

铟钕掺杂钽酸锂单晶的生长及光学性能

赫崇君, 李伟立, 王吉明, 顾晓蓉, 吴彤, 刘友文

南京航空航天大学理学院, 江苏 南京 211106

摘要 采用提拉法生长了双掺杂钕离子(Nd^{3+})和铟离子(In^{3+})的同成分 LiTaO_3 单晶。测量了该单晶的紫外-可见光吸收光谱, 分析了该晶体的缺陷结构, 得到了铟离子的掺杂浓度阈值。当铟离子掺杂浓度达到该阈值时, $\text{In}:\text{Nd}:\text{LiTaO}_3$ 晶体的抗光损伤能力显著增强。铟离子取代晶体中的反位 $\text{Ta}_{\text{Li}}^{4+}$, 使晶体光电导增大, 减弱了光折变效应。 $\text{In}:\text{Nd}:\text{LiTaO}_3$ 晶体在光波长 $0.808 \mu\text{m}$ 处的吸收峰的半峰全宽为 15 nm , 吸收截面为 $5.26 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ 。采用 $0.808 \mu\text{m}$ 半导体激光作为抽运源, 钕离子在光波长 $1.06 \mu\text{m}$ 处出现强烈的荧光带。这些研究结果表明, $\text{In}:\text{Nd}:\text{LiTaO}_3$ 作为多功能晶体可以应用于高功率的光子学或光电子学器件中。

关键词 材料; 钽酸锂晶体; 缺陷结构; 光损伤; 荧光特性

中图分类号 O734

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0116003

Growth and Optical Properties of Lithium Tantalate Single Crystals Doped with Indium and Neodymium

He Chongjun, Li Weili, Wang Jiming, Gu Xiaorong, Wu Tong, Liu Youwen

College of Science, Naning University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 211106, China

Abstract The congruent lithium tantalate (LiTaO_3) single crystals doubly-doped with Nd^{3+} and In^{3+} ions are grown by the Czochralski method. The ultraviolet-visible absorption spectra of these single crystals are measured, the defect structures of these single crystals are analyzed, and the threshold of the doping concentration of In^{3+} ion is obtained. When the doping concentration of In^{3+} ion reaches this threshold, the optical damage resistance ability of $\text{In}:\text{Nd}:\text{LiTaO}_3$ crystals enhances significantly. The replacement of the anti-site $\text{Ta}_{\text{Li}}^{4+}$ by In^{3+} ions enhances the photo-conductivity of crystals and weakens the photorefractive effect. The full width at half maximum of the absorption peak of $\text{In}:\text{Nd}:\text{LiTaO}_3$ crystals at the wavelength of $0.808 \mu\text{m}$ is 15 nm , and the absorption cross-section is $5.26 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$. With a $0.808 \mu\text{m}$ semiconductor laser as the pumping source, a strong luminescence band of Nd^{3+} ions appears at the wavelength of $1.06 \mu\text{m}$. These study results show that the $\text{In}:\text{Nd}:\text{LiTaO}_3$ crystals can be applied in high power photonic or integrated optoelectronic devices as the multi-functional crystals.

Key words materials; LiTaO_3 crystal; defect structure; optical damage; fluorescence characteristic

OCIS codes 160.4670; 260.1180; 350.1820; 160.2540

1 引 言

铁电晶体已经被广泛应用于激光频率转换器、光通信系统、光学参量振荡器和全息存储器件^[1-7]中。钽酸锂(LiTaO_3)晶体具有优异的电光、声光、非线性光学和压电性能, 以及较高的热稳定性和机械强度^[8], 在集成光学中被广泛应用。此外, 钽酸锂晶体可以在较宽的光谱范围内发生光波频率转换过程^[9]。以掺杂稀土离子作为活性中心, 钽酸锂晶体可实现腔内自频转换过程, 从而产生激光。这些方法大

大增强了钽酸锂单晶的多功能性^[10]。稀土掺杂钕离子(Nd^{3+})可以用于产生 $1.06 \mu\text{m}$ 波长的空间光通信激光, 利用常见的高功率 808 nm 半导体激光抽运便可实现光波频率的转换^[11-12]。然而, 由光折变效应引起的光损伤限制了钽酸锂晶体在高功率器件中的应用^[13-14]。掺杂钕离子能够使晶体发射红外光谱^[15-17], 通过掺杂抗光损伤离子可以显著提高钽酸锂晶体的抗光损伤能力^[18-20]。其中, In^{3+} 能够以较低的阈值浓度大大提高钽酸锂晶体的抗光损伤能力^[21-22]。在同成分的 LiTaO_3 晶体中, 存在着 Li 空

收稿日期: 2017-07-17; 收到修改稿日期: 2017-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(61675095)

作者简介: 赫崇君(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光学晶体方面的研究。E-mail: hechongjun@nuaa.edu.cn

位缺陷结构,为了取得电荷平衡,一部分 Ta 进入 Li 空位,形成反位 Ta_{Li}^{4+} 。在抗光损伤 In^{3+} 的掺杂浓度达到其阈值之前,随着 In^{3+} 掺杂浓度的提高,晶体中的反位钽 Ta_{Li}^{4+} 与 Li 空位不断减少, In^{3+} 占据 Li 空位。当抗光损伤 In^{3+} 掺杂浓度达到其阈值浓度时, In^{3+} 完全取代反位 Ta_{Li}^{4+} ,晶体中的本征缺陷 Ta_{Li}^{4+} 几乎不存在,光电导大大增加,光致折射率变化极小。

本文采用提拉法生长了不同钕离子掺杂浓度的 $LiTaO_3$ 晶体。通过改变 In^{3+} 的掺杂浓度提高 $In:Nd:LiTaO_3$ 晶体的抗光损伤能力,利用紫外-可见光吸收光谱分析了晶体的缺陷结构,研究了 In^{3+} 掺杂浓度对 $In:Nd:LiTaO_3$ 晶体抗光损伤能力的影响。

2 实验过程

2.1 单晶生长工艺

钽酸锂晶体生长所用原料均为高纯(物质的体积分数为99.99%)原料。生长同成分 $In:Nd:LiTaO_3$ 晶体的主要原料是 Li_2CO_3 和 Ta_2O_5 粉末,掺杂剂是金属氧化物固体粉末 In_2O_3 和 Nd_2O_3 。采用 Czochralski 法在常温常压下沿着竖直方向生长晶体,籽晶方向沿 c 轴。由于 $LiTaO_3$ 晶体生长所需温度较高(1600 $^{\circ}C$),故采用铌坩埚进行生长,单晶炉腔充入氮气防止铌氧化。同成分 $LiTaO_3$ 晶体中 Li 和 Ta 的物质的量比值为 0.946,按此比例配制 Li_2CO_3 和 Ta_2O_5 原料,再加入 0.5%(摩尔分数,全文同)的 Nd_2O_3 和各种浓度的 In_2O_3 (摩尔分数分别为 0,0.5%,1.0%,1.5%),用于生长 $In:Nd:LiTaO_3$ 晶体^[23]。将称取好的原料放在球磨机中球磨 24 h,获得混合均匀的混合料。 Li_2CO_3 原料放置在铌坩埚中,中频感应加热至 700 $^{\circ}C$,并保温 2 h,以分解其中的 CO_2 。随后将混合料加热至 1200 $^{\circ}C$,并保温 3 h, Li_2O 和 Ta_2O_5 经固相反应成为 $LiTaO_3$ 多晶料。最后在氮气气氛中加热至 1600 $^{\circ}C$ 左右,进行晶体生长。竖直方向温度梯度在液面下为 10 $^{\circ}C \cdot cm^{-1}$,液面上为 30 $^{\circ}C \cdot cm^{-1}$;坩埚内熔体的径向温度梯度约为 20 $^{\circ}C \cdot cm^{-1}$ 。晶体生长主要包括化料、缩颈、放肩、等径生长和降温过程。生长过程中,提拉速度为 0.9~1.2 $mm \cdot h^{-1}$,旋转速度为 9~12 $r \cdot min^{-1}$ 。由于晶体生长过程是在氮气气氛中进行,将生长出来的晶体在空气中于 1100 $^{\circ}C$ 退火,可有效减少晶体缺陷。图 1 所示为成功生长出的晶体成品。



图 1 生长出的 $In:Nd:LiTaO_3$ 晶体

Fig. 1 Photo of grown $In:Nd:LiTaO_3$ crystal

由图 1 可以看出,所生长的晶体颜色均匀,没有明显的杂质,内部质量较高。经测量,晶体参数为:直径 50 mm,高 40 mm,密度 7.45 $g \cdot cm^{-3}$ 。

2.2 单晶样品处理

同成分的 $LiTaO_3$ 晶体具有多畴结构,当光通过铁电畴交界(畴壁)处时会发生散射,影响晶体的光学性能。因此,必须进行人工极化,在高温下通过外加直流电场迫使晶体内的自发极化取向一致,从而转变为单畴晶体。同成分 $In:Nd:LiTaO_3$ 晶体在极化前,将 c 面磨平,涂上银浆,置于电炉中加热到 650 $^{\circ}C$,保温 2 h,烧结得到银电极。晶体的居里温度约为 610 $^{\circ}C$ 。将晶体同白金片置于电炉中,加热至 720 $^{\circ}C$ 后施加强度为 10 $V \cdot mm^{-1}$ 的极化电场,极化 15 min,保持电压,以 12 $^{\circ}C \cdot h^{-1}$ 的慢速率降温,当炉温降至 600 $^{\circ}C$ 后,则以 70 $^{\circ}C \cdot h^{-1}$ 的快速率使晶体降至室温,然后关掉直流电源。将极化后的晶体 c 面切片研磨抛光,置于 HNO_3 与 HF 的物质的量之比为 2:1 的混合溶液中煮沸 2 h,冲洗干净后放在金相显微镜下观察。负畴被腐蚀速度快,正畴被腐蚀速度慢,+ c 轴向端没有出现明显的腐蚀坑,- c 轴向端出现三角形的腐蚀坑,这表明晶体已经完全极化。

在进行各种性能测试前,需要对晶体进行定向、切割、研磨和抛光处理。晶体需要定向的晶面为相互正交的 X 、 Y 和 Z 面,分别对应结晶学的(110)、(300)和(006)晶面,布拉格衍射角 θ 分别为 17 $^{\circ}23'$ 、31 $^{\circ}23'$ 和 19 $^{\circ}35'$ 。所有的晶体样品都沿着 c 轴方向被切割成 Y 面晶片。切割后的晶体样品在抛光前先在研磨机上研磨,研磨时使用玻璃盘。首先,在玻璃盘上用规格为 10 目(1700 μm) 的刚玉粉对晶体进行粗研磨,而后改用规格为 5 目(4000 μm) 的刚玉粉进行研磨。研磨后,对晶体进行抛光处理,抛光时将抛光布覆盖在铁盘上,抛光布上涂金刚石墨研磨膏。最后,将晶片表面抛光到光学级别进行性

能测试。

2.3 光学性能测量

采用紫外-可见-近红外光谱仪测量晶体的透射和吸收光谱。采用光斑畸变法测量 In:Nd:LiTaO₃ 晶体的抗光损伤能力^[24], 测量光路如图 2 所示。532 nm 固体激光器发出的激光经过光阑、分束镜后, 由透镜聚焦在焦平面上 (In:Nd:LiTaO₃ 晶体处)。激光的偏振方向沿着晶体的 c 轴方向。照在晶体样品上的激光束光斑直径 D 可由透镜焦距 f 和光阑孔的直径 d 计算得到, 即

$$D = \frac{2f\lambda}{\pi d}, \quad (1)$$

式中 λ 为激光波长。由(1)式可知, 聚集在样品上的激光束面积为

$$S = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \frac{(f\lambda)^2}{\pi d^2}. \quad (2)$$

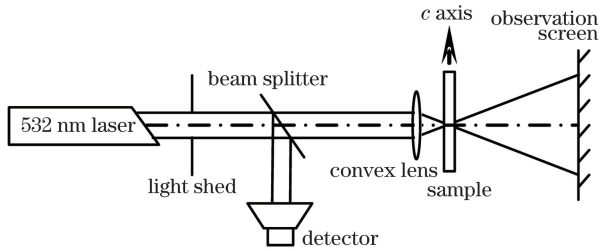


图 2 抗光损伤测量光路

Fig. 2 Beam path for measuring optical damage resistance

3 结果与讨论

3.1 吸收光谱与缺陷

将晶体的吸光度除以晶片厚度, 即为吸收系数, 吸收边标定在吸收系数 8.5 cm⁻¹ 处。将 4 个 Nd³⁺ 掺杂浓度相同 (摩尔分数为 1.0%), In³⁺ 掺杂浓度不同 (摩尔分数分别为 0, 1.0%, 2.0%, 3.0%) 的 LiTaO₃ 晶体分别标定为 In0:Nd1:LT、In1:Nd1:LT、In2:Nd1:LT 和 In3:Nd1:LT。图 3 所示为 In:Nd:LiTaO₃ 晶体的吸收系数随波长变化的关系曲线。可以看出, In:Nd:LiTaO₃ 晶体的吸收边变化规律十分明显, 当 In³⁺ 的掺杂浓度从 0 上升到 2.0% 时, 吸收边向短波长方向移动。当 In³⁺ 的掺杂浓度上升到 3.0% 时, 吸收边反而向长波长方向移动。由此推断, In:Nd:LiTaO₃ 晶体中 In³⁺ 掺杂浓度的阈值在 2.0%~3.0% 范围内。

图 4 所示为 In:Nd:LiTaO₃ 单晶的吸收光谱, 其中的吸收峰是电子由基态 ⁴I_{9/2} 向不同的激发态跃迁产生的, 较强的吸收峰出现在 585 nm (²G_{7/2} + ⁴G_{5/2}), 748 nm (⁴F_{7/2} + ⁴S_{3/2}), 808 nm (⁴F_{5/2} + ²H_{9/2})

和 878 nm (⁴F_{3/2})^[25] 处。808 nm 处的吸收峰的半峰全宽为 15 nm, In:Nd:LiTaO₃ 晶体非常适合作为 AlGaAs 半导体激光器的抽运源。吸收截面 $\sigma_{ab} = \alpha/N_c$, 其中钕离子浓度 (单位体积内的粒子数) $N_c = 1.9 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, 吸收系数 $\alpha = 1 \text{ cm}^{-1}$ 。由此可知, 808 nm 处钕离子的吸收截面为 $5.26 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ 。

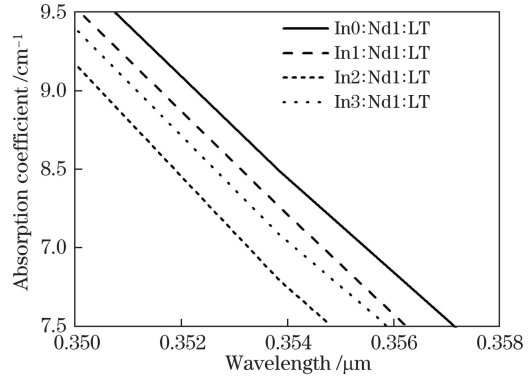


图 3 In:Nd:LiTaO₃ 晶体在吸收系数 8.5 cm⁻¹ 附近的吸收边

Fig. 3 Absorption edge of In:Nd:LiTaO₃ crystals at absorption coefficient of around 8.5 cm⁻¹

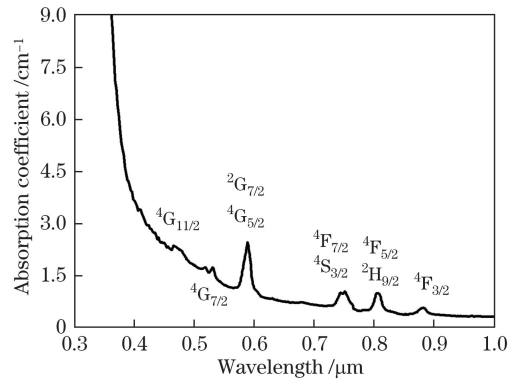


图 4 In:Nd:LiTaO₃ 晶体的吸收光谱

Fig. 4 Absorption spectrum of In:Nd:LiTaO₃ crystals

LiTaO₃ 晶体是具有氧八面体结构的铁电体, 它的基础光学吸收边由电子从氧离子 2p 轨道跃迁到 Nb⁵⁺ 的 4d 轨道的跃迁能量决定^[26]。In:Nd:LiTaO₃ 晶体的紫外吸收边与晶体的缺陷结构和掺杂离子的占位情况直接相关。在 In:Nd:LiTaO₃ 晶体中, 当抗光损伤离子 In³⁺ 的掺杂浓度低于阈值时, 绝大多数的 In³⁺ 会取代反位 Ta_{Li}⁴⁺ 占据 Li 位, 形成缺陷结构 In_{Li}²⁺。由于 In³⁺ 的极化能力小于 Ta_{Li}⁴⁺ 的, O²⁻ 的极化程度降低, 其电子云变形减小, 电子从 O²⁻ 的 2p 轨道跃迁到 Ta⁵⁺ 的 4d 轨道所需的能量会增大, 晶体的紫外吸收边发生蓝移。由图 3 可知, In0:Nd1:LT 晶体、In1:Nd1:LT 晶体和 In3:Nd1:LT 晶体的紫外吸收

边分别为354, 353, 352 nm。当 In^{3+} 的掺杂浓度达到阈值时, 部分 In^{3+} 会占据正常的 Li 位, 形成 $\text{Li}_{\text{In}}^{2+}$ 缺陷。由于 In^{3+} 的极化能力大于 Li^+ 的, 这种离子取代的结果会导致 O^{2-} 的极化程度升高, 其电子云变形增大, 电子从 O^{2-} 的 2p 轨道跃迁到 Ta^{5+} 的 4d 轨道所需的能量相应减小, 紫外吸收边出现红移。相比于 $\text{In}_2:\text{Nd}:\text{LT}$ 晶体的 351 nm, $\text{In}_3:\text{Nd}:\text{LT}$ 晶体的紫外吸收边移动到 352 nm, In^{3+} 掺杂浓度的阈值仍在 2.0%~3.0% 范围内。当 In^{3+} 掺杂浓度达到阈值时, In^{3+} 完全取代反位 $\text{Ta}_{\text{Li}}^{4+}$, 晶体中的本征缺陷 $\text{Ta}_{\text{Li}}^{4+}$ 几乎不存在, 光电导大幅增加, 光致折射率变化极小, 因而抗光损伤能力最强。

3.2 抗光损伤能力测试

光斑畸变法是通过直接观察屏上透射光斑的形变来判定是否发生光损伤, 是一种半定量的测试方

法。调节激光器的输出功率, 当输出功率比较小时, 晶体不产生光损伤, 此时透射光斑为圆形, 当激光器的功率逐渐增大, 晶体内部开始产生光损伤, 造成光散射。此时, 透射光斑会沿着晶体 c 轴方向伸展或拉长, 发生畸变。将透射光斑产生形变的临界光功率除以入射到晶体表面的光斑面积, 结果定义为晶体的抗光损伤能力 R 。表 1 给出了 $\text{In}:\text{Nd}:\text{LiTaO}_3$ 晶体抗光损伤能力的实验结果, 可以看出, $\text{In}_3:\text{Nd}:\text{LT}$ 晶体的抗光损伤能力最强。

用激光功率密度为 $2 \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的激光照射 $\text{In}:\text{Nd}:\text{LiTaO}_3$ 晶体, 照射时间相同, 透射光斑的形变图形如图 5 所示。图 5(a) 所示为没有晶体时的原始激光光斑。由图 5(b)~(d) 可以看出, 光斑沿着 c 轴拉长, 发生了明显的变形。由图 5(e) 可以看出, $\text{In}_3:\text{Nd}:\text{LT}$ 晶体没有发生光损伤现象。

表 1 $\text{In}:\text{Nd}:\text{LiTaO}_3$ 晶体抗光损伤能力

Table 1 Optical damage resistance ability of $\text{In}:\text{Nd}:\text{LiTaO}_3$ crystals

| Crystal | $\text{In}_0:\text{Nd}:\text{LT}$ | $\text{In}_1:\text{Nd}:\text{LT}$ | $\text{In}_2:\text{Nd}:\text{LT}$ | $\text{In}_3:\text{Nd}:\text{LT}$ |
|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| $R / (\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$ | 1.43×10^2 | 7.67×10^2 | 5.09×10^3 | 2.16×10^4 |

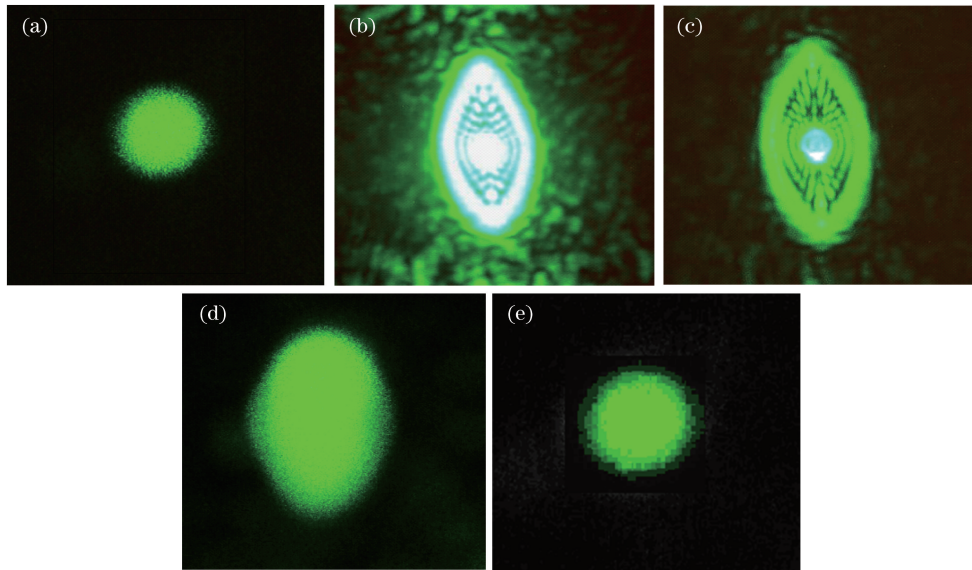


图 5 (a)原始激光光斑;(b) $\text{In}_0:\text{Nd}:\text{LT}$ 、(c) $\text{In}_1:\text{Nd}:\text{LT}$ 、(d) $\text{In}_2:\text{Nd}:\text{LT}$ 和(e) $\text{In}_3:\text{Nd}:\text{LT}$ 晶体的透射光斑

Fig. 5 (a) Original laser spot; transmission spots of (b) $\text{In}_0:\text{Nd}:\text{LT}$, (c) $\text{In}_1:\text{Nd}:\text{LT}$, (d) $\text{In}_2:\text{Nd}:\text{LT}$, and (e) $\text{In}_3:\text{Nd}:\text{LT}$ crystals

双折射率变化量为

$$\Delta n \approx \gamma k \alpha I / \sigma = \gamma k \alpha I / (\sigma_d + \sigma_{ph}), \quad (3)$$

式中 γ 为广义电光系数, k 为光生伏特效应的 Glass 常数, α 为光学吸收系数, I 为光照强度; $\sigma = \sigma_d + \sigma_{ph}$ 为晶体总的电导率, σ_d 为晶体暗电导率, σ_{ph} 为晶体光电导率^[27]。在有激光照射的情况下, 晶体的暗电导率远小于其光电导率, 因此, 分析光损伤机制时,

通常忽略暗电导的影响。在同成分 LiTaO_3 晶体中, 存在着 Li 空位缺陷结构, 为了取得电荷平衡, 一部分 Ta 进入 Li 空位, 形成反位 $\text{Ta}_{\text{Li}}^{4+}$ 。在抗光损伤 In^{3+} 掺杂浓度达到阈值前, 随着 In^{3+} 掺杂浓度的提高, 晶体中的反位钽 $\text{Ta}_{\text{Li}}^{4+}$ 与 Li 空位不断减少, 晶体的光电导增大, 由(3)式可知, 折射率也会相应减小^[28]。当 In^{3+} 掺杂浓度达到阈值时, In^{3+} 完全取

代反位 $\text{Ta}_{\text{Li}}^{4+}$, 晶体中的本征缺陷 $\text{Ta}_{\text{Li}}^{4+}$ 几乎不存在, 光电导最大, 光致折射率最小, 因此 $\text{In}:\text{Nd}:\text{LT}$ 晶体具有最强的抗光损伤能力。

3.3 光致发光特性

在 $0.808 \mu\text{m}$ 连续激光的激发下, $\text{In}:\text{Nd}:\text{LiTaO}_3$ 单晶中的电子由基态 $^4\text{I}_{9/2}$ 跃迁到激发态 $^4\text{F}_{5/2} + ^2\text{H}_{9/2}$, 而后向低能级跃迁, 产生三个发射光谱带, 即 $0.88\sim 0.96 \mu\text{m}$, $1.05\sim 1.13 \mu\text{m}$ 和 $1.33\sim 1.43 \mu\text{m}$, 分别对应 $^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}$ 、 $^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{11/2}$ 和 $^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$ 三个跃迁过程, 如图 6 所示。可以看出, $1.06 \mu\text{m}$ 附近的发光强度最大^[29]。

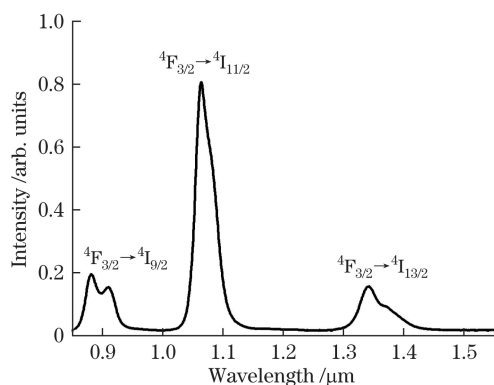


图 6 $0.808 \mu\text{m}$ 连续激光激发 $\text{In}:\text{Nd}:\text{LiTaO}_3$ 单晶荧光发射谱
Fig. 6 Fluorescence emission spectrum of $\text{In}:\text{Nd}:\text{LiTaO}_3$ single crystal excited by $0.808 \mu\text{m}$ continuous laser

4 结 论

采用提拉法生长了掺杂 LiTaO_3 晶体。在同成分 $\text{In}:\text{Nd}:\text{LiTaO}_3$ 晶体 (Li 和 Ta 的物质的量比值为 0.946) 中加入相同浓度的 Nd_2O_3 (摩尔分数 0.5%) 和不同浓度的 In_2O_3 (摩尔分数分别为 $0, 0.5\%, 1.0\%, 1.5\%$), 通过测量晶体的紫外吸收边, 确定了 In^{3+} 的掺杂浓度阈值为 3.0% 。利用透射光斑畸变法测量了同成分 $\text{In}:\text{Nd}:\text{LiTaO}_3$ 晶体的抗光损伤能力。当 In^{3+} 掺杂浓度达到阈值时, 晶体的抗光损伤能力最强。这是由于 In^{3+} 取代了晶体中的反位 $\text{Ta}_{\text{Li}}^{4+}$, 晶体的光电导增大, 双折射率变化量减小。具有优异的电光性能、抗光损伤能力和发光特性的 $\text{In}:\text{Nd}:\text{LiTaO}_3$ 单晶有望成为集成光子学的一种优选材料。

参 考 文 献

- [1] He C J, Deng C G, Wang J M, *et al.* Crystal orientation dependent optical transmittance and band gap of $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-BaTiO}_3$ single crystals[J]. *Condensed Matter*, 2016, 483: 44-47.
- [2] Jia H, Sun L. Photorefractive effect of ion-doped $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ single crystals[J]. *Scientia Sinica: Physics, Mechanics and Astronomica*, 2012, 42(4): 333-338.
贾红, 孙亮. 掺铁铌镁酸铅-钛酸铅单晶的光折变效应[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2012, 42(4): 333-338.
- [3] He C J, Fu X D, Xu F, *et al.* Orientation effects on the bandgap and dispersion behavior of $0.91\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-}0.09\text{PbTiO}_3$ single crystals[J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21(5): 054207.
- [4] He C J, Chen H B, Wang J M, *et al.* Optical transmission and dispersion of $0.25\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{-}(0.75-x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-}x\text{PbTiO}_3$ single crystals[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117: 164104.
- [5] He C J, Yi X J, Wu T, *et al.* Wavelength dependence of refractive index in lead-free $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-BaTiO}_3$ single crystals[J]. *Optical Materials*, 2014, 36(12): 2023-2025.
- [6] He C J, Chen H B, Sun L, *et al.* Effective electro-optic coefficient of $(1-x)\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-}x\text{PbTiO}_3$ single crystals[J]. *Crystal Research and Technology*, 2012, 47(6): 610-614.
- [7] Jia H. Nonvolatile photorefractive properties of triply doped stoichiometric lithium tantalate single crystals[J]. *Scientia Sinica: Technology*, 2015, 45(5): 512-518.
贾红. 三掺杂化学计量比钽酸锂晶体的非挥发发光存储性能[J]. *中国科学: 技术科学*, 2015, 45(5): 512-518.
- [8] Yan T. Growth, structure and properties of high quality LiNbO_3 and LiTaO_3 crystals[D]. Jinan: Shandong University, 2011.
颜涛. 高品质铌酸锂、钽酸锂晶体的生长、结构与性质研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [9] Lee K S, Ko D K, Takekawa S, *et al.* Characterization of in-situ terahertz detection by optical interaction in a periodically poled stoichiometric lithium tantalate nonlinear crystal[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2014, 35(10): 833-829.
- [10] Zhang D L, Zhang Q, Wong W H, *et al.* Er^{3+} diffusion in LiTaO_3 crystal[J]. *Applied Surface Sciences*, 2015, 357: 1097-1103.
- [11] Liu J, Liu J, Fang S L, *et al.* Effects of $\text{Gd}^{3+}/\text{Y}^{3+}$ codoping on the spectral properties of $\text{Nd}:\text{CaF}_2$ crystals[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(5): 054207.
刘坚, 刘军, 芳苏良, 等. $\text{Gd}^{3+}/\text{Y}^{3+}$ 共掺对 $\text{Nd}:\text{CaF}_2$ 晶体光谱性能的影响[J]. *物理学报*, 2016, 65(5): 054207.
- [12] Zhang Y Y, Wang X P, Liu B, *et al.* Spectroscopic characterization of disordered $\text{Nd}:\text{BaLaGa}_3\text{O}_7$ crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(s2): s230003.

- 张园园, 王旭平, 刘冰, 等. 无序激光晶体 Nd:BaLaGa₃O₇ 的光谱研究[J]. 光学学报, 2015, 35(s2): s230003.
- [13] Wang D Z, Yan B X, Bi Y, *et al.* Three-wavelength green laser using intracavity frequency conversion of Nd:Mg:LiTaO₃ with a MgO:PPLN crystal[J]. Applied Physics B, 2014, 117(4): 1117-1121.
- [14] Feng T, Li T, Zhao S, *et al.* Performance of diode-pumped continuous wave tunable and passively Q-switched Nd, Mg:LiTaO₃ laser[J]. Optics Communications, 2014, 325: 92-94.
- [15] Sun D H, Leng Y H, Sang Y H, *et al.* Nd:MgO:LiTaO₃ crystal for self-doubling laser applications: Growth, structure, thermal and laser properties[J]. CrystEngComm, 2013, 15(37): 7468-7474.
- [16] Li H Q, Tang Y L, Zhang R. Efficient acousto-optic Q-switched Nd, Mg:LiTaO₃ lasers[J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(4): 045809.
- [17] Peng F, Zhang Q L, Wang X F, *et al.* Synthesis, structure and spectroscopic properties of Nd³⁺:SrY₂O₄ phosphor[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(1): 014211.
彭方, 张庆礼, 王小飞, 等. Nd³⁺:SrY₂O₄ 粉体的制备、结构与光谱性能研究[J]. 物理学报, 2016, 65(1): 014211.
- [18] Wu J C, Chen Z B, Choubey R K, *et al.* On the study of zinc doping in congruent LiTaO₃ crystals[J]. Materials Chemistry and Physics, 2012, 133(2/3): 813-817.
- [19] Dai L, Yan Z H, Jiao S S, *et al.* Effect of [Li]/[Nb] ratios on the absorption and up-conversion emission spectra in In:Yb:Ho:LiNbO₃ crystal[J]. Journal of Alloy and Compounds, 2015, 644: 502-505.
- [20] Sun T, Zhang X D, Sun L, *et al.* Nonvolatile photorefractive properties in triply doped stoichiometric Mg:Fe:Mn:LiTaO₃ crystals[J]. Chinese Physics B, 2014, 23(3): 014204.
- [21] Dai L, Yan Z, Jiao S, *et al.* Effect of dopant concentration on the spectroscopic properties in an In³⁺ doped (0, 1, 2 and 4 mol%) Yb:Tm-LiNbO₃ crystal[J]. RSC Advances, 2015, 5(46): 36385-36389.
- [22] Luo S H, Sun X D, Shi H X, *et al.* Defect structure and optical damage resistance of In:Fe:Cu:LiNbO₃ crystals[J]. Journal of Modern Optics, 2009, 56(1): 115-119.
- [23] Akhmatkhanov A R, Chuvakova M A, Vaskina E M, *et al.* Polarization reversal process in MgO doped congruent lithium tantalate single crystals[J]. Ferroelectrics, 2015, 476(1): 57-68.
- [24] Shi H X, Sun X D, Luo S H, *et al.* Defect structure and optical damage resistance of Hf:Fe:LiNbO₃ crystals[J]. Optics and Laser Technology, 2010, 42(7): 1118-1121.
- [25] He C J, Zhang Y G, Sun L. Electrical and optical properties of Nd³⁺-doped Na_{0.5}Bi_{0.5}TiO₃ ferroelectric single crystal[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46(24): 245104.
- [26] Bäumer C, David C, Tunyagi A, *et al.* Composition dependence of the ultraviolet absorption edge in lithium tantalite[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(5): 3102.
- [27] Zheng W, Wang D P, Xu Y H. Growth and property of Zn-doped near-stoichiometric LiTaO₃ crystal[J]. Journal of Crystal Growth, 2010, 312(11): 1879-1882.
- [28] Nakamura M, Takekawa S, Liu Y W, *et al.* Growth and characterization of Sc-doped near-stoichiometric LiTaO₃ crystals[J]. Journal of Crystal Growth, 2009, 311(2): 272-277.
- [29] He K N, Li D H, Wei Z Y. Research status of passively mode-locked laser based on Nd³⁺-doped disordered crystals[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(10): 1000001.
何坤娜, 李德华, 魏志义. Nd³⁺ 掺杂无序晶体被动锁模激光器的研究现状[J]. 中国激光, 2016, 43(10): 1000001.