



[12] 发明专利说明书

[21] ZL 专利号 99103990.4

[45] 授权公告日 2004 年 4 月 7 日

[11] 授权公告号 CN 1145244C

[22] 申请日 1999. 3. 12 [21] 申请号 99103990. 4

[30] 优先权

[32] 1998. 3. 13 [33] JP [31] 063630/1998

[71] 专利权人 索尼株式会社

地址 日本东京

[72] 发明人 增田久 久保田重夫

审查员 杨 哲

[74] 专利代理机构 上海专利商标事务所

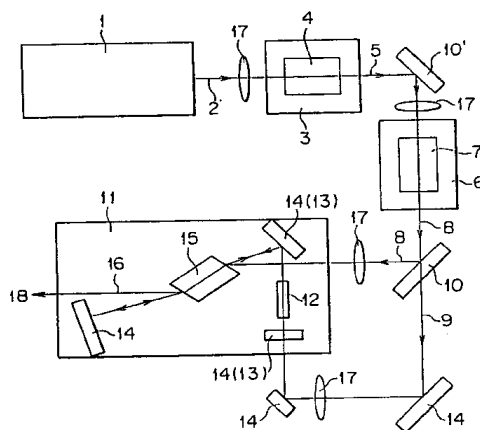
代理人 张政权

权利要求书 4 页 说明书 13 页 附图 6 页

[54] 发明名称 波长转换器

[57] 摘要

为获取波长为 200nm 或以下、重复频率高的激光束，采取下列步骤。通过转换来自激光器的波长 1.06 μ m 的激光束的波长，获得波长为 532nm 的二次谐波，进一步转换该激光束的波长获得波长为 266nm 的四次谐波，通过采用由转换上述二次谐波获得的波长 532 的激光束，或来自上述激光器的激光束来振荡钛蓝宝石激光器而获得波长约 700nm 的激光束，以及通过在激光器中的非线性晶体上混合上述激光束和波长为 266nm 的激光束为总和频率来获得波长约 190nm 的激光束。



1、一种波长转换器，其特征在于包括：

第一激光器，产生第一波长的激光束；

第一波长转换部分，转换来自所述第一激光器的所述第一波长的激光束的波长并通过二次谐波产生第二波长的激光束；

第二波长转换部分，转换所述第二波长的激光束的波长并通过四次谐波产生第三波长的激光束；

第二激光器，其上入射波长为 500 和 550nm 之间的激光束，且该第二激光器以小于所述第一波长而大于所述第二波长的第四波长振荡；以及

具有非线性光学晶体的第三波长转换部件，在所述第二激光器中混合所述第三波长的激光束和所述第四波长的激光束成为总和频率，并产生波长小于所述第三波长的第五波长的激光束。

2、如权利要求 1 所述的波长转换器，其特征在于包括：

所述第一波长在 1 和 1.1 μm 之间；

所述第二激光器，以在 650 和 785nm 之间的第四波长振荡；以及

所述第三波长转换部件 产生在 190 和 200nm 之间的所述第五波长的激光束。

3、如权利要求 1 所述的波长转换器，其特征在于，使所述第三波长的光脉冲即从所述第一激光器输出的激光束的四次谐波和为所述第二激光器而获得的所述第四波长的光脉冲在所述非线性光学晶体中保持空间和时间上的充分重叠，所述非线性光学晶体等效于通过混合所述两个光脉冲成为总和频率来产生所述第五波长的激光束的所述第三波长转换部件。

4、如权利要求 1 所述的波长的转换器，其特征在于使用反馈电路，从而使所述第三波长的光脉冲即从所述第一激光器输出的激光束的四次谐波和从所述第二激光器获取的所述第四波长的光脉冲在非线性光学晶体中保持空间和时间上的充分重叠，所述非线性光学晶体等效于利用所述第三波长的光脉冲和所述第四波长的光脉冲之间的光程差所引起的延时或对 Q-切换的激光器的触发延时，通过混合所述两个光脉冲成为总和频率来产生所述第五波长的光束的所述第三波长转换部

件。

5、如权利要求 1 所述的波长转换器，其特征在于所述第一激光器是 Q-切换的激光器。

6、如权利要求 5 所述的波长转换器，其特征在于所述 Q-切换的激光器是对之施加注入晶种的 Q-切换的激光器。

7、如权利要求 1 所述的波长转换器，其特征在于所述第一激光器是 Q-切换的激光器；所述第二激光器是由连续波激励的。

8、如权利要求 1 所述的波长转换器，其特征在于所述第二激光器以连续波振荡。

9、如权利要求 1 所述的波长转换器，其特征在于所述第一激光器和所述第二激光器均为连续波激光器。

10、如权利要求 9 所述的波长转换器，其特征在于所述第一激光器和所述第二激光器均为以单一频率振荡的连续波激光器。

11、如权利要求 1 所述的波长转换器，其特征在于，对使用注入激光器的所述第二激光器施加注入锁定或注入晶种。

12、如权利要求 11 所述的波长转换器，其特征在于所述注入激光器的注入输出是可变的。

13、如权利要求 1 所述的波长转换器，其特征在于所述第五波长等于 $193.3 \pm 0.2\text{nm}$ 。

14、如权利要求 1 所述的波长转换器，其特征在于所述第五波长的输出光束的波长为 20pm 或更小。

15、如权利要求 14 所述的波长转换器，其特征在于所述第五波长的输出光束的波长大于等于 0.05pm 且小于等于 1pm 。

16、如权利要求 1 所述的波长转换器，其特征在于在所述第二激光器中提供波长选择装置。

17、如权利要求 1 所述的波长转换器，其特征在于所述第一激光器设有包括稀土族离子的固态激光器介质。

18、如权利要求 17 所述的波长转换器，其特征在于所述第一激光器设有分别以 1064nm 振荡的 Nd:YAG 或 Nd:YVO₄ 中的任一种介质。

19、如权利要求 17 所述的波长转换器，其特征在于第一激光器设有 Nd:YLF、Nd:玻璃和 Yb:YAG 中的任一种介质。

20、如权利要求 17 所述的波长转换器，其特征在于所述第一激光器的包括铷离子的固态激光器介质由至少一个半导体激光器所激励。

21、如权利要求 1 所述的波长转换器，其特征在于激光器由通过转换从所述第一激光器输出的激光束的波长而获得的 500 和 550nm 之间所述第二波长的激光束所泵激。

22、如权利要求 1 所述的波长转换器，其特征在于所述第二激光器设有包括钛离子或铬离子的激光器介质。

23、如权利要求 22 所述的波长转换器，其特征在于所述第二激光器设有钛蓝宝石晶体、Cr:LiSAF、Cr:LiCAF 或金绿宝石晶体。

24、如权利要求 1 所述的波长转换器，其特征在于所述第二波长的激光束是由所述第一激光器所振荡的激光束的二次谐波。

25、如权利要求 1 所述的波长转换器，其特征在于所述第三波长的激光束是由所述第一激光器所振荡的激光束的四次谐波。

26、如权利要求 1 所述的波长转换器，其特征在于，接收所述第二波长的激光束并输出所述第三波长的激光束的所述第二波长转换部分设有至少一个 β -硼酸钡晶体。

27、如权利要求 1 所述的波长转换器，其特征在于，接收所述第三波长的激光束和所述第四波长的激光束并输出所述第五波长的激光束的所述第三波长转换部件设有至少一个 β -硼酸钡晶体。

28、如权利要求 1 所述的波长转换器，其特征在于，输出所述第五波长的激光束的第三波长转换部件设有激光束以布鲁斯特角或近似为布鲁斯特角入射到其上的至少一个非线性光学晶体。

29、如权利要求 1 所述的波长转换器，其特征在于所述第二激光器包含至少一个 β -硼酸钡晶体或至少一个 CLBO 晶体。

30、如权利要求 29 所述的波长转换器，其特征在于，与所述 BBO 晶体的轴 c 的相位匹配角是在 70°和 80°之间。

31、如权利要求 29 所述的波长转换器，其特征在于，与所述 BBO 晶体的轴 c

的相位匹配角是在 70° 和 77° 之间。

32、如权利要求 1 所述的波长转换器，其特征在于，所述第二激光器包含钛蓝宝石晶体和 β -硼酸钡晶体。

波长转换器

本发明涉及波长转换器，用于转换入射激光束的波长和产生特定波长的激光束。

通常，激光束具有许多特性，由于其频率高于电波的频率，信息存储能力极佳；由于其波长相等且激光束是同相的，激光束的单色性和指向性极佳；激光束具有常态波束看不到的相干性，并且还由于能极细地聚焦，能量被聚焦于微小区域，因此能局部地和即时地实现高温和高压，而且激光束被用于许多领域，诸如通信、信息、仪表、处理技术以及医学。

例如，考虑将来在用于制造半导体器件的分档器中，采用由波长 193nm 的脉冲振荡的氟化氩激光器。然而，对氟化氩激光器来说，由于难于增加重复频率，所以它只有几千赫多一点并降低了峰值功率。尽管在展宽脉冲宽度方面作了努力，但近期没有实现。

因此，要求使用于分档器中的合成石英玻璃的光强和光能密度为一固定的值或更小，以防止由曝光过渡和吸收引起的透射率和热梯度的下降，以及防止由于发生局部光程差而引起的收缩和畸度(aberration)。所以，对诸如脉冲能量的稳定等激光器性能的要求变得极其严格，并且要求提高光致抗蚀剂的敏感度。由于需要辐射固定数目的脉冲以均衡光密度，所以难以提高产量。

由于氟化氩激光器使用需要经常更换的毒性气体且构成该激光器的每一高价部件的寿命较短，所以维护成本高。

同时，产生波长为 194nm 的紫外线(连续波)以用作限制汞离子的激光收集器的技术见诸于 D.J.Berkeland 等人所写的文章(应用光学, p.4159, Vol.36, 1997)。该文中描述这样的情况，通过从波长为 515nm 的氩离子激光器辐射的波长为 257nm 的二次谐波和来自 β -硼酸钡(BBO)(β -BaB₂O₄)晶体的半导体激光器波长为 792nm 的经增强的激光束中，产生波长为 194nm 约 2mW 的总和频率。在这种情况下，BBO 晶体被安排在由以波长 257nm 的光谐振的外部谐振器和以波长 792nm 的光谐振的外部谐振器共享的位置上，而且利用通过以布鲁斯特角(Brewster angle)所切割的 BBO 晶体的色散而引起的折射角差异，把这两个外部谐

振器的光路从空间上分开。

然而，由于采用氩激光器，用上述已知的技术不能避免上述的缺点，由于采用外部谐振器，装置的尺寸增大，由于在镜面和其他部件附有杂质，反射率和透射率均受损害，以及由于机构的配准不良，输出容易变得不稳定。此外，产生总和频率的唯一方法需要配备同时锁定具有两个波长的外部谐振器的电路以及激励器，严格匹配谐振器光路长度的设备对于将光导入谐振器也是必不可少的。

如果替代氟化氩激光器使用来自能产生高重复频率的固态激光器的较高谐振，则将减小合成石英玻璃和其他部件的损坏问题和成本问题，但，由于所得的波长通常与氟化氩激光器所产生的波长不同，因此存在上述固态激光器与前面的氟化氩激光器不兼容的问题。

本发明的目的在于提供一种波长转换器(特别是激光束发生器)，其特点在于能解决上述缺点，所得到的激光束其重复频率高，波长为 200nm 或更小，对矿物性材料诸如合成石英玻璃的损害下降，使诸如分档器之类的器件的寿命得以延长，使激光器部件的寿命延长而无需使用毒性气体，由于适用脉冲的高重复频率和稳定性提高分档器和其他产品的产量，实现其整体由固体组成的紫外辐射源，可解决并能充分地提高可靠性、尺寸、维护以及检查和其他问题。另一个目的是提供了以相同的波长评估其中采用此种器件的系统的激光束源。

即是说，本发明涉及一种波长转换器，该波长转换器设有第一激光器，产生第一波长(具体说介于 1 和 1.1 μm 之间)的激光束；一波长转换部分，转换来自第一激光器的具有第一波长的激光束的波长，并产生具有小于第一波长的第二波长(具体说介于 500 和 550nm 之间)的激光束；一波长转换部分，转换具有第二波长的激光束的波长，并产生具有小于第二波长的第三波长(具体说介于 250nm 和 275nm 之间)的激光束；第二激光器，接收波长介于 500 和 550nm 之间的激光束，并以小于第一波长而大于第二波长的第四波长(具体说介于 650 和 785nm 之间)振荡；以及波长转换部件，通过在第二激光器中混合第三波长的激光束和第四波长的激光束来产生具有小于第三波长的第五波长(具体说介于 190 和 200nm 之间)的激光束。

根据本发明的波长转换器，由于通过转换来自第一激光器的第一波长的激光束的波长获得第二波长的激光束(二次谐波)，通过进一步转换该激光束的波长获得第三波长的激光束(四次谐波)，第二激光器例如采用第二波长的激光束振荡，

获得第四波长的激光束，以及通过在第二激光器中混合第四波长的激光束和第三波长的激光束获得第五激光束，因此可以产生下列显著的效果(1)至(4)。也可用另一个光源来激励第二激光器。

(1)能获得重复频率高的第五波长(具体说 200nm 或以下)的激光束，因此减小对诸如合成石英玻璃等矿物性材料的损坏，延长诸如分档器等器件的寿命。

(2)由于能用红外固态激光器作为第一激光器，不需要在氟化氫激光器中用到的那种毒性气体，且能延长激光器部件的寿命。

(3)由于在第二激光器中(即在其内部谐振器中)混合第三波长的激光束和第四波长的激光束，因此能兼得脉冲或平均功率的高重复频率和稳定性、并提高分档器等的产量。

(4)在产生总和频率时只有一个波长自动地谐振而不使用外部谐振器，因此不总是需要在外部谐振器情况下所需的锁定和激励器，而且即使采用控制波长的激励器，也不总需要严格地匹配谐振器的光路长度以引导光束进入谐振器的设备。因此，可以实现其整体由固体组成的紫外辐射源，可以解决并充分地提高可靠性、尺寸、维护、检查和其他的问题。

图 1 为示出等效于本发明第一实施例的激光束发生器的主要部分的示意图；

图 2 为示出用作激光束发生器的钛蓝宝石的吸收和发射特性的光谱图；

图 3 为示出等效于本发明第二实施例的激光束发生器的主要部分的示意图；

图 4 为说明由 LBO 晶体产生二次谐波的例图；

图 5 为说明以布鲁斯特角切割的 BBO 晶体上总和频率混合的例图；

图 6 比较各种固态激光器材料及各自特性。(摘自测量方法丛书 V.37“固态激光器”第 62 页，Kobayashi 编，日本光谱学会出版中心出版，1997)

在根据本发明的波长转换器中，使具有第三波长的光脉冲或波(它是从第一激光器输出的激光束的四次谐波)和具有第四波长的光脉冲或波(从第二激光器获得)在非线形光学晶体中保持空间和时间上的充分重叠，此非线形光学晶体等效于通过混合上述光脉冲或波为总和频率而产生第五波长的激光束的波长转换部件。

或者也可用反馈电路，使得具有第三波长的光脉冲或波(它是自第一激光器输出的激光束的四次谐波)和具有第五波长的光脉冲或波(从第二激光器获得)在非线形光学晶体中保持空间上和时间上的充分重叠，此非线形光学晶体等效于通

过混合上述光脉冲或波为总和频率而产生第五波长的激光束的波长转换部件，而且在脉冲的情况下，利用由第三波长的光脉冲和第四波长的光脉冲之间的光程差引起的延时或 Q-切换的激光器的触发延时。

上述第一激光器也可以是 Q-切换的激光器，诸如对之施加注入晶种(seeding)的 Q-切换的激光器。

此外，第一激光器是 Q-切换的激光器而第二激光器也可由连续波激励。

第二激光器振荡连续波，或第一激光器和第二激光器均为连续波(CW)激光器，例如第一激光器和第二激光器也可均是由单一频率振荡的 CW 激光器。

对采用其中注入输出可变的注入激光器(主激光器)的第二激光器可以施加注入锁定或注入晶种。

希望通过混合总和频率获得的第五波长为 $193.3(\text{氟化氢的中心波长})\pm 0.2\text{nm}$ ，而以第五波长输出的光束的波长为 20pm (微微米)或更小，而且还希望上述波长为 0.05pm 或更大，以及为 1pm 或更小。

希望在第二激光器中提供波选择装置。

希望本发明所用的第一激光器设有诸如铈离子和钇离子等稀土族离子固态激光器介质，而且第一激光器可设有 Nd(铈):YAG(钇铝石榴石)、Nd:YVO、Nd:YLF、Nd:玻璃和 Yb:YAG 中的任一种介质，它们各自在例如 $1064\text{nm}\pm 20\text{nm}$ 和在 1030nm 上振荡。第一激光器也可以是这样一种激光器，其固体激光器介质(包括铈离子)由半导体激光器或多个半导体激光器来激励。

第二激光器可通过辐射由转换自第一激光器输出的激光束波长得到的 500nm 或更大以及 550nm 或更小的第二波长的激光束来激励。

希望第二激光器设有包括钛离子或铬离子的激光器介质，而且第二激光器例如可设有掺钛的蓝宝石晶体、Cr:LiSAF、Cr:LiCAF 或金绿宝石晶体。

还希望第二激光器设有用于光学参数处理的非线性光学晶体，希望第二波长的激光束是由第一激光器振荡的激光束的二次谐波，第三波长的激光束是第一激光器振荡的激光束的四次谐波。

希望接收第二波长的激光束并输出第三波长的激光束的上述波长转换部分设有至少一个 BBO 晶体，接收第三波长的激光束和第四波长的激光束并输出第五波长的激光束的上述波长转换部件设有至少一个 BBO 晶体。

希望输出第五波长的激光束的上述波长转换部件设有至少一个非线性光学

晶体，激光束以布鲁斯特角或近似于该角入射到其上。

希望第二激光器设有至少一个 BBO 晶体或一个 CLBO($\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$)晶体，例如，相对于上述 BBO 晶体的轴 c 以角度 70° 至 90° ，或较好的 70° 至 80° ，或更好的 70° 至 77° 之间的相位匹配是可能的。

此外，希望第二激光器设有钛蓝宝石晶体和 BBO 晶体。

本发明的波长转换器可用作光电子学领域中的激光束波长转换器，诸如用于分档器、光盘，制造光主盘的装置，半导体检验设备和激光打印机中的波长转换器。

下面参照附图说明本发明的较佳实施例。

图 1 表示本发明第一实施例中的激光束发生器。

等效于本实施例的激光束发生器根据从市售的一种 Nd:YAG 激光器输出的波长 1064nm 的红外光产生二次谐波，利用二次谐波产生四次谐波，并用未转换的二次谐波激励钛蓝宝石激光器。此外，上述激光束发生器对设置在钛蓝宝石激光器的谐振器内的 BBO 晶体辐射四次谐波，产生波长约 193nm 的紫外线，这样有效地利用钛蓝宝石激光束谐振器中强的光强度。由于用一个市售的激光器能有效地产生所需的紫外线，因此该激光束发生器在成本和效率上有优势。下面将说明采用 Q-切换的 Nd:YAG 脉冲激光器的一个例子，然而除了脉冲定时部分以外，对 CW 激光器也适用类似的结构，而且，上述的 Q-切换的 Nd:YAG 脉冲激光器也可用于除了 Nd:YAG 激光器以外的激光器，且除了 BBO 晶体之外，也可用于其他非线性光学晶体。

图 1 所示的激光束发生器的配置说明如下。图 1 中标号 1 表示 Q-切换的 Nd:YAG 激光器，它振荡大 $1.06\mu\text{m}$ (1060nm)的波长上，该激光器输出的波束 2 经由光学透镜 17 导入波长转换部分 3，并由标号 4 所示的非线性光学晶体(诸如这里为 LBO(LiB_3O_5))转换成波长为 532nm 的二次谐波。

进而，在根据需要用分光(dichroic)镜 10'将波长为 $1.06\mu\text{m}$ 的基波分离之后，用波长转换部分 6 中的非线性光学晶体 7(诸如 BBO)将输出的波束转换为波长 266nm 的四次谐波 8。近来，有许多报告称从平均输出 5 至 10W 的 Nd:YAG 激光器中获得平均输出 1W 或以上的四次谐波，据估计将来能获得 10W 或以上的输出。

一部分二次谐波 5 被转换成四次谐波 8，然而一部分 9 未被转换。它们被偏

光镜或分光镜 10 所分离。钛蓝宝石激光器 11 用该二次谐波 9 来激励。

标号 12 表示钛蓝宝石晶体，该晶体设有如图 2 所示的吸收和发射特性。（参阅《固态激光器工程》第二编，W.Koechner 著，Springer Verlag 出版社，1988。）通过适当波长选择装置 13（诸如光栅、棱镜、校准器和注入晶种）使上述钛蓝宝石晶体能以波长约 700nm 振荡。如果反射镜 14 形成在上述波长（约 700nm）上有高反射率的谐振器（激光器），则钛蓝宝石激光器 11 有效振荡，内部功率极大地增加。

在谐振器 11 中，通过采用反射镜 10 和透镜 17 等导入四次谐波 8，并在非线性光学晶体 15 诸如 BBO 上（通过调整时间使得在脉冲情况下定时匹配）产生总和频率 16，能有效地产生波长约 190nm 的紫外线 18。为匹配脉冲定时，考虑简单的例子，在反射镜 10 和 BBO 晶体 15 之间提供一反射镜（未图示）以延长光程长度，并减小钛蓝宝石激光器 11 的上升时间。为了稳定，如下所述用触发脉冲的延时使两个激光器的开关定时匹配的方法也可奏效。

在图 1 所示的例子中，非线性光学晶体 15 在布鲁斯特角被切割，防止了入射光束在表面上的反射，同时，由于晶体的色散特性，可以同时实现两个波长的入射光束的合成和振荡钛蓝宝石激光器的波长的选择。

如果第一激光器采用产生波长 1064nm 的连续波的 Nd:YAG 激光器或产生波长通常为 532nm 的连续波的 Nd:YAG 激光器，则也可通过对波长转换部件采用以外部谐振器转换波长的方法来提高转换效率。为产生总和频率，例如 BBO 晶体的端面以布鲁斯特角来切割，合成和分散具有各自波长的多个波束。然而，采用分光镜、光栅和棱镜也可达到类似的目的，本发明并不限于图 1 所示的配置。波长等可根据应用的领域加以限制，在这种情况下，对第一激光器，需要采用单频激光器、其增强型激光器、对之施加注入晶种的 Q-切换的激光器或对之施加注入锁定的单频激光器。

图 3 表示等效于本发明第二实施例的激光束发生器。

等效于本实施例的激光束发生器是例如采用两个 Q-切换的激光器产生波长约为 190nm 的紫外光的装置。图 3 中的标号 20 表示诸如脉冲发生器等触发脉冲发生器，由触发脉冲发生器 20 产生的触发脉冲沿两个方向输出。此外，还可通过使分别对两个 Q-切换的激光器输入的射频(RF)信号相等来减小两个 Q-切换激光器的脉冲之间的定时不稳定和定时差异。

即，上述信号经由电缆 23 作为外触发信号输入到 Q-切换的激光器 1' 即

Nd:YAG 激光器, 同时, 在由延时发生器 21 施加延时之后, 朝向 Q-切换的激光器 1 的触发脉冲经电缆 22 被输入 Q-切换的激光器 1. 触发脉冲发生器 20 也可装入 Q-切换的激光器 1'内, 由延时发生器 21 对输出加上延时, 且该脉冲也可输入到 Q-切换的激光器 1. 根据两者中的任一种方法, Q-切换的激光器 1 输出通过把固定延时(或事先固定的或可变的延时以使定时差异最小)加到 Q-切换的激光器 1'的触发输出中而触发的 Q-切换的脉冲, 或输出送往 Q-切换的激光器 1'的触发脉冲.

从 Q-切换的激光器 1'输出的波束 2'由安排在波长转换部分 3'中的诸如非线性光学晶体(例如 LBO)等波长转换部件 4'转换成二次谐波 5'. 当分光镜 10''在必要时将波长 $1.06\mu\text{m}$ 的基波从二次谐波 5'中分离开来之后, 其余的二次谐波用于泵激由多个反射镜 14 和钛蓝宝石晶体 12 组成的钛蓝宝石激光器 11. 在随输入泵激脉冲后所经过的情况而变的上升时间之后, 钛蓝宝石激光器 11 开始脉冲的振荡.

同时, Q-切换的激光器 1 的输出由安排在波长转换部分 3 中的诸如非线性光学晶体等波长转换部件 4 转换成二次谐波 5.

当分色镜 10'在必要时将波长 $1.06\mu\text{m}$ 的基波从二次谐波 5 中分离开来之后, 其余的二次谐波由安排在下一波长转换部分 6 中的诸如非线性光学晶体(诸如 BBO)等波长转换部件 7 转换成四次谐波 8. 根据需要设置分色镜 10 使它具有选择性地反射四次谐波的作用.

钛蓝宝石激光器 11 由平行的平面组成, 但也可以布鲁斯特角来切割这两个平面. 图 3 中, 波长转换部件 15(诸如 BBO)也可以布鲁斯特角来切割, 并可设有合成或分离波长不同的波束的功能, 然而也可组合使用平行平面的波长转换部件 15 和诸如棱镜、分光镜和光栅等元件.

为在波长转换部件中有效地混合总和频率并获得所需的短波长光束 18, 由于作为总和频率的输出大致正比于四次谐波 8 的强度和钛蓝宝石激光器 11 的谐振器中脉冲强度的乘积, 所以要求到达波长转换部件 15 的脉冲的时间近似相等.

如果延时发生器 21 的延时量为 τ , 触发之间经电缆的传输时间之差(1'相对于 1 的延时)为 τ_0 , 两个激光器 1 和 1'之间的上升时间之差(1'相对于 1 的延时)为 τ_1 , 从脉冲产生到波长转换部件 15 的波束传播距离之差而引起的时间差(1'相对于 1 的延时)为 τ_2 , 以及钛蓝宝石激光器 11 的上升时间为 τ_3 , 那末钛蓝宝石激光器 11

是在所述四次谐波 8 到达波长转换部件 15 以及上述四次谐波到达波长转换部件 15 后的“ $\tau_0+\tau_1+\tau_2+\tau_3-\tau$ ”时刻被激励的。

Q-切换的脉冲宽度的典型值 Δt 在 5 和 100 纳秒之间，如果 $\tau_0+\tau_1+\tau_2+\tau_3-\tau>\Delta t$ ，则由于两个脉冲的通过时间变得有偏差，因而降低了效率。然而，当 $(\tau_0+\tau_1+\tau_2+\tau_3-\tau)$ 接近于 0 时，则两个脉冲的重叠增加，从而可提高波长转换部件 15 中的转换效率。

因此，也可把电缆延时加到触发脉冲，使得 $\tau_0=\tau-\tau_1-\tau_2-\tau_3$ ，或者也可设置光程差使 $\tau_2=\tau-\tau_0-\tau_1-\tau_3$ ，进而有取决于组合的多种方法。然而，一旦激光器被组装后，通常用电学方法控制延时发生器 21 的延时量 τ 比改变 τ_0 、 τ_1 和 τ_2 更容易。这就是说，只要把 τ (通常 >0)设定为使得 $\tau=\tau_0-\tau_1-\tau_2-\tau_3$ 。

此外，通过对相位延时量 τ 等加上小振荡的方法来产生偏振光误差信号，从而使输出光束 18 是最稳定的，当在这里设置总是包括延时量 τ 在内的反馈电路时，输出光束 18 稳定地达到最大。

还有，通过采用在所需波长上振荡的低输出激光器对钛蓝宝石激光器 11 施以注入晶种来减小 τ_3 ，以及通过改变晶种激光器的发光能量和频率，使输出 18 稳定地达到最大。

在图 1 和 3 所示的例子中，可给出驻波谐振器作为钛蓝宝石激光器谐振器 11，但也可用环形谐振器。特别是，如果使用在其中可迫使光束在一个方向上前进的环形谐振器，那末据估计在稳定性和提高效率方面也将产生效果。

除了以上的例子以外，在激光器和转换波长中所用的非线性光学晶体等也可作多种选择。

在上述两个等效于本发明的每个实施例的激光束发生器中，由于通过转换来自激光器 1 的波长 $1.06\mu\text{m}$ 的激光束 2 的波长来获得波长 532nm 的二次谐波，进一步通过转换该激光束的波长获得波长 266nm 的四次谐波 8，通过使用波长 536nm 的激光束 5' 来振荡钛蓝宝石激光器 11 而获得波长约 700nm 的激光束，其中激光束 5' 是由转换上述二次谐波 5 或来自激光器 1 的激光束 2' 的波长获得的，通过在激光器 11 的非线性光学晶体 15 上把上述激光束和波长 266nm 的激光束 8 混合成总和频率来获得波长约 190nm 的激光束 18，因此产生下列显著的效果(1)至(4)。

(1)能获得重复效率高和波长为 200nm 或以下的激光束 18，因此减小对诸如

合成石英玻璃等矿物性材料的损坏，延长诸如分档器等的寿命。

(2)由于红外固态激光器能用作激光器，故不需要在氟化氫激光器中用到的那种毒性气体，能延长激光器部件的寿命。

(3)由于在激光器 11(即在内部谐振器)中混合波长 266nm 的激光束 8 和波长 700nm 的激光束成为总和频率，因此能兼得脉冲的高重复频率和稳定性，并提高分档器等的产量。

(4)通过在产生总和频率时只有一个波长自动地谐振而不用外部谐振器，因此不总是需要在外部谐振器的情况下所需的锁定和激励器，而且即使采用控制波长的激励器，也不总是需要严格地与谐振器的光程长度匹配以引导光束进入谐振器的设备。因此，可以实现整体由固体组成的紫外辐射源，可解决和充分地提高可靠性、尺寸、维护、检查等问题。

下面将说明上述波长转换部件，给出每种材料的具体组分和数值。

如下说明采用以 1064nm 振荡的 Nd:YAG 激光器作为激光器、采用钛蓝宝石激光器作为振荡在约 700nm 的激光器、采用产生二次谐波的 LBO(LiB₃O₅)和产生四次谐波的 BBO(β -BaB₂O₄)分别作为非线性光学晶体的情况。

对于采用 LBO 从 Nd:YAG 激光器中有效地产生二次谐波的方法，有一种在室温类型 1 下使相位匹配的方法，但其缺点是由于离散引起转换效率有些下降，使得输出光束的波形对称性也下降。

至于防止这些缺点的方法，已知一种使 LBO 晶体在 150 °C 左右加热并实现类型 1 非精密相位匹配的方法(见图 4)。在这种方法的情况下，降低(消除)离散效应，能使波长被有效地转换，保持输出光束的对称性与入射光束近似相同。

例如，LBO 的折射系数的色散随波长的关系在 JQE QE-30 p.29, NO.12(K.Kato 著，1994 年)有叙述。根据该文计算基于晶轴 b 的波长 1064nm 的偏振光的折射系数和基于晶轴 c 波长 532nm 的偏振光的折射系数，结果如下。

$$n_b(1064)=n_c(532)=1.6053 \quad (150 \text{ }^\circ\text{C 附近})$$

在波长为 1064nm 的情况下以 a、c 和 b 的次序从较小的折射系数选定各轴。在相位沿这一方向匹配的情况下，参照《非线性光学晶体手册》(V.G.Dmitriev 等著，Springer Verlag 出版社，1991)，有效二阶非线性光学常数 d_{eff} 的绝对值约为 $0.85 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ 。在图 3 所示的例子中，为简单起见省略了保温约 150 °C 用的炉子。

为使效率最大化，要求选择晶体中的束径。这在《J.Appl.Phys.(应用物理杂

志》 Vol.39 , p.3597(J.D.Boyd 和 D.A.Kleiman 著, 1968)和美国专利 USP-3530301 中有详述. 由于图 3 所示的例子等效于这些文件中参数 B 为零(离散角为零)的情况, 当聚焦参数 ζ 接近 2.84 时效率为最大. 然而, 由于在输入脉冲的转换效率超出约 20 % 的情况下不能忽略晶体中波长 1064nm 的基波被转换的程序和消耗, 因此观察到最佳值稍有偏离. 在离散的情况下, 最佳值将进一步偏离, 在日本专利申请 No.Hei 8-133669(Shigeo Kubota 等申请)中描述了上述情况.

接着, 说明采用 BBO 产生四次谐波. BBO 是单轴晶体, 其折射系数的色散随普通光线和非常光线的关系在《IEEE JQE Vol.QE-22》(K.Kato,1986) 的第一 013 页中有叙述.

根据测量的值和《J.Appl. Phys. Vol.62》(D.Eimerl 等著, 1987)第一 968 页上温度特性的数据, 如果 T 是摄氏度, 则上述折射系数的色散如下.

$$n_x^2 = 2.73628 + \{0.0188366/(\lambda^2 - 0.0174084)\} - 0.0142199\lambda^2 - 1.66 \times 10^{-5} (T - 25)$$

$$n_z^2 = 2.37061 + \{0.0127987/(\lambda^2 - 0.0153556)\} - 0.00337865\lambda^2 - 0.93 \times 10^{-5} (T - 25)$$

如果温度接近普通温度(T=25 °C), 则光轴和轴 c 之间的角度 θ (相位匹配角)为大约 47°.

[表达式 1]

$$n_c^*(\theta) = n_o^{2\theta}$$

钛蓝宝石激光器使用激光器晶体, 该晶体中钛离子(Ti³⁺)被掺入蓝宝石晶体, 如《激光器聚焦, Vol 14》(P.F.Moulton 著, 1983 年 5 月)的第 83 页所述, 钛蓝宝石激光器吸收波长约 400 至 600nm 的光束并发射波长在 800nm 左右 650 至 1000nm 的光束, 如图 2 所示.

例如, 为发射波长约 193nm 的波长, 按照下式, 钛蓝宝石激光器以波长约 700nm 振荡.

$$\lambda = 1/(1/266 - 1/193) \text{ (nm)}$$

波长 700nm 稍微偏离图 9 所示振荡线的中心, 获得增益约等于峰值的一半.

例如用棱镜选择波长. 此外, 通常组合双折射滤光片、光栅、校准器、分光镜等. 如果通过脉冲减小上升时间并以单模式对波长执行控制, 则采用以所需波长等以单模式振荡的半导体激光器施加注入晶种是有效的.

如果第一红外激光器利用 Nd:YLF 激光器的 1047nm 的振荡, 则四次谐波的

波长为 261.8nm，且来自钛蓝宝石激光器的波束波长是根据下式得到的值，约 735nm。

$$\lambda = 1 / (1/261.8 - 1/193) \quad (\text{nm})$$

由于波长有点靠近增益的中心，因此增益也有所增加，上述情况是有利的。

如果第一红外激光器利用 Yb:YAG 激光器的约 1030nm 的振荡，则四次谐波的波长为 257.5nm，且来自钛蓝宝石激光器的光束的波长进一步靠近增益的中心，因此上述情况是有利的。

$$\lambda = 1 / (1/257.5 - 1/193) \quad (\text{nm})$$

在最后一级产生波长 193nm 激光束的过程中，BBO 或 CLBO($\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$) 是合适的。在重复频率超过连续波或 Q-切换的脉冲约 1kHz 的情况下，热特性极佳的 BBO 是合适的。同时，据称在重复频率低的脉冲光的情况下，CLBO 是合适的。此外，可以用诸如 KB5、KBBF、SBBC、CBO 等晶体。首先说明采用 BBO 的情况。

为了简单起见，说明在钛蓝宝石激光器中将基于 Nd:YAG 激光器 1064nm 的振荡的四次谐波和波长 266nm 的激光束混合为总和频率的情况。

根据上述折射系数的色散，在常温下这种情况如下(Sellmeier 方程):

$$n_o(266\text{nm}) = 1.75737$$

$$n_o(703\text{nm}) = 1.66396$$

$$n_e(193\text{nm}) = 1.73191 \quad (\text{波长外推法})$$

并计算相位匹配角为大约 73.5° 。考虑到测量误差和色散，如果加上约 $\pm 3.5^\circ$ 的范围，则相位匹配角在 70° 至 77° 之间，由于 Sellmeier 方程的较大误差，也许为 70° 至 82° 。

为提高转换效率，需要增加近红外辐射和深紫外辐射的强度。原因之一是考虑到 BBO 晶体被安排在钛蓝宝石激光器的谐振器内。为提高效率，在 BBO 内波长 266nm 的波束与波长约 700nm 的波束(具有尽可能接近各自波束的共焦参数)充分地重叠是必不可少的。

通过例如以布鲁斯特角切割 BBO 的端面，利用色散使钛蓝宝石激光器的光路和波长 266nm 的波束光路在 BBO 内重叠，并可在 BBO 外分开。可用《应用光学 Vol.36》(D.J.Berkeland 等著，1997)第四 159 页上的类似方法并构成具有两个波长的外部谐振器。根据图 5 所示的这一方法，波长 266nm 的波束入射到 BBO

上，振荡钛蓝宝石激光器，可提高产生总和频率的效率。但是，由于以布鲁斯特角切割的面所偏振的光对所产生的波长 193nm 的波束起到如 s 偏振光的作用，因此根据不同情况会发生反射损耗和引起破坏。

图 5 表示相对于以布鲁斯特角切割的 BBO 而出现的三种波长的光束。折射角之间的差异被表示成比实际上要夸大一些。对各自的波长示出其典型值，但是，当四次谐波的波长短时，在图 5 中波长为 700nm 左右的激光束的波长变为约 785nm，以获得所需的紫外线。

此外，上述文件还描述这样的情况，将波长为 515nm 的氩离子激光器中波长为 257nm 的二次谐波和波长为 792nm 的被增强的半导体激光束入射到 BBO 晶体，产生约 2mW 波长为 194nm 的总和频率。将 BBO 晶体安排在由两个外部谐振器共享的位置上，一个外部谐振器与波长 257nm 的波束谐振，另一个与波长 792nm 的波束谐振。利用由 BBO 晶体(以布鲁斯特角切割)上的色散而引起的折射角之间的差异使两个外部谐振器的光路分开。因此，总和频率发生装置至少要求提供用于同时锁定两个波长的外部谐振器和激励器的电路。

同时，在本发明的波长转换器中，利用来自固态激光器的二次谐波同时实现四次谐波的发生和钛蓝宝石激光器的振荡，而且产生总和频率的 BBO 被安排在钛蓝宝石激光器的谐振器中。因此，除了固态激光器和气体激光器之间的差别和各自的波长不同之外，本发明的方法与上述文献中方法的极大不同之处还在于，不同时使用两个所谓的外部谐振器和在产生总和频率时自动地振荡一个波长。由于上述差异，因此可实现其整体由固体材料组成的紫外辐射源，而且根据本发明的波长转换器在可靠性、尺寸、维持和检查等方面提供了足够的优点。此外在需要以两个外部谐振器严格匹配光路长度以独立地和/或同时地引导光进入谐振器的设备方面，上述的波长转换器也具优势。

下面说明第一激光器是 Nd:YAG 激光器以外的激光器的情况。

来自以 1064nm 振荡的 Nd:YAG 激光器的四次谐波的波长是 266nm，为了例如采用以上四次谐波来获得波长 193.3 nm 的紫外线，为最终获得总和频率所需的激光器的波长是约 707nm，采用钛蓝宝石激光器。

同时，如果利用 Nd:YLF 激光器的 1047nm 的振荡，则四次谐波的波长为 261.8nm，而且要求获得波长 193.3nm 的波束所需的激光器的波长为约 739nm。当所需的波长被扩展约 30nm 时，可供使用的激光器的类型就增加了，如图 6 所

示(参阅测量方法丛书的“固态激光器”的第六2页(Kobayashi 编, 日本光谱学会出版中心出版, 1997)), 例如也可用 Cr:LiCAF 等, 可利用在产生连续波时效率尤其高等优点。然而, 虽然在连续波的情况下, Cr 离子激光器的荧光寿命长且效率极高, 但在脉冲情况下, 上升时间通常被延时。

还有, 如果采用波长约 1030nm 的 Yb:YAG 激光器, 则四次谐波是 257.5nm, 通过以波长约 775nm 振荡的激光器可以产生波长 193.3nm 的紫外线。由于钛蓝宝石激光器和 Cr: LiCAF 一类激光器的效率通常在上述波长附近有所提高, 因此能获得系统效率提高的效果。图 6 示出这种现象。由于 Yb:YAG 激光器的高能开发是近斯开始的, 且该激光器是伪三级激光器, 因此阈值与振荡效率对温度的依赖性通常较大。

也可采用光学参数型振荡器代替以波长约 700nm 振荡的钛蓝宝石激光器, 在这种情况下能获得减小上升时间的效果。如果构成一谐振器, 则在其中安排非线性光学晶体, 使光束在满足相位匹配条件的方向上传播, 而且上述非线性光学晶体例如以波长约 532nm 的波束来激励, 那末能产生波长约 700nm 的波束和波长约 2 μ m 的波束。由于反射镜的反射率(它在 700nm 情况下是增加的)通常也随着其三倍波长增加, 因此, 可容易地降低参数型振荡器的阈值。

本发明的较佳实施例已如上说明, 但本发明不限于上述实施例。

根据本发明的波长转换器, 由于第二波长(二次谐波)的激光束是通过转换来自第一激光器的第一波长的激光束的波长而获得的, 第三波长(四次谐波)的激光束是通过进一步转换该激光束的波长获得的, 第四波长的激光束是通过用第二波长的激光束来振荡第二激光器获得的, 以及第五波长的激光束是在第二激光器中混合第四波长的激光束和第三波长的激光束为总和频率而获得的, 因此, 能获得其重复频率高而其波长为 200nm 或以下的激光束, 能减小对诸如合成石英玻璃等矿物性材料的破坏, 能延长分档器等的寿命, 由于不用毒性气体和高的峰值功率能延长激光器零件的寿命, 由于兼得高重复频率和脉冲稳定性能提高分档器等的产量, 能实现其整体由固体组成的紫外辐射源, 能解决可靠性、尺寸、维护、检查等问题, 以及能充分提高可靠性。

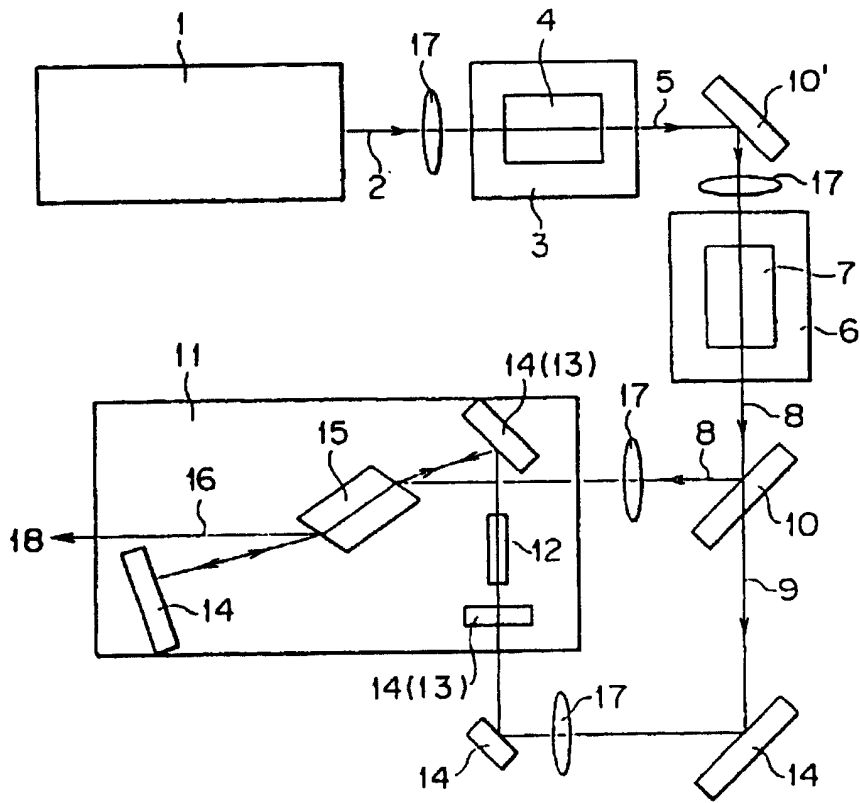


图 1

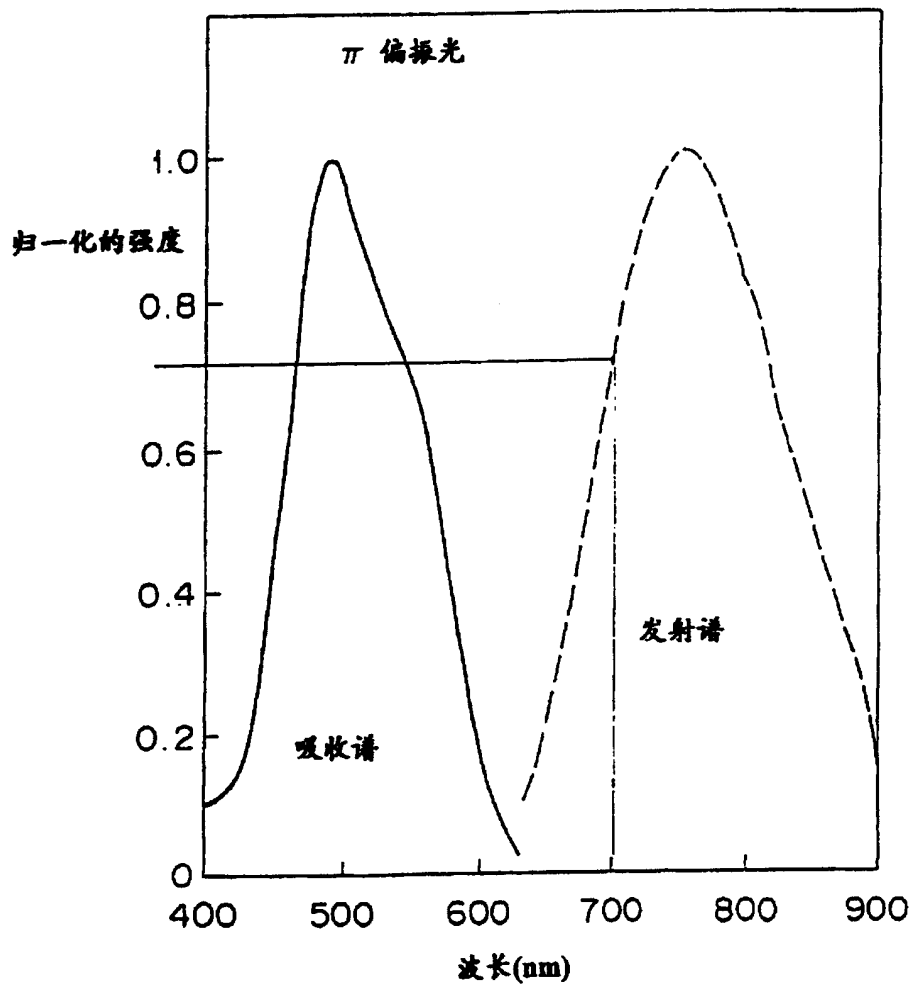


图 2

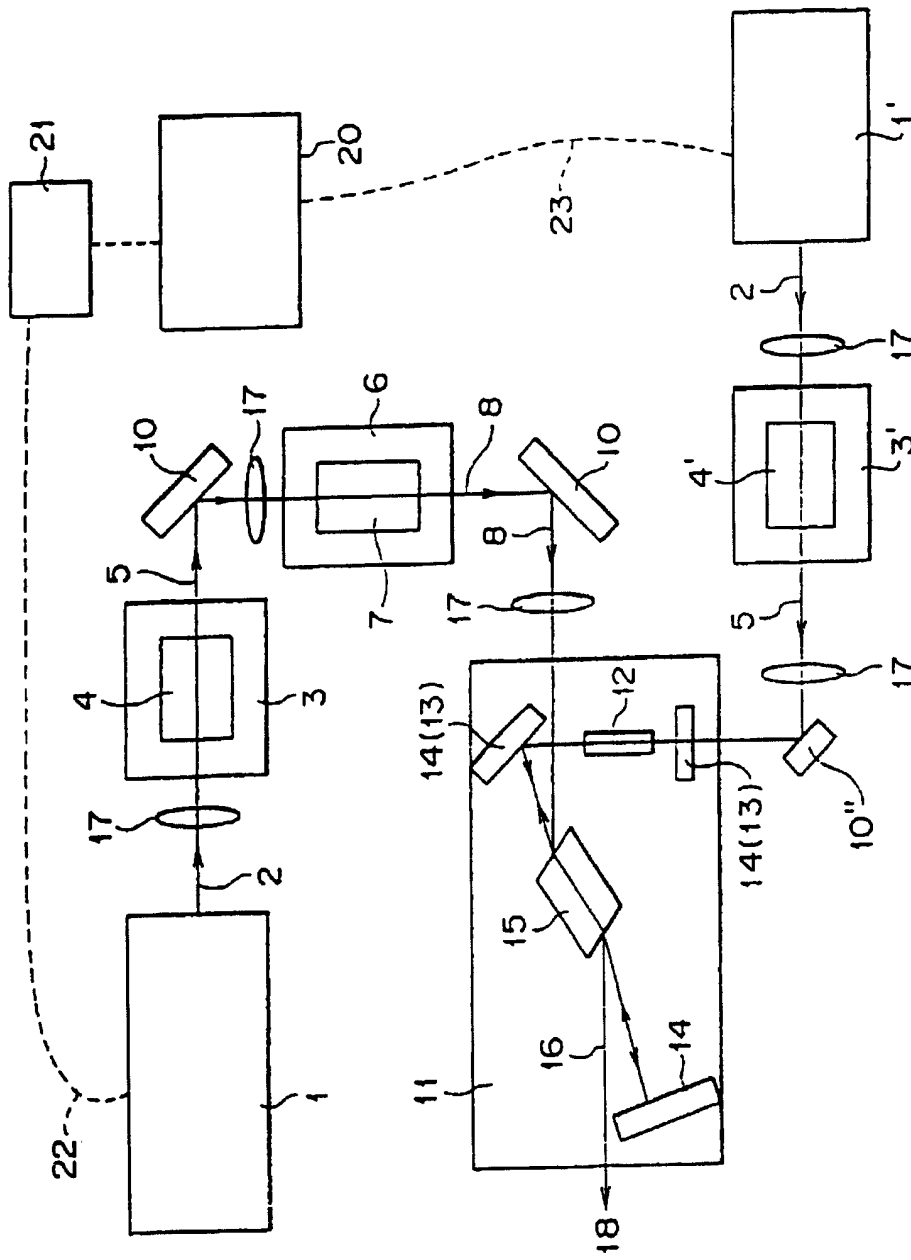


图 3

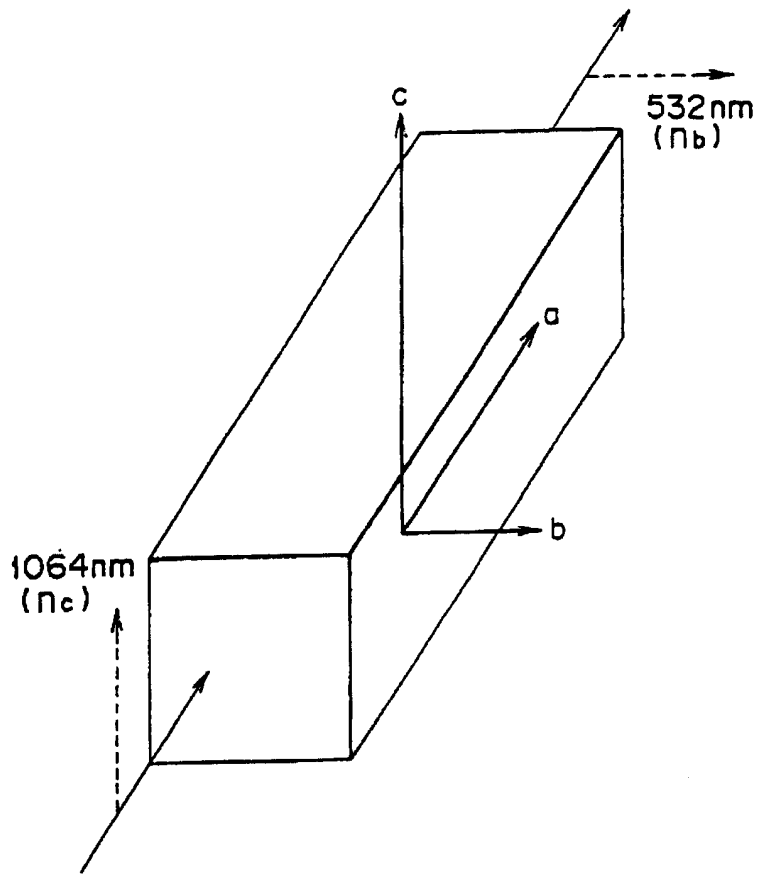


图 4

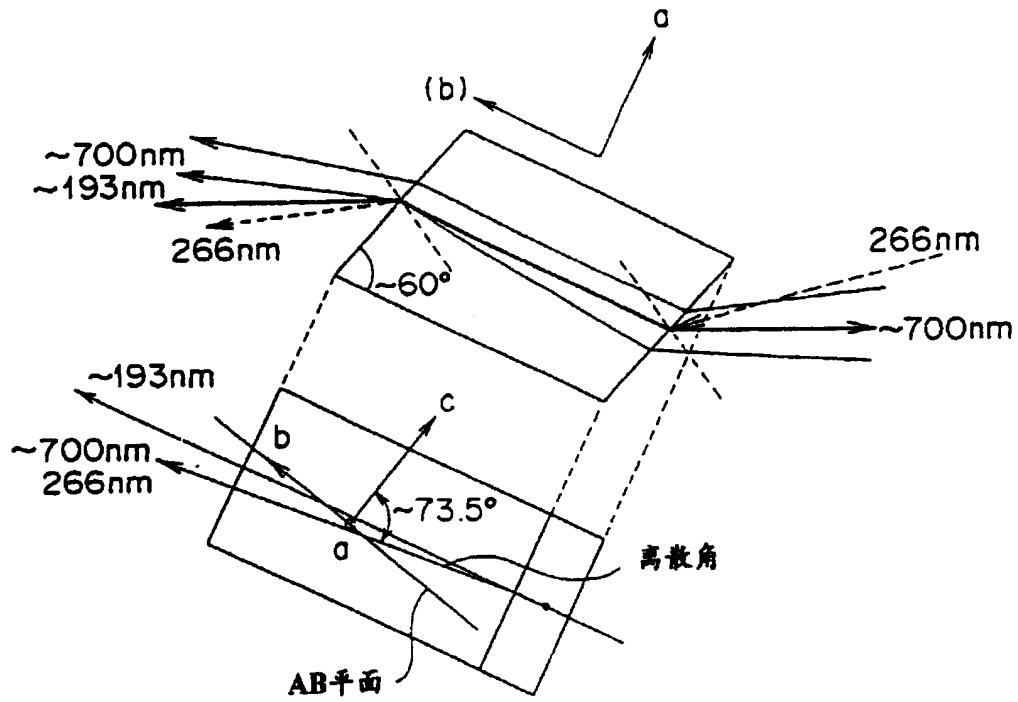


图 5

在室温下振荡的固态激光材料的特性

| 主晶体(名称) | 受激发射截面 $\sigma_d (\times 10^{-20} \text{ cm}^2)$ | 荧光寿命 $\tau (\mu\text{s})$ | 热传导系数 (W/cm K) | 振荡波长 (nm) | 激励方法(振荡模式) |
|---|---|------------------------------|-------------------|------------------------|--------------------------|
| $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$ (金绿宝石) | 1.0~5.0 | 220 | 0.23 | 730~805 751 | 闪光灯(脉冲) LD (CW) |
| $\text{Cr}^{3+}:\text{LiCaAlF}_6$ (LiCAF) | 2.8 | 170 | 0.05 | 720~840 795 | 闪光灯(脉冲) LD (CW) |
| $\text{Cr}^{3+}:\text{LiSrAlF}_6$ (LiSAF) | 4.8 | 67 | 0.05 | 780~1010 850~935 | 闪光灯(脉冲) LD (CW) |
| $\text{Cr}^{4+}:\text{Gd}_3\text{Sc}_2\text{Ca}_3\text{O}_{13}$ (GSGG) | ~0.1 | 115 | 0.06 | 745~820 | 闪光灯(脉冲) Kr 激光器 (CW) |
| $\text{Co}^{3+}:\text{MgF}_2$ | ~0.15 | 37 (210, -48°C) | | 1750~2500 | YAG激光器(脉冲) (1338 nm) |
| $\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_3\text{SiO}_4$ (FORESTELITE) | ~2 1.5 | 3.6 2.7 | | 1200~1320 1167~1345 | YAG激光器(CW) YAG激光器(脉冲) |
| $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ | 40 | ~4 | 0.13 | 1340~1540 | YAG激光器(脉冲) YAG激光器(CW) |
| $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ (钛蓝宝石) | 30 | 3.2 | 0.35 | 660~1100 | YLF激光器(脉冲) 闪光灯(脉冲) |
| $\text{Ti}^{3+}:\text{BeAl}_3\text{O}$ (钛蓝宝石) | 0.6 | 6.0 | 0.23 | 730~950 | |
| $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ | 40 | ~230 | 0.13 | 1064 | |
| $\text{Nd}^{3+}:\text{glass}$ (磷酸盐) | 4.0 | ~350 | 0.0019 | 1053 | |

图 6