

Zn^{2+} 浓度对 $\text{Zn: Ce: Cu: LiNbO}_3$ 晶体缺陷结构的影响

王路平¹, 代 丽², 韩县博², 邵 瑀²

(1. 哈尔滨理工大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040;

2. 哈尔滨理工大学 理学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 采用单晶提拉法生长了不同 Zn^{2+} (1, 3, 5, 7 mol%) 离子浓度的 $\text{Zn: Ce: Cu: LiNbO}_3$ 单晶, 为了研究 Zn^{2+} 离子浓度对 $\text{Zn: Ce: Cu: LiNbO}_3$ 单晶缺陷结构的影响, 采用光致散射光强阈值方法来测定晶体的抗光损伤能力, 用电感耦合等离子原子发射光谱 (ICP-AES) 测试 $\text{Zn: Ce: Cu: LiNbO}_3$ 晶体中不同掺杂离子的有效分凝系数。试验结果表明: 随着晶体中掺杂 Zn^{2+} 离子浓度的增加, 晶体的抗光损伤能力增强, Zn^{2+} 离子分凝系数随着晶体中 Zn^{2+} 浓度增加呈现先升高后降低的趋势, 在 Zn^{2+} 浓度为 5 mol% 时达到最高点; Ce^{3+} 和 Cu^{2+} 离子的分凝系数随着 Zn^{2+} 离子浓度的增加逐渐降低, 结合 LiNbO_3 晶体的占位机制和锂空位缺陷解释了相关实验结果。

关键词: 铌酸锂晶体; 抗光损伤能力; 有效分凝系数

DOI: 10.15938/j.jhust.2019.01.017

中图分类号: TP333.4 文献标志码: A 文章编号: 1007-2683(2019)01-0103-05

Effect of Dopant Concentration on the Defect Structure in Zn^{2+} Doped Ce: Cu: LiNbO_3 Crystals

WANG Lu-ping¹, DAI Li², HAN Xian-bo², SHAO Yu²

(1. School of Material Science and Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, China;

2. School of Applied Sciences, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: A series of $\text{Zn: Ce: Cu: LiNbO}_3$ crystals doped with Zn^{2+} (1, 3, 5, 7 mol%) were grown by the Czochralski method from the congruent melt. In order to study the influence of Zn^{2+} ion concentration to the defect structure of $\text{Zn: Ce: Cu: LiNbO}_3$ single crystal, we choose light-induced scattering experiment to measure the optical damage resistance ability of the $\text{Zn: Ce: Cu: LiNbO}_3$ crystal. The effective segregation coefficient of doped ions of $\text{Zn: Ce: Cu: LiNbO}_3$ crystals were measured by inductively coupled plasma-atomic emission spectrum (ICP-AES). It was found that the optical damage resistance ability enhanced with increasing of ZnO concentration in the melt and effective segregation coefficient of Zn^{2+} will increased with increasing of ZnO concentration in the melt at first, which reach to the climax when the doped Zn^{2+} concentration is 5mol%, then it decreased. The effective segregation coefficient of Ce^{3+} and Cu^{2+} will decreased with increasing of ZnO concentration in the melt. The experimental were analyzed based on the Li-vacancy defect model

Keywords: $\text{Zn: Ce: Cu: LiNbO}_3$ crystal; optical damage resistance ability; effective segregation coefficient

收稿日期: 2017-01-02

基金项目: 黑龙江省自然科学基金 (QC2015061).

作者简介: 王路平 (1992—), 男, 硕士研究生;

韩县博 (1994—), 男, 硕士研究生.

通信作者: 代 丽 (1981—), 女, 教授, E-mail: daili198108@126.com.

0 引言

铌酸锂(LiNbO_3)晶体近年来引起了极大的关注度,这是因为它具有优异的电光效应和非线性光学效应,还具有其他的优异性能,包括优良的电学、声学 and 光学性能,较高的表面硬度,能够进行高质量的表面加工,造价低廉等优点,因此它被广泛的应用于全息存储器、压电、光电、波导和非线性光学设备^[1-4]。但是由于纯铌酸锂晶体自身的缺点,限制了它在更广泛领域的应用,如光损伤阈值较低和光折变效应较弱就是限制它应用的较大的原因,为了解决这个问题,研究者们经过反复的实验研究,发现在铌酸锂中掺杂光折变敏感杂质 Ce, Cu 等^[5-8]元素能够改善它的光折变性能,掺入 Zn 等^[9]元素能提高它的光损伤阈值。但是在改善它的光折变性能的同时也引起了问题,那就是会导致晶体较长的响应时间和强烈的光致散射^[8]。研究者在研究中发现 Mg, Zn, In, Hf, Sc, Zr 等^[9-12]元素具有优异的抗光散射能力,于是研究者们想到在 Ce: Cu: LiNbO_3 晶体中掺入这些元素也许能够改善它的光学性能。 Zn^{2+} 离子与 Mg^{2+} 离子性质相近,有相同的电荷状态,相近的离子半径和高二分布系数,所以选择 Zn^{2+} 离子作为掺杂因子,既能够提高晶体的光损伤阈值又能够提高抗光散射能力。因此本文选择 Zn: Ce: Cu: LiNbO_3 晶体作为实验研究的主体,通过实验分析研究了晶体中掺杂离子 Zn^{2+} 的浓度对晶体的抗光损伤能力和掺杂离子的有效分凝系数的影响。

1 Zn: Ce: Cu: LiNbO_3 晶体的生长

当前晶体的生长主要是用单晶提拉法,用籽晶提拉,圆柱形的晶体从溶体中垂直的提拉出来。这种方法的优点是:便于观察晶体在各个时间段的生长状况,在生长的時候能够排除晶体内存在的原生缺陷,易于长出较大尺寸的单晶。缺点是:原料在坩埚中的存在形态为液态,坩埚中原有的杂质在晶体生长过程中会混入晶体中,对晶体造成污染。

实验所需要的 Zn: Ce: Cu: LiNbO_3 晶体我们通过单晶提拉法生长出来,分别编号为 Zn1, Zn3, Zn5 和 Zn7,其中 Zn^{2+} 的浓度分别为(1, 3, 5, 7 mol)%。晶体生长所需要的原料如表 1 所示,生长晶体所用的原料: ZnO , Ce_2O_3 和 CuO ,它们的纯度均为 99.99%。

晶体生长的准备条件:根据原料的配比,用分析

天平准确称取所需的原料,将称量好的原料放置到混料机中以 20 r/min 的转速混合 24/h,确保原料充分混合,然后将混合好的原料放入准备好的铂坩埚中,进行预烧结,首先在 750℃ 烧结 2 h,使 LiCO_3 充分分解,避免在生长过程中发生分解产生气体进入晶体,使晶体产生内部缺陷。然后在 1150℃ 再次烧结,生成 Zn: Ce: Cu: LiNbO_3 多晶。

生长工艺:我们将晶体在一个轴温度梯度为 30~35℃/cm 的中频炉内生长,将晶体沿着 $[101]$ 方向以 1~2 mm/h 的速度进行提拉,晶体的转速为 10~20 r/min。晶体生长完成后,以 60℃/h 的速度进行冷却,直至冷却到室温。为了得到质量更好的晶体使得实验更加容易的进行,需要将晶体进行人工极化,晶体放入另一个温度梯度接近为 0 的电阻炉,在温度为 1200℃ 的条件下用电流密度为 5 mA/cm² 的直流电流进行 30 min 的极化。最后对晶体进行切片,从晶体的中部切下尺寸为 10 mm × 2 mm × 10 mm ($x \times y \times z$) 的样品,切片后进行研磨,光学抛光处理,以便于测试。

表 1 样品及编号

Tab. 1 Samples and number

样品 编号	[Zn] (摩尔百分数)	[Ce] (质量百分数)	[Cu] (质量百分数)
Zn1	1	0.1	0.05
Zn3	3	0.1	0.05
Zn5	5	0.1	0.05
Zn7	7	0.1	0.05

2 实验测试与结果

2.1 抗光损伤测试结果与讨论

LN 晶体是具有巨大潜在应用价值的材料,但是目前它的应用仍然具有很大的限制,这是由于在大多数的情况下 LN 晶体中存在一些过渡金属元素会导致电子陷阱,同时晶体中一些不稳定的离子容易失去电子,这两个因素同时作用导致了在晶体中发生光折变效应而使得晶体的抗光损伤能力较低。我们用光致散射光强阈值方法来测定 Zn: Ce: Cu: LiNbO_3 晶体的抗光损伤能力^[13],这种测试方法的原理是:光致散射是照射在晶体上的入射光强度对照射在晶体上的时间的累积效应,因此我们可以用光强阈值来定量描述晶体光散射的阈值效应^[14]。图 1 为实验测试所使用的装置。实验中我们使用的照射晶

体的光源为 He-Ne 激光器 ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$), 偏振方向平行于 c 轴, 照射到晶体样品的入射光的强度的大小能够通过可调衰减器来调节, 为了只让照射到样品中心部分的透射光通过功率计, 所以用直径为 1 mm 的光阑将散射光过滤掉。晶体样品 Zn1, Zn3, Zn5, Zn7 它们的抗光损伤测试结果如表 2 所示。

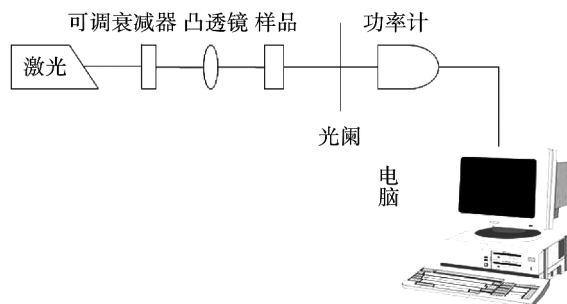


图 1 晶体抗光损伤能力的测试装置图

Fig. 1 Test device diagram of crystal damage resistance

表 2 $\text{Zn: Ce: Cu: LiNbO}_3$ 晶体的抗光损伤能力

Tab. 2 Optical damage resistance ability of $\text{Zn: Ce: Cu: LiNbO}_3$ crystals

样品	Zn1	Zn3	Zn5	Zn7
$R(\text{W/cm}^2) \times 10^3$	1.25	9.84	29.33	79.58

通过表 2 的实验测试结果可以看出, $\text{Zn: Ce: Cu: LiNbO}_3$ 晶体的抗光损伤能力是随着掺杂的 Zn^{2+} 的浓度的增加而增加的, 实验中测试的 $\text{Zn: Ce: Cu: LiNbO}_3$ 晶体中掺杂 Zn^{2+} 浓度最大为 $7 \text{ mol\%}$, 从实验测试的结果我们可以看出当晶体中掺杂的 Zn^{2+} 浓度为 $7 \text{ mol\%}$ 的时候晶体样品的抗光损伤能力相比较掺杂的 Zn^{2+} 浓度为 $1 \text{ mol\%}$ 晶体样品提高了两个数量级。相比较其它已发表的研究成果来说 Zn7 样品也属于抗光损伤能力优异的晶体, 能够满足实际应用的需要。

LiNbO_3 晶体的光损伤的原因是: 在 LiNbO_3 中并不是严格的符合化学计量比的^[13], 在实际中我们生长出的晶体中各个组分的离子比会有一定的偏差如 $\text{Li/Nb} = 0.94 < 1$, 即是说在晶体中大多数的情况下相比较 Nb^{5+} 离子 Li^+ 离子会缺少一部分, 这样在晶体的内部就会容易产生本征缺陷, 在晶体内部形成锂空位缺陷 V_{Li}^- , 这样晶体内部的正负电荷就会不相等, 所以晶体为了保证自身的电中性, 自由电荷就会自发的移动, 在晶体中多余的一部分 Nb^{5+} 离子就会自由移动到原来锂的位置占据锂空位, 这样在晶体

内部就形成了本征缺陷, 反位铌缺陷 $\text{Nb}_{\text{Li}}^{4+}$, 光折变敏感中心就这样出现了^[14]。 $\text{Zn: Ce: Cu: LiNbO}_3$ 晶体中掺杂离子 Ce^{4+} 和 Cu^{2+} 进入晶体占据 V_{Li}^- 形成了 $\text{Ce}_{\text{Li}}^{3+}$, Cu_{Li}^+ 成为电子接收体^[17], 但是晶体中仍然是 V_{Li}^- 和 $\text{Nb}_{\text{Li}}^{4+}$ 占主要部分, 在晶体中随着掺杂 Zn^{2+} 离子浓度的提高晶体的抗光损伤能力也随之开始改变。我们从结果可以看出 Zn3 样品相比较 Zn1, 它的抗光损伤能力有了小幅度增强, 这是因为掺杂离子 Zn^{2+} 只能取代小部分的 V_{Li}^- , 不能够实质改变晶体内部缺陷, 所以没有显著的影响。样品 Zn5 相比较 Zn1 它的抗光损伤能力提高了一个数量级, 这是因为 $\text{Zn: Ce: Cu: LiNbO}_3$ 晶体内部本征缺陷如 V_{Li}^- 和 $\text{Nb}_{\text{Li}}^{4+}$ 的大量减少, 从而减少了电荷施与和捕获中心, 影响了晶体内部的光电效应^[18]过程。从抗光损伤测试结果可以看出, 测试的晶体样品 Zn7 相比较 Zn1 它的抗光损伤能力提高了两个数量级, 当晶体中掺杂的 Zn^{2+} 离子的浓度达到或者超过它的阈值浓度时, 所有反位铌 $\text{Nb}_{\text{Li}}^{4+}$ 和 Li 空位 V_{Li}^- 全部或者绝大部分都会被 Zn^{2+} 取代, 这样在晶体的内部光折变中心就会消失, 同时 Ce^{4+} 和 Cu^{2+} 也都被赶到铌位, 在铌位形成 $\text{Ce}_{\text{Nb}}^{2+}$, $\text{Cu}_{\text{Nb}}^{3+}$, 因为其离子带负电所以俘获离子的能力就会大大减弱, 晶体就会保持电中性, 由于光折变中心的消失晶体中光折变效应就会变弱, 所以晶体的抗光损伤能力提高^[19]。

2.2 分凝系数测试结果与讨论

晶体的性能与结构密切相关, 为了探索晶体的组分对性能的影响, 首先研究了晶体中的离子分布情况。分凝系数^[20]就是表示晶体相中的离子和熔体相中的离子相互关系的一个系数, 晶体中的各个离子的分凝系数会随着晶体中不同掺杂离子的变化而变化。按照国际统一标准我们用 K_{eff} 来定义分凝系数, 实际的情况下晶体中离子的有效分凝系数 $K_{\text{eff}} \neq 1$, 在晶体的相图中观察我们就会发现离子从溶体相进入晶体相的时候浓度是不相等的。如果离子的有效分凝系数 $K_{\text{eff}} < 1$, 在晶体的相图中就可以看出杂质离子在晶体相内的浓度要小于在溶体相内的浓度, 在熔体相内杂质离子会逐渐移动聚集到一起, 并且会随着晶体的生长而不断进行, 这样晶体长成后内部的杂质离子会呈现不同的浓度分布, 表现为在晶体的内部呈现一种浓度梯度^[23]。在晶体内部由于组分分布的不均匀就会对晶体的光学性能产生一些不良的影响, 分凝系数偏离 1 越大, 则这种不均匀性就越严重。

用电感耦合等离子原子发射光谱法(inductively coupled plasma-atomic emission spectrum) (ICP-AES) 法测定晶体中掺杂离子的分凝系数,这种方法具有动态范围宽,检测能力强,可以同时测定多种掺杂离子,高灵敏度高精度等优点^[21-24]。

有效分凝系数^[25-30]:

$$K_{eff} = C_s / C_l \quad (1)$$

是晶体生长过程中某一时刻的溶质在固相与液相中平均浓度比,它与平衡分凝系数和生长参数密切相关。式中: C_s 为固相中掺杂离子的浓度; C_l 为液相中掺杂离子的浓度。图2~4分别给出了 Zn^{2+} , Ce^{4+} , Cu^{2+} 离子的分凝系数随着原料中 Zn^{2+} 浓度增加的变化。

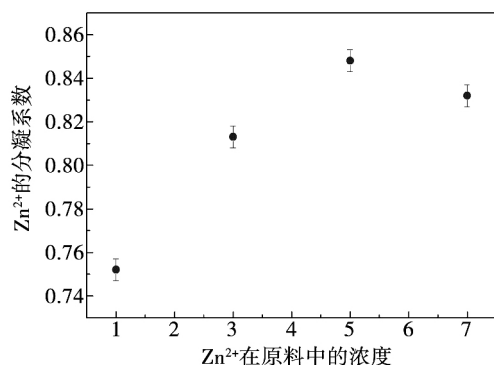


图2 Zn^{2+} 的分凝系数随 Zn^{2+} 浓度的变化

Fig.2 The change of the segregation coefficient of Zn^{2+} with the change of Zn^{2+}

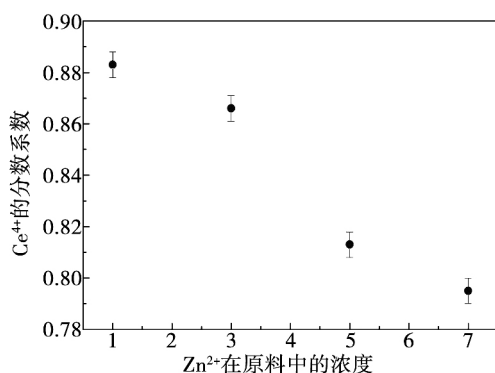


图3 Ce^{3+} 的分凝系数随 Zn^{2+} 浓度的变化

Fig.3 The change of the segregation coefficient of Ce^{3+} with the change of Zn^{2+}

从图2中的分凝测试结果可见,随着晶体原料中 Zn^{2+} 离子浓度的增加, Zn^{2+} 离子的分凝系数呈现先升高后降低的趋势,在 Zn^{2+} 离子浓度为 5 mol% 的时候达到顶点,但是仍然其分凝系数 $K_{eff} < 1$ 。而从图3、4可见, Ce^{4+} 和 Cu^{2+} 离子的分凝系数随着原

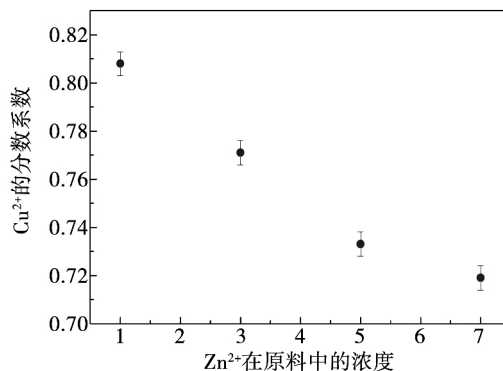


图4 Cu^{2+} 的分凝系数随 Zn^{2+} 浓度的变化

Fig.4 The change of the segregation coefficient of Cu^{2+} with the change of Zn^{2+}

料中 Zn^{2+} 离子浓度的增加而呈现逐渐下降的趋势,但是并没有呈现出线性分布的趋势。

研究表明, Zn: Ce: Cu: LiNbO₃ 晶体中,当 Zn^{2+} 离子进入到晶体中的时候 Zn^{2+} 离子会优先的占据反位铌缺陷 Nb_{Li}^{4+} 和 Li 空位,这样造成的结果就是晶体中本征缺陷浓度会不断降低,影响其他的离子 Ce^{3+} 和 Cu^{2+} 离子进入晶体的难度就会加大,因此 Ce^{3+} 和 Cu^{2+} 离子占据 Li 空位和 Nb_{Li}^{4+} 的概率就会下降,所以 Ce^{4+} 和 Cu^{2+} 离子的分凝系数就会随着原料中 Zn^{2+} 离子浓度的增加而降低。同时原料中添加的 ZnO 的含量会对 Zn^{2+} 离子在晶体中的有效分凝系数造成直接的影响, Zn^{2+} 离子在晶体中的掺杂浓度低于其阈值浓度时,因为晶体中有着足够的 Nb_{Li}^{4+} 和 Li 格位,所以 Zn^{2+} 离子进入晶体占据在 Nb_{Li}^{4+} 和 Li 格位是比较容易的,所以其分凝系数会不断增加,当达到阈值浓度 5 mol% 的时候 Zn^{2+} 的分凝系数最高,此时晶体中所有的 Nb_{Li}^{4+} 和 Li 格位全部或绝大部分都被取代,再增加的 Zn^{2+} 离子难以进入晶体中,因此 Zn^{2+} 离子的分凝系数有下降的趋势。

3 结 论

采用单晶提拉法生长了不同 Zn^{2+} 离子浓度(1, 3, 5, 7 mol%) 的 Zn: Ce: Cu: LiNbO₃ 晶体,用光致散射实验测定晶体的抗光损伤能力,发现晶体的抗光损伤能力随着晶体中掺杂的 Zn^{2+} 离子浓度的增加而增加。从实验结果可见,当 Zn^{2+} 离子的掺杂浓度达到 7 mol% 的时候 Zn: Ce: Cu: LiNbO₃ 晶体的抗光损伤能力相比较 1 mol% 的样品提高了两个数量级,极大的增强了晶体的抗光损伤能力。用电感耦合等离子原子发射光谱测定掺杂离子的有效分凝系数,

发现 Zn^{2+} 离子的有效分凝系数随着掺杂 Zn^{2+} 离子浓度的增加呈现先升高后降低的趋势,在晶体掺杂 Zn^{2+} 离子浓度为 5 mol% 时,其分凝系数达到最高。而 Ce^{3+} 离子和 Cu^{2+} 离子的分凝系数随着掺杂 Zn^{2+} 离子的浓度增加呈现逐渐降低的趋势。这些研究为以后的 $\text{Zn: Ce: Cu: LiNbO}_3$ 晶体的性能的深入研究奠定了基础。

参 考 文 献:

- [1] WANG Y, JIANG Y. J. Crystal Orientation Dependence of Piezoelectric Properties in LiNbO_3 and LiTaO_3 [J]. Opt Mater, 2003, 23: 403.
- [2] CHAH K, AILLERIE M, FONTANA M. D, MALOVICHKO G. Electro-optic Properties in Fe-doped LiNbO_3 Crystals as a Function of Composition [J]. Opt Commun, 2000, 176: 261.
- [3] HOLM A, STURZER Q, XU Y, WEIGEL R. Investigation of Surface Acoustic Waves on LiNbO_3 , Quartz, and LiTaO_3 by Laser Probing [J]. Microelectron Eng, 1996, 31: 123.
- [4] HU, H., ZHONG K. S, TANG D. Q, LU Z. X. Theoretical Analysis of Cherenkov Frequency-doubling in a Periodically Poled LiNbO_3 Waveguide [J]. Opt Commun, 2000, 174: 105.
- [5] 王森. 铈掺杂铌酸锂晶体结构及光折变性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [6] 余桐柏. 三掺铈铜同成分铌酸锂结构与光折变性能 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
- [7] 王锐, 赵朝忠. 高掺铈富铈铌酸锂体抗光损伤能力的研究 [J]. 高技术通讯, 2000, 10(12): 62.
- [8] LING F. R, WANG B, GUAN C. X, et al. Effect of UV Light on Multiplexing Holograms in Near-stoichiometric LiNbO_3 : Ce: Fe [J]. Opt Commun, 2004, 241(4): 293.
- [9] 张欣, 代丽, 冯国楠, 等. 镁掺量对镁铈铌酸锂晶体的抗光损伤和激光性能的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(8): 1078.
- [10] 诸玲, 孔勇发, 刘士国, 等. 铈、镧、钨与钼双掺铌酸锂晶体的光折变性能研究 [C] // 全国晶体生长与材料学术会议, 2015: 138.
- [11] 李光滨. 钨铈铁掺杂铌酸锂晶体的光折变性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2009.
- [12] 刘宏德, 孔勇发, 梁后锐, 等. 近化学计量比掺铈铌酸锂晶体的制备与抗光损伤性能研究 [C] // 全国晶体生长与材料学术会议, 2009: 162.
- [13] 代丽, 冯国楠, 焦珊珊. Li / Nb 变化对 Mg: Ho: LiNbO_3 晶体光学性能的影响 [J]. 哈理工学报, 2014, 19(4): 49.
- [14] 陈洪建, 张维连, 阎文博, 等. 铁铈双掺铌酸锂晶体的光致散射研究 [J]. 人工晶体学报, 2009, 38(2): 506.
- [15] ZHEN X. H, XU Y. H, WANG R, et al. Study on Growth and Optical Property of Nd: Zn: LiNbO_3 Crystals [J]. Ferroelectrics, 2002, 265(1): 297.
- [16] 张欣, 徐朝鹏, 卢海涛, 等. 铈铁掺杂铌酸锂晶体光折变性能的研究 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(12): 3718.
- [17] 徐悟生, 许士文, 李宣东, 等. In 离子在掺杂 LiNbO_3 晶体中的占位研究 [J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(5): 603.
- [18] 李璇, 麻尉蔚, 马凤凯, 等. Ho^{3+} 掺杂 Sc_2SiO_5 激光晶体生长与光谱性能研究 [J]. 人工晶体学报, 2014, 43(6): 1327.
- [19] DAI L, LI D, XU C, et al. Influence of Hf^{4+} ions Concentration on the Defect Structure and Exposure Energy in Hf: Ho: LiNbO_3 [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45(1): 503.
- [20] 阎哲华, 代丽, 孙晋, 等. TSSG 法生长 Zr: Fe: LiNbO_3 晶体及其分凝系数 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2016, 21(4): 80.
- [21] 李璇, 麻尉蔚, 马凤凯, 等. Ho^{3+} 掺杂 Sc_2SiO_5 激光晶体生长与光谱性能研究 [J]. 人工晶体学报, 2014(6): 1327.
- [22] 涂一帆, 涂小牛, 熊开南, 等. Sm: YCOB 晶体生长及吸收光谱表征 [J]. 人工晶体学报, 2013(5): 810.
- [23] 张娜娜, 王继扬, 颜涛, 等. 掺铈铌酸锂晶体的生长和表征(英文) [J]. 硅酸盐学报, 2012(3): 412.
- [24] 连晓文, 梁旭霞, 蔡文华, 等. ICP-MS 法测定高钙食品中铅、镉、砷、铜的研究 [J]. 中国卫生检验杂志, 2007(5): 775.
- [25] DAI L, LI D, XU C, et al. Influence of Hf^{4+} ions Concentration on the Defect Structure and Exposure Energy in Hf: Ho: LiNbO_3 [J]. Opt Laser Technol, 2013, 45(1): 503.
- [26] WU W, YUAN E. L, ZENG Y, et al. Characterization of PdHAP and Catalysis for Benzyl Alcohol Green Oxidation [J]. J. Inorg. Mater, 2012, 27(12): 1289.
- [27] CAO H, ZHANG S, FAN X, XU J, ZHANG Y, et al. Synthesis and Characterization of CIGS Powder [J]. J Cryst. 2010, 310(24): 5375.
- [28] DAI L, YAN Z, JIAO S, et al. Effect of [Li] / [Nb] Ratios on the Absorption and Up-conversion Emission Spectra in In: Yb: Ho: LiNbO_3 Crystal [J]. J Alloy Compd, 2015, 644: 502.
- [29] SUN J, XU Y, WANG R, et al. Ir^{4+} ion-free $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ Single Crystal Grown by the CZ Method [J]. Cryst Res Technol, 2013, 48(8): 505.
- [30] YUN J G, JUNG D H, KIM H J, et al. Fabrication of Diamond-like Carbon-based Two-dimensional Photonic Crystals [J]. Microelectron Eng, 2014, 126(S): 99.

(编辑: 温泽宇)