

# 共掺 $\text{Na}^+$ 的 $\text{Yb}^{3+}:\text{CaF}_2$ 晶体的荧光分析与低阈值激光运转\*

柴 路<sup>1)†</sup> 颜 石<sup>1)</sup> 薛迎红<sup>1)</sup> 刘庆文<sup>1)</sup> 王清月<sup>1)</sup> 苏良碧<sup>2)</sup> 徐晓东<sup>2)</sup> 赵广军<sup>2)</sup> 徐 军<sup>2)</sup>

1) 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

2) 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

(2006 年 11 月 14 日收到, 2006 年 11 月 24 日收到修改稿)

基于 975 nm 激发的室温下荧光光谱测量, 系统地研究了在新型钠、镱共掺的氟化钙晶体中钠离子的作用机理, 分析了掺钠离子浓度与激光阈值的关系, 获得了具有最低激光阈值的掺杂浓度优化配比. 激光实验表明对于 2%  $\text{Yb}^{3+}$  离子浓度的氟化钙, 掺入 3% 的钠离子能够获得最低阈值的激光运转, 这与理论和荧光分析完全一致.

关键词: 镱、钠共掺氟化钙, 荧光光谱, 激光阈值

PACC: 7855, 4255, 7630K

## 1. 引 言

自从 1991 年第一次报道室温下二极管激光器抽运的掺镱钇铝石榴石( $\text{Yb}:\text{YAG}$ )激光器运转以来<sup>[1]</sup>, 掺  $\text{Yb}$  离子的激光晶体得到了广泛关注和快速发展. 这是由于  $\text{Yb}$  离子与钕( $\text{Nd}$ )离子相比有以下优点: 具有简单的双电子能级结构, 有效避免了复杂能级之间产生的交叉弛豫过程、激发态吸收、上转换等引起的荧光淬灭现象, 能够进行高浓度的掺杂, 从而实现高功率小型化的激光装置; 具有较低的量子缺陷, 改善了激光晶体的热效应和提高了激光效率<sup>[2]</sup>, 特别是相对较宽的吸收和发射谱, 更加适于高功率 900—980 nm 半导体激光器的抽运和实现全固态飞秒激光运转<sup>[3]</sup>.

到目前为止, 在已经报道的十几种掺  $\text{Yb}$  激光晶体材料中, 只有  $\text{Yb}:\text{BOYS}$ ,  $\text{Yb}:\text{SYS}$ ,  $\text{Yb}:\text{KGW}$ ,  $\text{Yb}:\text{KYW}$ ,  $\text{Yb}:\text{CaF}_2$ <sup>[4]</sup>,  $\text{Yb}:\text{YVO}_4$ <sup>[5]</sup>和  $\text{Yb}:\text{YSO}$ <sup>[6]</sup>, 实现了亚 200 fs 脉宽和平均输出功率大于 100 mW 的脉冲激光, 即能够达到全固态超快激光源实用化的有效水平. 其中  $\text{Yb}:\text{CaF}_2$  是近几年受到关注的新型固体超快激光材料<sup>[7-9]</sup>, 这是因为  $\text{CaF}_2$  晶体具有从远紫外一直到中红外超宽的透射窗口, 容易生长成较大

尺寸单晶, 与同类氟化物晶体相比具有低的声子频率( $328\text{ cm}^{-1}$ )和更高的热传导率( $10\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), 特别是其所需电荷补偿离子方式的多样性能够产生不同的格位结构, 从而导致其形成宽带的吸收和发射光谱, 有利于商用激光二极管的抽运和产生超短脉冲.

最近我国上海光机所生长出新型  $\text{Yb},\text{Na}$  共掺的  $\text{CaF}_2$  激光晶体( $\text{Yb},\text{Na}:\text{CaF}_2$ )<sup>[10]</sup>, 并实现了高效率的激光运转<sup>[11,12]</sup>. 对新晶体进行吸收和发射光谱的研究是基本的研究方法之一<sup>[13-15]</sup>, 本文采用 975 nm 作为激发源和特殊的测量方法, 比较准确和详细地研究了该新晶体不同掺  $\text{Na}$  浓度的室温荧光特性, 从而发现了适于低阈值激光运转的  $\text{Na}$  离子最佳掺杂配比, 为该类晶体的生长参数的优化提供了依据.

## 2. 晶体生长与结构特征

本文实验所用的晶体是由上海光机所采用温度梯度法生长的<sup>[16]</sup>. 温度梯度法是在一定的温度梯度场内, 通过控制熔体温度按一定速率降到熔点以下来实现晶体生长. 初始原料分别是高纯度的  $\text{YbF}_3$  和  $\text{CaF}_2$  (99.99%), 以及纯度为 99% 的  $\text{NaF}$  和  $\text{PbF}_2$ ,

\* 国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号: 2003CB314904, 2006CB806000)和国家杰出青年基金(批准号: 60425516)资助的课题.

† E-mail: lu\_chai@tju.edu.cn

其中  $\text{PbF}_2$  是作为去氧剂而加入的,通过氟化去氧消除残留的氧离子.按照设计的比例称取所用原料,均匀混合后压制成块状,再放入坩埚采用温度梯度法生长出不同掺杂浓度的  $\text{Yb}^{3+}:\text{Na}:\text{CaF}_2$  晶体.首先使整个炉子的真空度达到  $10^{-3}$  Pa,随后保持炉温在 673 K,并持续 10—20 h 以便去除原料和真空室中的水分,接着充入高纯度氩气,升温至晶体熔化,晶体生长过程由 3 K/h 的降温来控制,晶体生长结束后,按一定程序分段降温.

$\text{CaF}_2$  晶体的结构属于萤石型的立方结构,属于  $O_h^5-F_{m3m}$  空间群.其特点是  $\text{F}^-$  离子形成的简立方亚晶格的一半被阳离子占据,而另一半为空,因此允许  $\text{Yb}^{3+}$  离子高浓度掺杂,并且电荷补偿离子可以形成多种格位结构,从而使该类晶体具有较宽的吸收和发射和发射光谱,有利于可调谐和超短脉冲激光运转<sup>[8,9]</sup>.然而不足之处是: $\text{Yb}^{3+}:\text{CaF}_2$  晶体在低掺杂时容易产生  $\text{Yb}^{3+}$  离子团簇,形成荧光淬灭中心,产生合作荧光(cooperative luminescence);以及掺入  $\text{CaF}_2$  晶格  $\text{Yb}^{3+}$  离子首先趋向填满 4f 壳层,形成  $\text{Yb}^{2+}$  离子,使激活离子  $\text{Yb}^{3+}$  的浓度降低<sup>[17]</sup>.

为了克服上述缺点,上海光机所 Xu 等人提出采用共掺  $\text{Na}^+$  离子作为电荷平衡补偿<sup>[10]</sup>.  $\text{Na}^+$  离子替换  $\text{Ca}^{2+}$  离子,隔离了  $\text{Yb}^{3+}$  离子形成团簇,抑制了非激活离子  $\text{Yb}^{2+}$  的产生,从而有可能大大提高了荧光量子效率和降低激光的阈值.这是由于  $\text{Na}^+$  离子与  $\text{Yb}^{3+}$  离子在取代  $\text{Ca}^{2+}$  离子时,即达到电荷互补使系统的电荷平衡,又容易形成满足斜方  $C_{2v}$  对称性格位的  $\text{Yb}^{3+}-\text{Na}^+$  离子对,这样就有效地阻止了  $\text{Yb}^{3+}$  团簇和  $\text{Yb}^{2+}$  离子的形成,从而明显提高了  $\text{Yb}^{3+}:\text{CaF}_2$  晶体的荧光效率.

### 3. 实验方法

采用对比实验方法,为此选用了不同掺杂离子和浓度的  $\text{CaF}_2$  晶体,掺杂浓度分别为掺 2%  $\text{Yb}$  0%  $\text{Na}$ ,掺 2%  $\text{Yb}$ , 2%  $\text{Na}$ ,掺 2%  $\text{Yb}$ , 3%  $\text{Na}$  和掺 5%  $\text{Yb}$ , 7.5%  $\text{Na}$ .实验采用的测量装置如图 1 所示.激发光源采用 975 nm 的半导体激光器(Apollo LD-980),通过一个缩束准直系统使激发光束形成直径小于 1 mm 的平行光.这是为了保证激发光束在晶体中传输时有效面积保持不变,且有最小发散角.实验中始终保持入射功率为 1.4 W.激发光束垂直入射到晶体表面,并尽量靠近外边界穿过晶体.用两个平

行的透镜(直径 50 mm,焦距分别为 45 mm 和 90 mm)沿垂直于激发光束传输方向放置,经过高通滤光片滤掉激发激光(也过滤掉了零声子跃迁线)后,将荧光会聚、成像到焦平面上,再由光纤探头(直径 200  $\mu\text{m}$ )在荧光像最强位置采样,并输入到光谱仪(Ocean USB2000),光谱数据再被传输到计算机进行分析.这样设置的采样装置,可以认为探头采集的荧光是晶体内某一点(小薄片)发出的,即可以忽略晶体长度的影响,并减小了辐射自捕获(radiation trapping)的影响<sup>[18]</sup>.

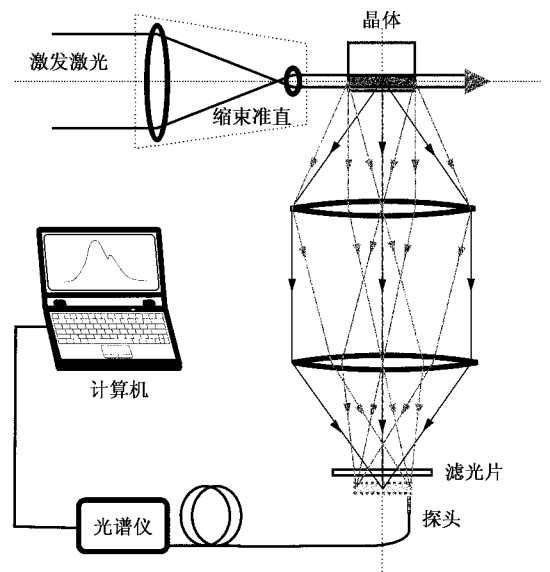


图 1 室温荧光测量装置示意图

## 4. 实验结果与讨论

### 4.1. 荧光光强与掺杂 $\text{Na}^+$ 离子浓度的关系

图 2 反映了荧光光强与掺杂  $\text{Na}^+$  离子浓度的关系.三种  $\text{Yb}^{3+}:\text{Na}:\text{CaF}_2$  晶体中激活离子  $\text{Yb}^{3+}$  的掺杂浓度同为 2%,而  $\text{Na}^+$  离子的掺杂浓度分别为 0%、2% 和 3%.荧光强度随  $\text{Na}^+$  离子的增加而成倍增强.这说明掺  $\text{Na}^+$  离子有效地阻止了  $\text{Yb}^{3+}$  团簇和  $\text{Yb}^{2+}$  离子的形成,从而明显提高了  $\text{Yb}^{3+}:\text{CaF}_2$  晶体的荧光效率.

### 4.2. 辐射寿命与掺杂 $\text{Na}^+$ 离子浓度的关系

测量的室温下不同掺  $\text{Na}^+$  离子浓度的  $\text{Yb}^{3+}:\text{Na}:\text{CaF}_2$  晶体的吸收截面分布,结果如图 3 所示.根

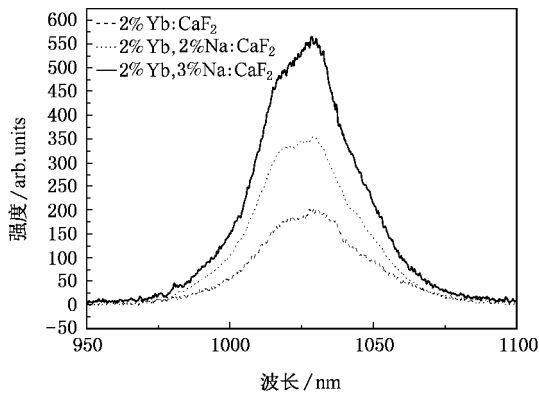


图 2 不同掺 Na<sup>+</sup> 浓度的 2% Yb<sup>3+</sup> : CaF<sub>2</sub> 晶体在 975 nm 激发的室温荧光光谱

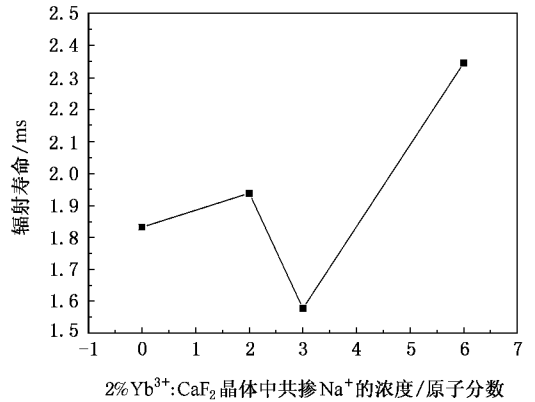


图 4 不同掺 Na<sup>+</sup> 浓度的 2% Yb<sup>3+</sup> : CaF<sub>2</sub> 晶体的辐射寿命

据辐射寿命的计算公式<sup>[19]</sup>,

$$\frac{1}{\tau_{\text{rad}}} = \frac{4}{3} \frac{8\pi n^2 c}{\lambda_0^4} \int \sigma_{\text{abs}}(\lambda) d\lambda,$$

其中  $\tau_{\text{rad}}$  为辐射寿命,  $\sigma_{\text{abs}}(\lambda)$  为波长  $\lambda$  处的吸收截面,  $n$  为晶体折射率,  $c$  为真空中光速,  $\lambda_0$  为吸收光谱分布的中心波长. 利用图 3 的吸收截面数据, 我们分别计算出不同浓度的 Yb<sup>3+</sup> : Na: CaF<sub>2</sub> 晶体的辐射寿命. 结果发现 2% Yb<sup>3+</sup> : 3% Na: CaF<sub>2</sub> 有最小的辐射寿命, 见图 4. 由于辐射寿命与发射截面成反比, 因此辐射寿命越小, 发射截面就越大, 激光阈值就越低, 更有利于低阈值激光运转. 但是我们发现当 Na<sup>+</sup> 离子增加到 6%, 辐射寿命明显上升, 即激光阈值反而增高了. 这说明掺 Na<sup>+</sup> 离子对于增加跃迁截面, 降低激光阈值的作用应该有个最优值.

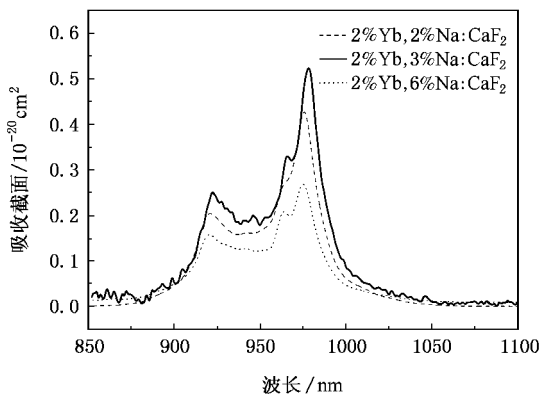


图 3 不同掺 Na<sup>+</sup> 浓度的 2% Yb<sup>3+</sup> : CaF<sub>2</sub> 晶体的室温吸收截面

#### 4.3. 上转换荧光与掺杂 Na<sup>+</sup> 离子浓度的关系

研究掺稀土离子上转换材料的追求目标是高效

率的上转换跃迁<sup>[20,21]</sup>, 而对于掺稀土离子的激光材料中的上转换效应却是影响激光效率的不利因素之一<sup>[22,23]</sup>, 因此将上转换荧光作为“探针”来研究材料的激光性质是可行的. 掺 Yb<sup>3+</sup> 激光晶体都存在上转换效应, 一般认为在红外光激发下的可见光波段荧光主要由与 Yb 离子共生的稀土离子杂质和 Yb 离子团簇形成的 Yb<sup>3+</sup> 对产生<sup>[24,25]</sup>. 所以我们可以从上转换荧光光谱来讨论掺 Na<sup>+</sup> 离子的作用机理. 图 5 为 975 nm 激发下的不同掺杂浓度晶体的上转换荧光光谱. 可见当不掺 Na 时, 即 2% Yb<sup>3+</sup> : CaF<sub>2</sub> 的上转换荧光光谱中, 仅在 490—525 nm 附近出现宽光谱(实线). 这在理论上完全对应于 975 nm 激发的 Yb<sup>3+</sup> 激发态红外发射谱的反斯托克斯频率上转换光谱. 在实验上归因于 Yb 离子团簇形成的 Yb<sup>3+</sup> 对产生的合作荧光效应, 即同时淬灭两个激发态 Yb<sup>3+</sup> 离子, 放出一个高频光子, 从而使近红外发光效率降低<sup>[25]</sup>. 当掺入 2% Na<sup>+</sup> 离子后, 可见在 500 nm 附近的宽峰消失了. 这说明 Na 离子的确有效阻止了 Yb<sup>3+</sup> 团簇的形成, 由此导致了激活 Yb<sup>3+</sup> 离子的在近红外波段荧光强度的明显增加. 同时我们也注意到, 此时的上转换荧光主要产生在 540 和 650 nm 附近的峰(虚线)这是 Er<sup>3+</sup> : <sup>4</sup>S<sub>3/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> 和 <sup>4</sup>F<sub>9/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> 的辐射跃迁. 当掺 3% Na<sup>+</sup> 时(点线), Er<sup>3+</sup> 在 650 nm 附近的峰与掺 2% Na<sup>+</sup> 时相比减弱近一倍, 而在 530 nm 附近的峰是掺 2% Na 时的 1.5 倍, 而新增加的 480 nm 附近的峰可归因于 Tm<sup>3+</sup> : <sup>1</sup>G<sub>4</sub> → <sup>3</sup>H<sub>6</sub> 的辐射跃迁.

以上现象的可能解释是, 由于稀土离子 Yb<sup>3+</sup>, Er<sup>3+</sup>, Tm<sup>3+</sup> 的特性相近, 当不掺 Na<sup>+</sup> 时, 它们可能都是趋于形成单一离子团簇和相应的二价离子. 所以, 在没有掺 Na<sup>+</sup> 时, 我们仅仅观察到激活离子

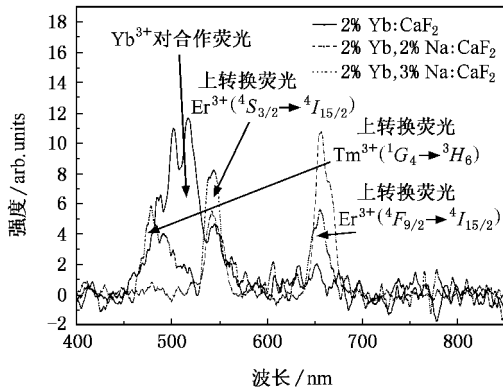


图 5 不同掺 Na<sup>+</sup> 浓度的 2% Yb<sup>3+</sup> : CaF<sub>2</sub> 晶体在 975 nm 激发的上转换荧光谱

Yb<sup>3+</sup> 团簇产生的合作上转换荧光,而无法探测到杂质稀土离子产生的上转换荧光。

当共掺入与激活离子 Yb<sup>3+</sup> 相同浓度的 2% 的 Na<sup>+</sup> 后,绝大部分 Na<sup>+</sup> 离子与 Yb<sup>3+</sup> 离子结合形成了 Yb<sup>3+</sup>-Na<sup>+</sup> 对,抑制了 Yb<sup>3+</sup> 团簇和 Yb<sup>2+</sup> 非激活离子的形成;对于杂质离子,由于离子半径: Tm<sup>3+</sup> < Er<sup>3+</sup>, 即 Er<sup>3+</sup> 与 Ca<sup>2+</sup> 更接近,因此替换时引起的晶格畸变较小,所以可能少量的 Na<sup>+</sup> 离子优先与杂质 Er<sup>3+</sup> 离子结合形成 Er<sup>3+</sup>-Na<sup>+</sup> 对,抑制了 Er<sup>3+</sup> 团簇和 Er<sup>2+</sup> 非激活离子的形成;最后几乎没有剩余的 Na<sup>+</sup> 离子再与杂质 Tm<sup>3+</sup> 离子结合成离子对。通过 Yb<sup>3+</sup> 的敏化作用,就形成了以 Er<sup>3+</sup> 的红和绿波段上转换发光为主的图像。

当共掺入大于 2% Yb<sup>3+</sup> 激活离子的 3% Na<sup>+</sup> 后,经过上述过程后,仍有富余的 Na<sup>+</sup> 离子与杂质 Tm<sup>3+</sup> 离子结合形成 Tm<sup>3+</sup>-Na<sup>+</sup> 对,抑制了 Tm<sup>3+</sup> 团簇和 Tm<sup>2+</sup> 非激活离子的形成。通过 Yb<sup>3+</sup>/Er<sup>3+</sup>/Tm<sup>3+</sup> 之间的能量交换,导致了 Tm<sup>3+</sup> 的上转换蓝光发射。

从上转换荧光光谱曲线分析,图 5 中的 Yb<sup>3+</sup>-Yb<sup>3+</sup> 对产生的合作上转换荧光的积分面积分别大于掺 Na<sup>+</sup> 后的相应的上转换荧光的积分面积,说明共掺 Na<sup>+</sup> 离子增加的 Yb<sup>3+</sup> 激活离子荧光效率总是大于其“激活”杂质离子上转换发光的效率。比较图中掺 2% Na<sup>+</sup> 和掺 3% Na<sup>+</sup> 的上转换荧光的积分面积相差不多,因此可以推断掺 3% Na<sup>+</sup> 的晶体 Yb<sup>3+</sup> 激活离子的荧光强度高出掺 2% Na<sup>+</sup> 的晶体一倍,主要是由于多掺的 Na<sup>+</sup> 离子抑制了 Yb<sup>2+</sup> 非激活离子的形成所致。

以上讨论说明掺 Na<sup>+</sup> 离子即有防止 Yb<sup>3+</sup> 团簇形成和增加 Yb<sup>3+</sup> 荧光效率<sup>[15]</sup> 处,也有使杂质稀土

离子辐射跃迁概率增加和降低 Yb<sup>3+</sup> 荧光效率的不足。对于激活离子浓度一定的条件下,掺 Na<sup>+</sup> 离子对于增加跃迁截面,降低激光阈值的作用应该有个最优值。

#### 4.4. 优化共掺 Na<sup>+</sup> 离子 Yb<sup>3+</sup> : CaF<sub>2</sub> 低阈值激光运转实验

激光阈值实验:在相同的实验条件下,我们分别对激活离子 Yb<sup>3+</sup> 的掺杂浓度同为 2%,而 Na<sup>+</sup> 离子的掺杂浓度分别为 0% 和 3% 的 Yb<sup>3+</sup>, Na: CaF<sub>2</sub> 晶体,以及掺 5% Yb, 7.5% Na: CaF<sub>2</sub> 晶体进行了对比激光实验。结果在 2% Yb, 3% Na: CaF<sub>2</sub> 晶体实现了低阈值激光运转,最低阈值仅为吸收激光二极管抽运功率 70 mW,最高斜效率为 20.3% (2% 输出镜),如图 6 所示。而在相同抽运条件下,其他晶体都不能出激光。这与我们上面的分析是完全一致。因此,在我们可以试验的晶体参数范围内,可以认为 2% Yb<sup>3+</sup>, 3% Na: CaF<sub>2</sub> 是具有最低激光阈值的优化掺杂浓度配比。

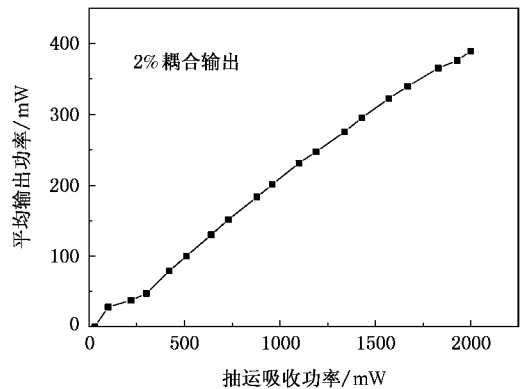


图 6 不同掺 Na<sup>+</sup> 浓度的 2% Yb<sup>3+</sup> : CaF<sub>2</sub> 晶体在 975 nm 激发的上转换荧光谱

## 5. 结 论

通过对 975 nm 激发荧光光谱的测量与辐射寿命的计算,详细研究了我国生长的新型掺 Na<sup>+</sup> 离子的 Yb<sup>3+</sup> : CaF<sub>2</sub> 激光晶体中 Na<sup>+</sup> 离子对荧光效率和辐射寿命的影响,获得了实现低阈值激光运转的优化共掺配比参数。这对于优化生长该类共掺晶体具有指导意义。

- [ 1 ] Lacovara P , Choi H K , Wang C A , Aggarwal R L , Fan T Y 1991 *Opt. Lett.* **16** 1089
- [ 2 ] Patel F D , Honea E C , Speth J , Payne S A , Hutcheson R , Equall R 2001 *IEEE J. Quantum Electron.* **37** 135
- [ 3 ] Druon F , Balembois F , Georges P , Brun A , Courjaud A , Honninger C , Salin F , Aron A , Mougél F , Aka G , Vivien D 2000 *Opt. Lett.* **25** 423
- [ 4 ] Druon F , Balembois F , Georges P 2004 *Opt. Express* . **12** 5005
- [ 5 ] Kisel V E , Troshin A E , Shcherbitsky V G , Kuleshov N V , Matrosov V N , Matrosova T A , Kupchenko M I , Brunner F , Paschotta R , Morier-Genoud F , Keller U 2005 *Opt. Lett.* **30** 1150
- [ 6 ] Thibault F , Pelenc D , Druon F , Zaouter Y , Jacquemet M , Georges P 2006 *Opt. Lett.* **31** 1555
- [ 7 ] Petit V , Doualan J L , Camy P , Ménard V , Moncorgé R 2004 *Appl. Phys. B* **78** 681
- [ 8 ] Lucca A , Jacquemet M , Druon F , Balembois F , Georges P , Camy P , Doualan J L , Moncorgé R 2004 *Opt. Lett.* **29** 1879
- [ 9 ] Lucca A , Debourg G , Jacquemet M , Druon F , Balembois F , Georges P , Camy P , Doualan J L , Moncorgé R 2004 *Opt. Lett.* **29** 2767
- [ 10 ] Su L , Xu J , Li H , Yang W , Zhao Z , Si J , Dong Y , Zhou G 2005 *Opt. Lett.* **30** 1003
- [ 11 ] Su L , Xu J , Xue Y , Wang C , Chai L , Xu X , Zhao G 2005 *Opt. Express* . **13** 5635
- [ 12 ] Du J , Liang X , Wang Y , Su L , Feng W , Dai E , Xu Z , Xu J 2005 *Opt. Express* . **13** 7970
- [ 13 ] Su L B , Yang W Q , Dong Y J , Xu J , Zhou G Q 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3956 ( in Chinese ) [ 苏良碧、杨卫桥、董永军、徐 军、周国清 2004 物理学报 **53** 3956 ]
- [ 14 ] Tan H , Song F , Su J , Shang M R , Fu B , Zhang G Y , Cheng Z X , Chen H C 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 631 ( in Chinese ) [ 谭 浩、宋 峰、苏 静、商美茹、付 博、张光寅、程振祥、陈焕鑫 2004 物理学报 **53** 631 ]
- [ 15 ] Wang J G , Zhang Z G , Xu J Z , Xu J R , Fu P M , Chen X B 2000 *Chin. Phys.* **9** 210
- [ 16 ] Su L , Xu J , Li H , Wen L , Yang W , Zhao Z , Si J , Dong Y , Zhou G 2005 *J. Cryst. Growth* **277** 264
- [ 17 ] Su L , Xu J , Li H , Wen L , Zhu Y , Zhao Z , Dong Y , Zhou G , Si J 2005 *Chem. Phys. Lett.* **406** 254
- [ 18 ] Sumida D S , Fan T Y 1994 *Opt. Lett.* **19** 1343
- [ 19 ] Haumesser P H , Gaumé R , Viana B , Vivien D 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2365
- [ 20 ] Wen L , Zhang L Y , Yang J H , Wang G N , Chen W , Hu L L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1486 ( in Chinese ) [ 温 磊、张丽艳、杨建虎、汪国年、陈 伟、胡丽丽 2006 物理学报 **55** 1486 ]
- [ 21 ] Yang Z M , Zhang Q Y , Liu Y H , Jiang Z H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2013 ( in Chinese ) [ 杨中民、张勤远、刘粤惠、姜中宏 2005 物理学报 **54** 2013 ]
- [ 22 ] Wu Z H , Song F , Liu S J , Tan B , Su J , Tian J G , Zhang G Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5637 ( in Chinese ) [ 吴朝辉、宋 峰、刘淑静、覃 斌、苏 静、田建国、张光寅 2005 物理学报 **54** 5637 ]
- [ 23 ] Zhang X L , Wang Y Z , Ju Y L 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 117 ( in Chinese ) [ 张新陆、王月珠、鞠有伦 2005 物理学报 **54** 117 ]
- [ 24 ] Guyot Y , Canibano H , Goutaudier C , Novoselov A , Yoshikawa A , Fukuda T , Boulon G 2006 *Opt. Mater.* **28** 1
- [ 25 ] Boulon G , Laversenne L , Goutaudier C , Guyot Y , Cohen-Adad M T 2003 *J. Lumin.* **102-103** 417

# Luminescence properties of $\text{Yb}^{3+}/\text{Na}^+$ codoped $\text{CaF}_2$ crystal and laser operation with low threshold<sup>\*</sup>

Chai Lu<sup>1)†</sup> Yan Shi<sup>1)</sup> Xue Ying-Hong<sup>1)</sup> Liu Qing-Wen<sup>1)</sup> Wang Qing-Yue<sup>1)</sup>  
Su Liang-Bi<sup>2)</sup> Xu Xiao-Dong<sup>2)</sup> Zhao Guang-Jun<sup>2)</sup> Xu Jun<sup>2)</sup>

1) *School of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science, Chinese Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

2) *Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*

( Received 14 November 2006 ; revised manuscript received 24 November 2006 )

## Abstract

Basing on measuring the luminescence spectra at room temperature pumped by 975 nm light, the action mechanism of  $\text{Na}^+$  in the novel  $\text{Yb}^{3+}/\text{Na}^+:\text{CaF}_2$  crystal was systemically investigated. The relation between the concentration of doping  $\text{Na}^+$  and the laser operation threshold was analyzed. The optimum match concentration for  $\text{Yb}^{3+}/\text{Na}^+:\text{CaF}_2$  with low laser threshold was obtained. In the experiment, the lowest laser operation threshold at only 70 mW of absorbing pumped power for 2%  $\text{Yb}^{3+}$ , 3%  $\text{Na}^+:\text{CaF}_2$  crystal is realized, which is in good agreement with the analysis of luminescence properties.

**Keywords :**  $\text{Yb}^{3+}/\text{Na}^+$  codoped  $\text{CaF}_2$ , luminescence spectra, laser threshold

**PACC :** 7855, 4255, 7630K

<sup>\*</sup> The Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China ( Grant Nos. 2003CB314904, 2006CB806000 ) and the National Science Found for Distinguished Young Scholars of China ( Grant No. 60425516 ).

<sup>†</sup> E-mail : lu\_chai@tju.edu.cn