



[12] 发明专利说明书

[21] ZL 专利号 91109846.1

[51]Int.Cl⁶

C30B 29/34

[45]授权公告日 1996年7月17日

[24]颁证日 96.4.13

[21]申请号 91109846.1

[22]申请日 91.10.24

[30]优先权

[32]90.10.25[33]FR[31]9013231

[73]专利权人 法国原子能委员会

地址 法国巴黎

[72]发明人 C·富尔 R·蒙科 R·罗梅罗
C·怀恩

H01S 3/16

[74]专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司
代理人 马崇德

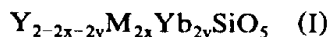
权利要求书 2 页 说明书 12 页 附图页数 1 页

[54]发明名称 钇和镧系的混合硅酸盐用途

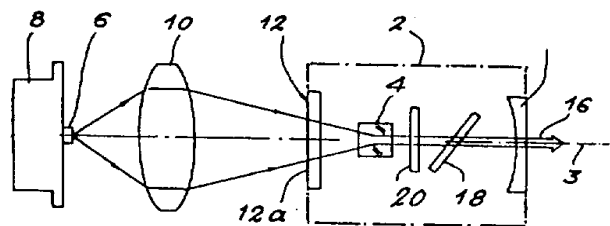
[57]摘要

钇和镧系元素的混合硅酸盐，以及使用这些硅酸盐单晶的激光器。

该激光器具有一个激光腔室(2)，该腔室包含有一个作为激光发射体的单晶(4)，用于使从单晶出来的光线加强的装置(12, 14)。用于消除来自激光器腔室的装置(14)，以及光泵激装置(6)，其特征在于，该单晶具有化学式(I)：

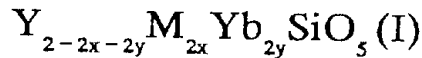


其中 M 代表选自 Er 和 Tm 中的一个镧系元素，而其中的 x 和 y 分别代表一个满足于数学式 $0 < x < 0.2$ 和 $0 < y < 0.2$ 的一个数。



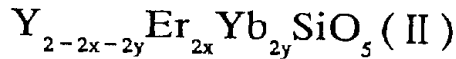
权 利 要 求 书

1. 一种掺杂的原硅酸钇单晶的用途, 用作为激光器的发射体, 它是由具有如下的化学式 (I) 的混合的钇与镧系元素的硅酸盐单晶所组成:



其中 M 表示选自 Er 和 Tm 的一种镧系元素, x 和 y 表示数字, 满足下列条件, $0 < x \leq 0.2$, $0 \leq y \leq 0.2$ 。

2. 如权利要求 1 的用途, 其特征在于 M 表示 Er, 式 (I) 可表示为式 (II),



其中, x 和 y 分别为满足于 $0 < x \leq 0.15$ 和 $0 \leq y \leq 0.2$ 的数。

3. 如权利要求 2 的用途, 其特征在于, x 满足于数学式 $0.005 \leq x \leq 0.15$ 。

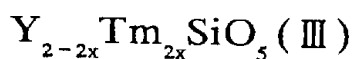
4. 如权利要求 2 的用途, 其特征在于, x 满足于数学式 $0.01 \leq x \leq 0.03$ 。

5. 如权利要求 2 的用途, 其特征在于, y 满足于数学式 $0.08 \leq y \leq 0.2$ 。

6. 如权利要求 2 的用途, 其特征在于, 该硅酸盐的化学式为 $Y_{1.98} Er_{0.02} SiO_5$ 。

7. 如权利要求 2 的用途, 其特征在于, 该硅酸盐的化学式为 $Y_{1.74} Er_{0.06} Yb_{0.20} SiO_5$ 。

8. 如权利要求 1 的用途, 其特征在于 M 表示 Tm, $y = 0$, 式 (I) 可表示为式 (III),



其中 x 为满足于数学式 $0 < x \leq 0.2$ 的一个数。

9. 如权利要求 8 的用途, 其特征在于, x 满足于数学式 $0.005 \leq x \leq 0.2$ 。

10. 如权利要求 8 的用途, 其特征在于, 该硅酸盐的化学式为 $Y_{1.76}Tm_{0.24}SiO_5$ 。

说明书

钇和镧系的混合硅酸盐 用途

本发明涉及单相形式的，特别是制成单晶形式的，钇和镧系的混合硅酸盐。

本发明所涉及的硅酸盐最常用于下列各技术领域，包括：用于集成光学系统的微型激光器、光纤通讯、医学（微型手术、皮肤和眼睛的治疗）、半导体研究和科学研究（有机分子和材料的光谱），以及可用于进行大气遥控分析和用于空间通讯的功率激光器。

这些激光器能在室温下发射出一种波长处于人眼安全区域之内的，波长约在 1.55 至 $2 \mu\text{m}$ 一带的激光。这些激光器具有一定程度的波长可调性。

在已知的技术中，能够发射一处波长接近于 $1.55 \mu\text{m}$ 光波的激光器发射体是通过把 Er^{3+} 离子掺杂进一种能够透过所说波长的基质（即晶体或玻璃）而制得的。在 Er^{3+} 离子的激发态 $^4\text{I}_{13/2}$ 和基态 $^4\text{I}_{15/2}$ 之间的电子跃迁形成了一种三能级激光。由于所说电子跃迁而发射出的光波波长与 Er^{3+} 离子的结晶学环境密切相关，这一点正如附表 1 所示。

在室温下其发射波长在 $2 \mu\text{m}$ 附近的可调激光器已经能够用一些已知的激光材料生产出来，所说的激光材料是指用 Tm^{3+} 和 / 或 Ho^{3+} 离子掺杂的 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ， $\text{Y}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ ， YAlO_3 ， LiYF_4 。这些激光器分别利用了 Tm^{3+} 离子在其 $^3\text{F}_4$ 能级和基态能级 $^3\text{H}_6$ 之间

的电子跃迁以及 Ho^{3+} 离子在其 $^5\text{I}_7$ 能级和基态能级 $^5\text{I}_0$ 之间的电子跃迁。从而有了三能级的激光器，对于这些激光器来说，基态能级在室温的粒子数增加具有重要的功能。

Er^{3+} 、 Ho^{3+} 和 Tm^{3+} 离子的一种十分重要的性质是在这些受激离子之间，能量转移的可能性很大，这就导致了交叉弛豫（cross-relaxation）和向上转移（up-conversion），这些现象常常限制了在红外区电子跃迁的效率。

因此，有可能用掺杂有 Er^{3+} 离子的 YAlO_3 ， $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ， $\text{Y}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ ， LiYF_4 或 YF_3 晶体制成这样一种激光器，当在近红外区对其单晶进行泵激时，它就能发射一种绿光，也有可能用掺杂有 Tm^{3+} 离子的 LiYF_4 晶体制成这样一种激光器，当在近红外区对其单晶进行泵激时，它就能发射蓝光。如此就可以明白，这些离子在1.55至 $2\mu\text{m}$ 一带的特征红外区受激发射效率要受到显著的影响。

玻璃和掺杂了 Er^{3+} 的 SiO_2 纤维将显示出可以部分地克服上述单晶材料的缺点。这些掺杂了 Er^{3+} 的基质能受激发射一种波长处于最大的人眼安全范围内的激光（见表1），除此之外，玻璃及其纤维具有高密度的声子，这种特征使它们有可能降低 Er^{3+} 离子的电子能级，并且通过这些离子之间的能量转移，或通过非辐射的弛豫过程，有可能任选地提高电子能级。遗憾的是，玻璃及其纤维的热力学性能，特别是它们的热导率要比上述单晶物质的热导率低得多，因此它们不适合用作具有平均高功率的激光器的结构材料。

此外，要生产一种能够在1.55至 $2\mu\text{m}$ 一带的波长范围内发射激光的功率激光器应包括在激光器的腔室中使用这样一种单晶材料（由于它们具有优良的热力学性质），这种材料易于掺杂进 Er^{3+} 、 Tm^{3+} 和

Ho^{3+} 离子，而且对于这些掺杂工艺来说，这种单晶材料在所说的这些离子之间发生能量转移的可能性非常小。

为了把所说的这些能量转移减少到最低程度或者根本上将其消除，解决的办法之一就是利用一种由体积巨大的阴离子基团为主构成的基质（例如硅酸盐）来将激活的 Er^{3+} 、 Ho^{3+} 和 Tm^{3+} 离子相互隔离开。此外，象玻璃及其纤维一样，硅酸盐具有声子密度大的特点。因此，由于交叉弛豫和/或向上转移而任意地提高了的激活离子的电子能级，最好通过有声子参与的，非辐射的弛豫过程而使其放光，从而达到在红外区域中激光跃迁的更高能级，这样就可以相应地提高在 1.5 至 $2\ \mu\text{m}$ 一带受激发射的效率。

在这些硅酸盐中，掺杂有稀土元素的氧化原硅酸钇的单晶 Y_2SiO_5 （下文称为YSO）具有受注意的发光性能。

在共掺了 Er^{3+} 的YSO单晶中，以及共掺了 Er^{3+} 和 Tm^{3+} 的YSO单晶中的 Ho^{3+} 离子的发光性质已由A. M. Morozov等人进行过研究（Opt. Spectrosc, Vol. 41, 6 (76), p. 641-642），并且这种发光性质已被用来生产这样一种激光器，该激光器可用一种能发射 $2.1\ \mu\text{m}$ 附近区域光线的闪光灯来泵激，并且它只对 $T < 220\ \text{K}$ 起作用。

为了提高泵激效率并从而提高基于激活 Ho^{3+} 离子的激光器的总效率，把 Er^{3+} 和 Tm^{3+} 离子共掺进YSO单晶中，以便提高这种材料在所说闪光灯的发射波长区域内的平均吸收系数。 Er^{3+} 和 Tm^{3+} 离子都被用来作为有效活化 Ho^{3+} 离子受激发射的敏化剂。还有人研究过把这些共掺工艺用到YAG和 LiYF_4 单晶中（E.P.Chicklio et al., IEEE J. of Quant. Electr., Vol. QE 8, 2 (1972), p.225-234）。

在借助于灯发射的泵激光中， Er^{3+} 和 Tm^{3+} 是处于中间状态的，

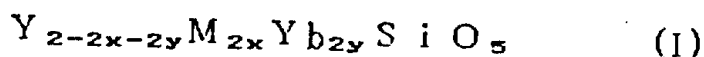
而 Ho^{3+} 离子只有在 $2.1\ \mu\text{m}$ 附近产生受激发射。以 Er^{3+} 和 Tm^{3+} 离子为一方而以 Ho^{3+} 离子为另一方这二者之间进行能量转移的可能性很大。A.M.Morozov没有观察到来自 Er^{3+} 和 Tm^{3+} 离子的任何受激发射。

此外，一种掺杂有 Nd^{3+} 离子的YSO单晶已被制造出来，该单晶在 0.912 和 $1.075\ \mu\text{m}$ 处能产生有效的受激发射，这情况在论文(K. S. Bagdasarov et al, Sov. Phys. Dokl., Vol.18,10(74), p.664)中有所介绍。

本发明涉及一类单晶形式的，钇和镧系的新颖混合硅酸盐，这类混合硅酸盐可用作激光发射体，并且，尤其是因此可使这种激光发射体克服上述的缺点。特别是，这些硅酸盐在激光器工作的环境温度下能产生一种处于红外范围内的具有平均高功率的有效受激发射。

更具体地说，本发明涉及一类掺杂有 Er^{3+} 或 Tm^{3+} 离子并任选地共掺有 Yb^{3+} 离子的，钇和镧系的单相氧原硅酸盐。

这些氧化原硅酸盐具有如下通式(I)：



其中，M代表选自Er和Tm中的一个镧系元素，而x和y分别代表满足于数学式 $0 < x \leq 0.2$ 和 $0 \leq y \leq 0.2$ 的一个数。

这些经过掺杂的氧原硅酸钇可以用常规的，从熔体中提拉的方法(例如Czochralski法或Bridgman法)制成单晶的形式。

Er^{3+} 和 Tm^{3+} 的离子半径皆接近于 Yb^{3+} 的离子半径，而这些镧系元素离子的分凝系数接近于1，并且据报导，这些元素的硅酸盐的熔点相同。这就有助于这些硅酸盐的晶体生长，因此有可能借助于在工业上用来生产功率激光器的Czochralski法来制造出大的高质量的单晶。

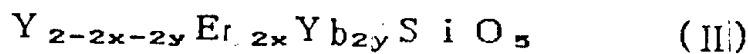
与玻璃相比，YSO在热力学性质方面，特别是在热导率方面更接

近于化学式为 $Y_3 Al_5 O_{12}$ 的钇铝石榴石。这种优良的热导率可使得在发射激光晶体中产生的热很快地扩散出来，这一点对于生产功率激光器来说是必需的。

使用本发明的硅酸盐单晶的激光器可以用灯或用一个或多个激光二极管来进行光泵激，并且最好是采用激光二极管来进行光泵激。这样，由于这些激光二极管具有体积十分小的优点，因此大大地减小了激光器的整机尺寸。而且，它们具有一定程度的波长可调性以及出色的效率，因此在相同电流的条件下与灯泵激相比，激光二极管提高了激光器的效率。

在本发明的混合硅酸盐中，激光激活剂是 Er^{3+} 或 Tm^{3+} 离子，而激光敏化剂是 Yb^{3+} 离子。

根据本发明的第一个主要特征，钇和镧系的混合硅酸盐具有下列化学式 (II)：



其中， x 和 y 分别为满足数学式 $0 < x \leq 0.15$ 和 $0 \leq y \leq 0.2$ 的一个数。

这些硅酸盐是单相的并且被制成单晶的形式，以便用来生产这样一种激光器，这种激光器能发射一种波长处于红外范围内，在 $1.55 \mu m$ 附近并有一定波长可调性的激光。

当用一个激光二极管来进行激发时， $YSO:Er^{3+}$ 单晶的最大特征是具有从 1.45 至 $1.7 \mu m$ 的宽阔的荧光带，其中最强的荧光在 $1.545 \mu m$ 一带，这是对眼睛最安全的区域。

对于化学式 (i) 所示的，其 $x = 0.1$ 和 $y = 0$ 的 YSO 单晶来说，其激发态 $^4I_{13/2}$ 的寿命等于 $9.2 ms$ ，因此，当借助于氙灯或氪灯或激

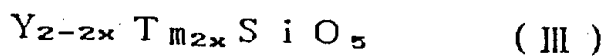
光二极管发射出 $0.79 \mu\text{m}$ 或 $0.98 \mu\text{m}$ 或从 1.45 至 $1.48 \mu\text{m}$ 的光线来对上述晶体进行泵激时, 就可使该晶体贮存相当大的能量。

根据本发明, Er^{3+} 离子的掺杂率可在 $x = 0.003$ 至 $x = 0.15$ 之间变化, 其中当 $x = 0.003$ 时有利于用激光二极管在 1.45 至 $1.48 \mu\text{m}$ 处泵激, 当 $x = 0.15$ 时有利于用灯泵激。最佳的情况是 x 值处于 0.01 至 0.03 之间。

当借助于激光二极管在 0.79 或 $0.98 \mu\text{m}$ 处或用灯发射来对基于 $\text{YSO}:\text{Er}$ 的激光器进行泵激时, 根据本发明的镱的掺杂可以提高这种激光器的泵激效率。这种共掺杂 (已经应用于掺杂 Er^{3+} 的磷酸盐玻璃中) 的优点是具有很好的 Er^{3+} 离子的吸收带, 这是一条在 $0.99 \mu\text{m}$ 附近的宽吸收带, 该吸收带可以通过 Er^{3+} 离子的高能级的非辐射放光, 也可借助于激光二极管在 $0.98 \mu\text{m}$ 处的泵激而使粒子数增加。

当采用镱来共掺时, 镱的共掺率可在 $y = 0.08$ 和 $y = 0.2$ 之间。

根据本发明的另一个主要方面, 单相形式的钇和镧系的混合硅酸盐具有下列化学式 (III):



其中 x 是一个满足于 $0 < x \leq 0.2$ 的一个数。

当将这些 $\text{Y} - \text{T}_m$ 的硅酸盐制成单晶的形式并安装于一个激光器的腔室中, 同时借助于一个激光二极管在 $0.79 \mu\text{m}$ 波长处将其激发时, 这些硅酸盐单晶就会发射一种波长处于 1.5 和 $2.1 \mu\text{m}$ 之间的十分强并十分宽的荧光带, 并在约 1.72 , 1.8 , 1.94 和 $2.02 \mu\text{m}$ 处具有几条最强线。对于化学式 (I) 所示的, 其 $x = 0.1$ 和 $y = 0$ 的晶体来说, 其受激发射的发射极的能级 ${}^3\text{F}_4$ 的寿命为 1.3ms , 因此, 当借助于灯泡或激光二极管对所说晶体进行泵激时, 就可使该晶体在此

能级上贮存相当大的能量。

基于 $YSO: Tm$ 的激光器在受灯或激光二极管泵激而产生的受激发射在环境温度下在 1.7 至 $2.05 \mu m$ 之间是连续可调的。

作为用于生产可调激光器的泵激方法的一个函数， Tm^{3+} 离子的掺杂率可在 0.005 和 0.2 之间变化。

由于本发明的混合硅酸盐可用作这样一种激光发射体，该激光发射体可在室温下发射一种处于红外范围对眼睛安全的区域内的激光，因此本发明还涉及这样一种激光器，该激光器具有一个激光器腔室，腔室内安装有一个由化学式 (I) 表达的，作为光发射体的硅酸盐单晶，一个用于增强由单晶发出的光线的装置，一个用于消除来自激光腔室的光线的装置，以及一个光泵激装置。

特别是该激光器是一个波长可调的激光器，因此它应带有一个用于调节的装置。

下面将参考附图，以非限定的例举的方式，更详细地描述本发明，在此附图中示出：

图 1 简略地示出本发明的一个连续操作的功率激光器，该激光器用一个激光二极管来泵激。

图 2 简略地示出本发明的一个用灯来泵激的功率激光器。

下面将解释利用 Czochralski 晶体生长法来生产一种本发明硅酸盐单晶的方法。为此目的，将一些十分纯的市售的钇、硅、钼、铈并任选地还有铽的粉末，按所需的比例称量，然后将它们混合并在 $1500^\circ C$ 下煅烧。接着将所获粉末混合物放入一个钽坩埚中。然后在隔绝大气中氧的条件下将混合物加热至熔点（接近 $2100^\circ C$ ）以使其形成熔体。

也可以由 Y^{3+} 、 Si^{4+} 、 Er^{3+} 、 Tm^{3+} 离子并任选地有 Yb^{3+} 离子

在水溶液或非水溶剂中共沉淀生成的氢氧化物作为起始原料来形成所说的熔体。通过氨水与市售的各种不同的金属元素的硝酸盐或氟化物作用，可以获得共沉淀物。然后在抽气的条件下将所获共沉淀在400℃下处理，直至达到完全脱水为止，然后在1500℃下煅烧。然后把所获产品放入一个钽坩埚中将其制成熔体。

把一个其成分与熔体成分相同的单晶晶核，例如按平行于晶格的b方向切开，然后将该晶核与熔体接触，然后将其一边旋转，一边提拉。因此，单晶就在晶核的端面上按照由晶格形成的方向逐渐生长。所用的提拉速度为0.3至2mm/h，而旋转速度为5-40转/分。

表II给出了本发明的硅酸盐单晶的例子，这些单晶是通过Czochralski法用不同离子的氧化物粉末制得的。

在该表的左边一栏给出了用于制造单晶的原始摩尔百分组成，而右边一栏给出了所获晶体的化学式。

图1简略地示出了一个使用本发明的硅酸盐单晶的，连续可调的功率激光器。

该激光器包含一个激光腔室2，里面装有一个本发明的硅酸盐棒4。一个激光二极管6支持在热扩散元件8上，这样使它能够通过一个聚焦透镜10照射到所说的单晶棒4上，因此保证了单晶棒4的光学泵激作用。一个用于冷却单晶棒4的水循环式冷却装置可以围绕单晶棒4来安装。

激光器腔室2中安装有一个入射分光镜12，在其附近有一个单晶棒4，另外有一个出射镜14。入射镜12可以透过由二极管6发射的光线而反射由单晶棒4发射的光线。出射镜14部分地透过由单晶棒4发射的光线。

单晶棒 4 的激发导致它的受激发射，发射出的激光在出射镜 1 4 处被反射，然后重新通过单晶棒 4，按此方式激光得到加强。加强了的激光束然后又被镜 1 2 反射而朝向单晶棒 4，如此继续下去。

在激光腔室 2 中得到了充分加强的激光束 1 6 然后通过出射镜 1 4 沿着轴线 3 的方法发射出去。

借助于一个安装在单晶棒 4 和出射镜 1 4 之间的波长选择系统 1 8 来达到波长调节，该波长选择系统是由某些双折射材料板制成的 Brewster 三角棱镜型或 Lyot 滤光镜型的系统。另外，可以把一块具有平行表面的板状固体标准件 2 0 安插在单晶棒 4 和波长选择器 1 8 之间，以便使发射波长固定下来。另外还可以把本发明的硅酸盐用于一种如图 2 所示形式的功率激光器。

该激光器的腔室 2 具有一个入射镜 1 2、一个出射镜 1 4 和一个由本发明的硅酸盐单晶制成的单晶棒 1 4。在单晶棒 4 的每一侧皆安装有充气灯 2 2，2 4，最好是安装一种高亮度的氦灯或氩灯闪光灯。这些灯具有细长的形状，它们轴向平行于激光器的轴线 3，以保护能对单晶棒 4 进行轴向的光泵激。可以安装一个环绕单晶棒 4 的循环水装置，以保证对单晶棒 4 的冷却。

如果希望获得一个波长可调的激光器，则可在激光器的腔室 2 中安装一个波长选择器 1 8。

实例 1

按照与提拉轴向 b 相垂直的方向从表 II 中所列的单晶 1 上切下一块 5 mm 厚的晶片然后将其抛光。然后从其中沿着轴向 b 割取一个 5 mm 直径的芯棒，将此芯棒按图 1 所示的方式装在激光腔室 2 中。

借助于激光二极管 6 发射的波长在 0.79 至 0.80 μm ，或在

0.97至0.98 μm ，或在1.45至1.48 μm 的光线对单晶棒泵激。入射镜12的表面12a必须进行一种防反射处理，以使它能防止这些波长中的一种或另一种波长反射。

在波长1.56 μm 处，入射镜的反射率 R_1 必须达到最大，也就是 $R_1 > 99.8\%$ ，而出射镜对此波长的反射率（以 R_2 表示）在95至99%之间变化。

从所说激光腔发射出的激光束16的波长为1.56 μm 并且是一种单色光。它输出的能量与激光二极管所发射的能量呈线性的依赖关系。最好是对单晶棒4上平行于入射镜12的两个表面进行一种能够防止在1.56 μm 波长处的光线反射的防反射处理。

实例2

在单晶No. 3内沿着轴线b割取一块芯棒，该芯棒的直径可在4和10mm之间变化，而其长度则根据适合使用的单晶长度来决定。将此单晶棒的两端表面抛光，同时注意使这两个表面达到精确的平行，然后对这两个表面进行在1.56 μm 波长处的防反射处理。将此单晶棒按图2所示方式安装于腔室中，并借助于连续的或脉冲的氙灯或氪灯2.2，2.4进行泵激。

入射镜12的反射率 R_1 在1.56 μm 处达到一个最大值，即 $R_1 > 99.8\%$ ，而出射镜的反射率 R_2 可在95至99%之间变化。

激光器1.56 μm 处的能量（或称输出功率）随灯泡的能量（或称发射功率）而呈线性地变化。

实例3

按照与提拉轴向b相垂直的方向从单晶No. 5上切下一块5mm厚的晶片，然后将其抛光。然后从其中沿着轴向b割取一个5mm直径的芯棒，

并且进行在 1.7 至 $2.05 \mu\text{m}$ 波长范围内的防反射处理。然后将此单晶棒按图 1 所示方式装在腔室 2 中，并借助于激光二极管在 $0.791 \mu\text{m}$ 处发射的光线进行泵激。

然后对入射镜的表面 1 2 a 进行在 $0.791 \mu\text{m}$ 处的防反射处理。入射镜 1 2 在 1.7 至 $2.05 \mu\text{m}$ 之间的激光可调范围内的反射率 R_1 必须达到一个最大值，也就是 $R_1 \geq 99.8\%$ ，而出射镜在相同的波长范围内的反射率 R_2 在 92 至 99% 之间变化。

借助于进行过在 1.7 至 $2.1 \mu\text{m}$ 之间的防反射处理的标准件 2 0 和 / 或 Lyot 过滤器 1 8，可使激光射束在 1.7 至 $2.05 \mu\text{m}$ 之间达到波长可调。

所说激光器的输出功率随激光二极管的发射功率呈线性的关系变化并在 1.7 至 $1.96 \mu\text{m}$ 一带达到一个最大值。

表 I

Er ³⁺ 离子接受基体	磷酸盐玻璃	SiO ₂ 纤维	Y ₃ Al ₅ O ₁₂
	1.54	1.53 - 1.57	1.64

$^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 的波长 (T = 300 K) (μm)

表 II

实例	开始时的组成 (摩尔%)				Tm ₂ O ₃	所获晶体
	Y ₂ O ₃	Er ₂ O ₃	SiO ₂	Yb ₂ O ₃		
1	49.5	0.5	50			Y _{1.98} Er _{0.02} SiO ₅
2	42.5	7.5	50			Y _{1.70} Er _{0.30} SiO ₅
3	44.75	0.25	50	5		Y _{1.79} Er _{0.01} Yb _{0.2} SiO ₅
4	39.875	0.125	50	10		Y _{1.595} Er _{0.005} Yb _{0.4} SiO ₅
5	47		50		3	Y _{1.88} Tm _{0.12} SiO ₅
6	44		50		6	Y _{1.76} Tm _{0.24} SiO ₅
7	40		50		10	Y _{1.6} Tm _{0.4} SiO ₅

说明书附图

图 1

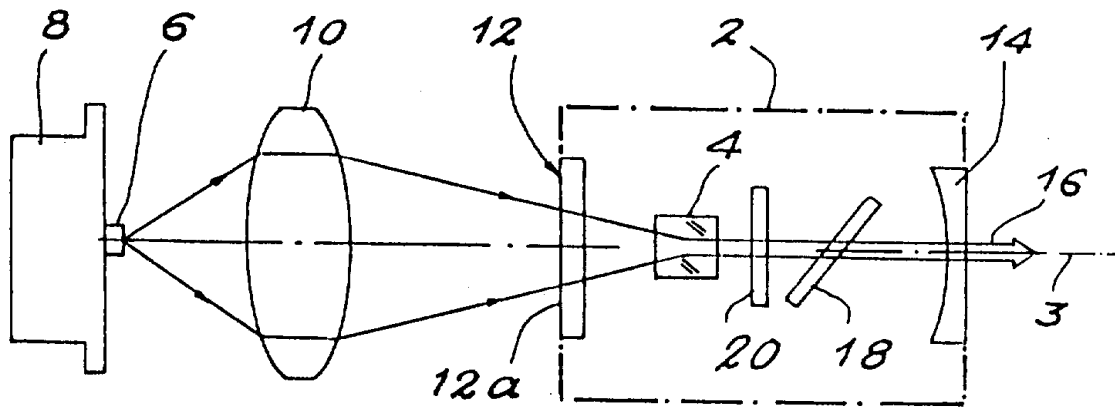


图 2

