向同性晶体 3 在面 7 处进行切割，以便从 Nd:YAG 2 出射并通过面 7 偏转的激光束 5 平行于它们的几何轴通过晶体 3 和 4。

Nd:YAG 2 的输入面 6 和 KNbO_3 4 的输出面 9 以常规方式处理以便构成谐振腔。从面 9 出射的光束可以在 946nm 处或在 473nm 处。

图 1 的框图基于 Nd:YAG 中在 946nm 处的信号的垂直偏振。垂直轴位于图的平面中，水平轴垂直于该平面。本领域的技术人员能够容易

地将该图适用于线性水平或任何其他类型的偏振。

在双折射晶体 KNbO_3 中，输入面 8 包含轴 c ，并且根据相对于轴 b 的角度 $\varphi=32^\circ$ 切割平面 ab ，以便在 308K 时得到在波长 946nm 和 473nm 之间的相位匹配。本领域技术人员能够修改该角度用于在其他温度时的相位适配。在 946nm 处，在轴 c 上的折射率是 $n_{3f}=2.127$ ，以及在正交轴上的折射率是 $n_{3s}=2.238$ 。因此双折射的特征在于 $\Delta n_3=0.111$ 。

面 7 的角度 φ_a 是在 YAG 和 KTaO_3 之间的布儒斯特角。它通过关系 $\tan(\varphi_a)=n_2/n_1$ 来确定。面 8 以垂直于光束的传播方向的线的角度 ε 被切割，该光束是在 946nm 处正交于入射面 6 发射的。 φ_b 和 φ_c 分别是面 8 和 9 的角度，并通过 $\varphi_b \cong 2\varphi_a - \pi/2 + \varepsilon$ 和 $\varphi_c \cong 2\varphi_a - \pi/2 + \varepsilon_1$ 来确定，其中 ε_1 具有在 $\varepsilon(1n_2/n_{3s})$ 和 $\varepsilon(1-n_2/n_{3f})$ 之间包括的优选值。关于 φ_b 的容差为约 1° ，它通过双折射作用来限制。关于 φ_c 的容差小于几个角度的弧分，因为它是封闭腔的后面的面。

同样在图 1 中，对于“ y ” = 0，在垂直轴上，信号在三个晶体 2，3 和 4 的每一个中传播 2mm。对于“ y ” < 0，在三个介质中的各传播距离容易从三个角度 φ_a 、 φ_b 和 φ_c 中推导出。作为“ y ”的函数，很容易计算出光学距离 L_0 ，距离和折射率的乘积。选择角度 ε 等于 0.003rad 或角度的 $10'$ ($10'$ of angle)。可以在腔中传播的光学频率与 $C/2L$ 成比例，其中 C 是光在真空中的速度。它们通过图 2 至 7 中的十字标和圆表示。

图 2 至 7 示出了当存在具有垂直和水平偏振传播的信号进入腔和从该腔中出射时，以布儒斯特角的面 7 引起的损耗，该腔由三个晶体 2，3 和 4 构成。双折射晶体 4 的切割角，即具有水平偏振的轴 c 的角度，为 $\theta_c = 0.3 \text{ rad}$ 。放大介质 2 能够在以 946.6nm 为中心的 1nm 频段上提供增益。然后计算所有放大模式的损耗，如图 2 至 7 所示。在图 2 中，还表示正交极化损耗（以圆的形式）。在后面没有表示正交极化损耗，因为它们太大而不允许激光器振荡。

基波信号的偏振在呈现的情况下是垂直的。如果轴 c 是水平，则光轴会是水平和垂直的。基波信号然后沿双折射的轴传播，并且其偏振可以不再旋转。如果轴 c 以及因此双折射轴旋转，如在呈现的情况下，则基波不再在双折射轴中，并且其偏振因此在晶体中的传播期间旋转。然后可以应用通过偏振旋转的模式选择。

激光束的垂直位置“y”在图3至7中变化。当“y”从-1.4mm上升至-0.8mm时，可以连续选择辐射频段的所有波长。在图4和5中可以看出， n_2 、 KNbO_3 双折射晶体4的长度和角度 θ_c 的明智选择使得能选择仅仅一种模式。低比率 n_2/n_1 特别允许透射峰的窄宽度，使滤波器非常有选择性。角度 θ_c 可以增加以便引起相邻模式的更多损耗。1.2mm的垂直平移足以实现相同的模式选择（见图3和7）。激光因此是单模并且可以通过晶体相对于激光二极管的简单平移来调谐。

在图8中，表示出了根据本发明的装置的优选变形，其中各向同性介质由空气构成。

没有示出泵浦装置。

Nd:YAG激光器12的输出面14按照布儒斯特角进行切割。使该面14的上部分成为在946nm处的激光束的通路。在面14的下部分上，连接基于 KNbO_3 的双折射晶体13。面14的下部分以下述方式进行切割：从Nd:YAG中出射并通过空气的激光束16到达该晶体13的输入面17。在激光束的光路中，没有材料布置在Nd:YAG激光器的输出面14和双折射晶体13的输入面17之间。该变形的优点在于对在连接区域15上的表面条件要求较少。

当然，本发明不限于已经描述过的例子，多种变型可以适用于这些例子，只要不超出本发明的范围。

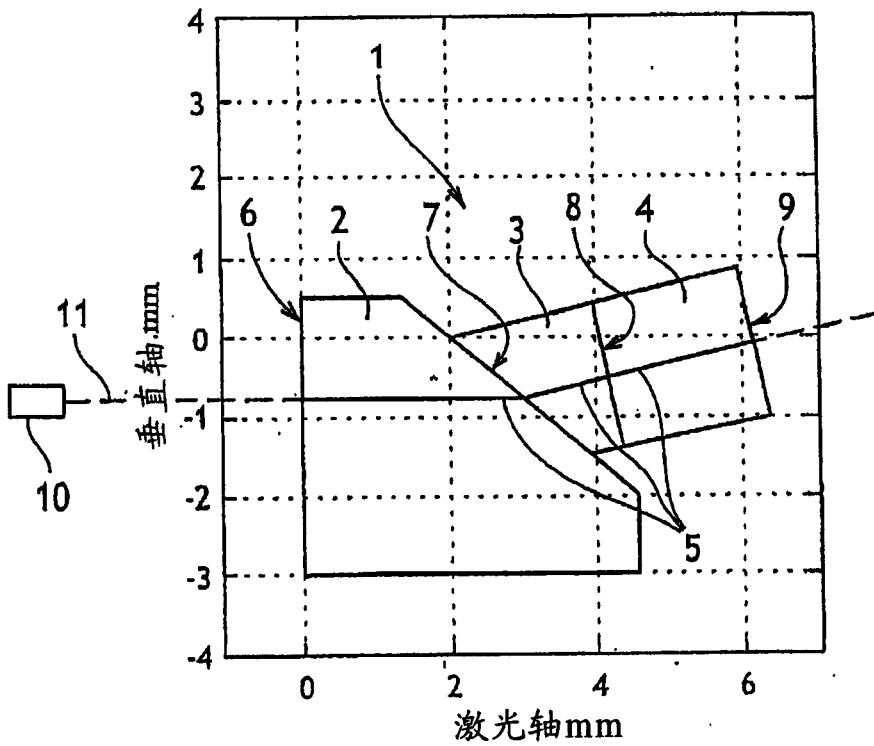


图 1

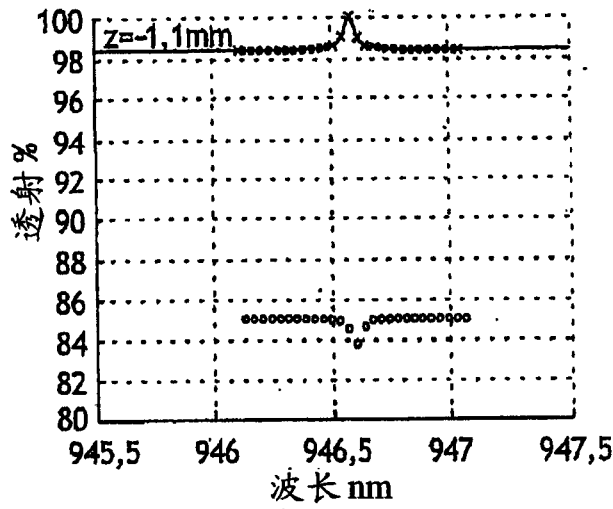


图 2

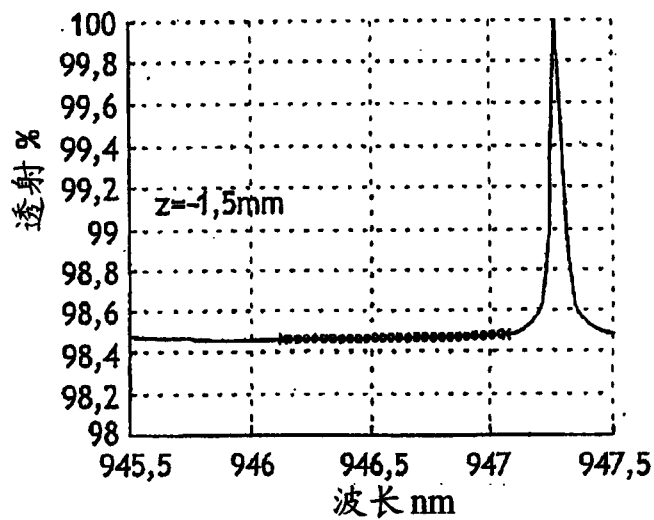


图 3

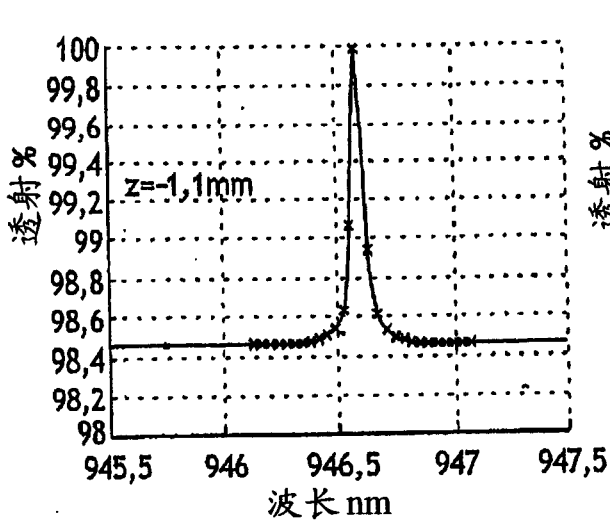


图 4

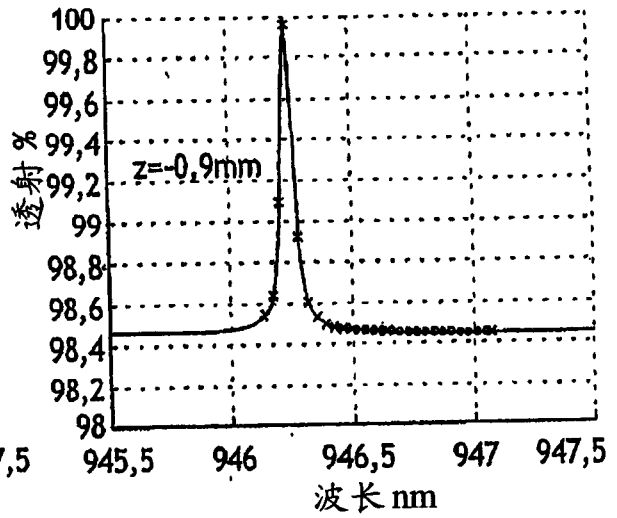


图 5

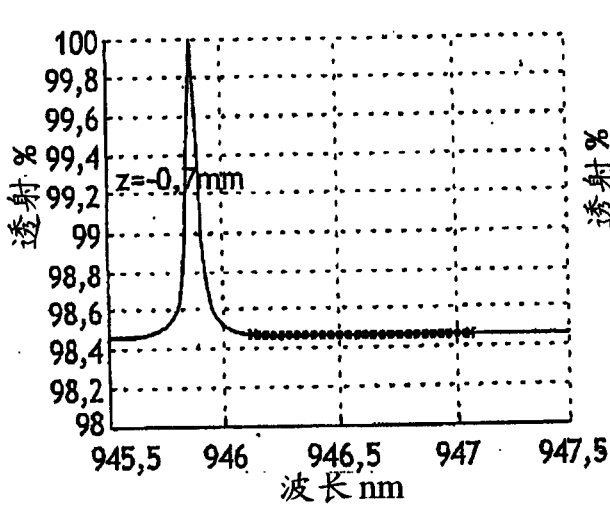


图 6

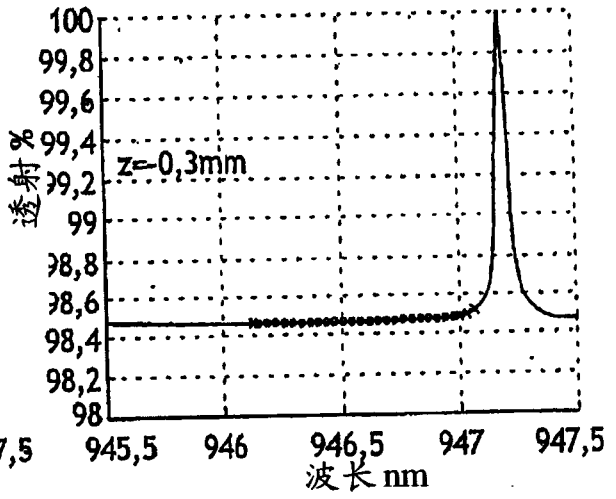


图 7

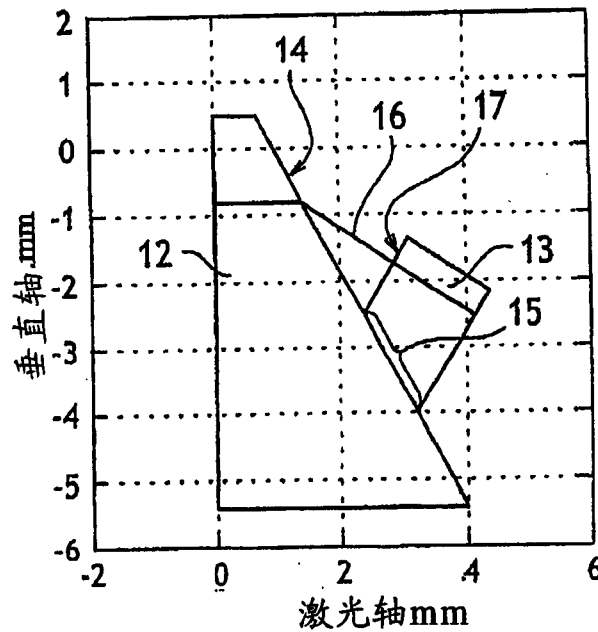


图 8