

低温宽带 $\text{NaCl}(\text{OH}^-):(\text{F}_2^+)_\text{H}$ 色心激光 的实验研究*

林碧洲 许承晃 吴季怀

黄妙良 邱继展 林建明

(华侨大学材料物理化学研究所, 泉州 362011)

摘 要 在 NaCl 晶体中掺入 OH^- 离子可以有效地提高 F_2^+ 心的稳定性. 采用四镜折迭 X 型像散补偿腔, 获得了峰值波长 $1.57 \mu\text{m}$ 、输出功率 $>250 \text{ mW}$ 的低温宽带 $\text{NaCl}(\text{OH}^-):(\text{F}_2^+)_\text{H}$ 色心激光. 本文着重讨论 OH^- 对 F_2^+ 心的稳定作用和影响色心激光振荡的各种因素.

关键词 色心, 色心激光, 稳定性.

1 引 言

F_2^+ 色心激光具有光-光转换效率高、输出功率高等优异特性而引起人们的普遍重视. 但由于纯 F_2^+ 心的稳定性差, 阻碍了它的应用和发展^[1,2]. 为提高 F_2^+ 心的稳定性, 人们在碱卤化物晶体中掺入 OH^- 和 O^{2-} , 形成受 O^{2-} 扰动的 F_2^+ 心(即 $(\text{F}_2^+)_\text{H}$ 心), 使 F_2^+ 心的稳定性得到有效的改善^[3,4].

$\text{NaCl}(\text{OH}^-)$ 晶体中的 $(\text{F}_2^+)_\text{H}$ 心不仅稳定性好, 激光输出功率高, 而且由于其发射峰值波长恰好落在石英光纤能量损耗最低处, 使得它在光纤通讯、超高速现象、光孤子等研究领域中具有诱人的应用前景. 采用四镜折迭 X 型像散补偿腔, 在国内首次实现了其低温激光振荡, 获得了输出功率 $>250 \text{ mW}$ 、峰值波长 $1.57 \mu\text{m}$ 的宽带激光输出. 本文在文献^[4,5]基础上, 着重讨论 OH^- 对 F_2^+ 心的稳定作用和影响色心激光输出的各种因素.

2 $\text{NaCl}(\text{OH}^-):(\text{F}_2^+)_\text{H}$ 色心晶体的制备

$\text{NaCl}(\text{OH}^-):(\text{F}_2^+)_\text{H}$ 色心晶体的制备需经如下步骤:

- 1) 晶体生长 采用提拉法, 从含 NaOH 150 ppm 的 NaCl 熔体中生长出均匀掺入、含 OH^- 浓度约 50 ppm 的透明 $\text{NaCl}(\text{OH}^-)$ 晶体.
- 2) 附加着色 晶体经切片, 在热管钠蒸气下赋色, 形成大量 $\text{O}^{2-}-\text{F}^+$ 偶极子、F 心、 F_2^+ 高阶聚集心等. 在赋色过程中, OH^- 按下式分解

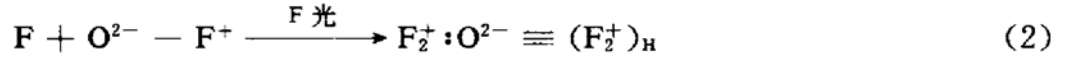
* 本文工作得到国家自然科学基金和福建省自然科学基金的部分资助.

收稿日期: 1993年3月23日; 收到修改稿日期: 1993年5月12日



3) 热处理 促使部分高阶聚集心解体, 得到较大浓度的 F 心和 O²⁻-F⁺ 偶极子.

4) 转型 在 F 带光转型条件下, F 心与 O²⁻-F⁺ 结合, 形成受扰的 F₂⁺ 心, 即 (F₂⁺)_H 心,



这种受 O²⁻ 离子扰动的 F₂⁺ 心, 由于 O²⁻ 与 F⁺ 结合成共价偶极子, O²⁻ 部分补偿了 F₂⁺ 心过剩的正电荷, 使整个色心呈电中性, 降低了 F₂⁺ 心对电子的亲合力, 增大了 F₂⁺ 心的离解能. 从而抑制了 F₂⁺ 心的退电离 (F₂⁺ + e → F₂) 和分解 (F₂⁺ → F⁺ + F), 使 F₂⁺ 心不易漂白、退化和解体, 提高了 F₂⁺ 心的稳定性. OH⁻ 分解的另一产物间隙原子 H_i⁰, 在晶体中则起电子陷阱作用^[6]. 它能捕获一个电子, 与 F⁺ 心结合形成稳定的 U 心, 即



减少了 F₂⁺ 心与电子结合的可能性, 提高了 F₂⁺ 心的稳定性.

在晶格中, O²⁻-F⁺ 以 <110> 方向占据两个 Cl⁻ 离子空位, 在库仑力和晶格力的作用下不易迁移和滚动. 减少了 F₂⁺ 心与其它点缺陷复合、聚合的可能性, 起着空间陷阱的作用, 提高了 F₂⁺ 心的稳定性.

经室温转型形成 (F₂⁺)_{H1} 心, 再经低温转型则形成 (F₂⁺)_{H2} 心. (F₂⁺)_{H1}、(F₂⁺)_{H2} 是 (F₂⁺)_H 心的两种不同组态^[7]. 两者的光谱性质如图 1、图 2 所示相差甚小. 实验表明, (F₂⁺)_{H1} 在室温避光下可长期稳定, 但对 F 带光却是不稳定的. 而 (F₂⁺)_{H2} 心当温度 T ≥ -80°C 时, 不须光条件即转化为 (F₂⁺)_{H1} 心, 是热不稳定的.

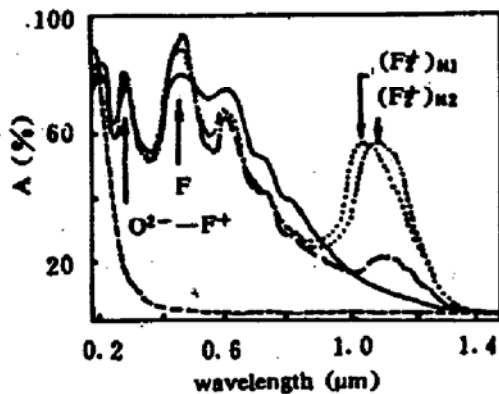


Fig. 1 Absorption spectra of NaCl(OH⁻):(F₂⁺)_H crystal at 77 K

---- before coloration — after additional coloration
 - · - · - after quenching · · · · · after light aggregation

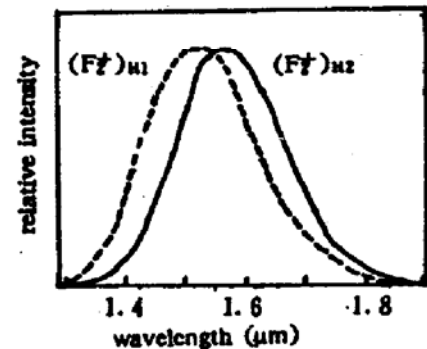


Fig. 2 Emission of (F₂⁺)_H centers (excited by 1.08 μm Nd:YAP laser light)

为了不使色心激光输出衰减, F₂⁺ 型色心激光运转一般需有 F 带光作辅助光. 实验中选用 (F₂⁺)_{H2} 心作为色心激光工作心.

3 影响色心激光输出的各种因素

低温 NaCl(OH⁻):(F₂⁺)_H 色心激光的实验装置如图 3 所示. 谐振腔是一个四镜折迭 X-型像散补偿腔. 其中, M₁、M₄ 为平面镜, M₂、M₃ 具有相同的曲率半径 R = 2f. 色心晶体以布儒

斯特角固定在冷指(cool finger)上,并用液氮冷却,温度维持在 80 K 左右. 实验中,晶体室必须保持一定的真空度(~ 0.1 Pa). 色心激光由 M_4 耦合输出($T = 20\%$).

影响色心激光输出的因素除上述晶体室的真空度外,还有谐振腔的特性、色心晶体厚度的选择、激光工作心的浓度和纯度、泵浦光源及其稳定性、辅助光的强度等.

3.1 谐振腔的性质

关于 X-腔的基本性质,文献[8]已作了较详细的分析和讨论. 指出,当调整量 δ ($\delta \equiv l_{23} - 2f$, 下标对应镜子编码) 取稳定区调整量极限附近值时,谐振腔的机械稳定性较佳. 实际中,为获得较好的色心激光输出质量, δ 的取值还应考虑到谐振腔的热稳定性. 采用热薄透镜模型,利用高斯模象理论^[9],得 X-腔的基模热不灵敏条件如图 4 所示. 其中,

$$P = S/f_i, \quad D = \delta/S \quad (4)$$

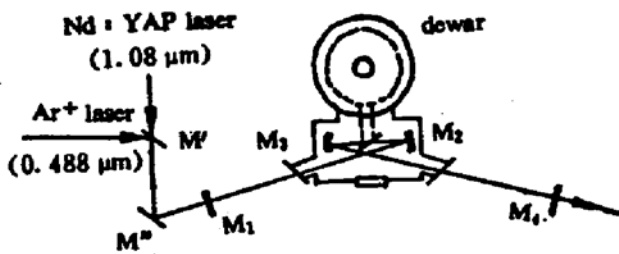


Fig. 3 Schematic view of experiment installation

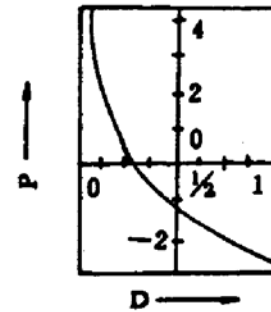


Fig. 4 Thermally stable condition for X-cavity

式中 f_i 为等效热焦距, S 为稳定区大小 $S = f^2/(l_{\max} - f)$, $l_{\max} = \max [l_{12}, l_{34}]$. 一般地,热透镜的等效热焦距很长,在几十米量级,即 $p \sim 0$. 从文献[8]、图 4 可以看出, X-腔很难在稳定区调整量取值范围内既使机械稳定性最佳又对光泵波动反应不敏感. 这就要求在实验中除选用高稳定度的泵浦源外,调整工作应极细致. 由于 X-腔容易调整,使得腔的稳定性容易达到实验要求.

色心晶体厚度的选择应满足像散补偿条件,以使子午平面内和弧矢平面内稳定区有最大的重叠. 对折迭角 $= 7^\circ$, 色心晶体厚度取为 2.5 mm.

3.2 激光工作心的浓度和纯度

激光工作心的浓度和纯度是影响色心激光输出稳定性的重要因素. 实验表明,厚度 2.5 mm 左右的 $\text{NaCl}(\text{OH}^-)$ 色心晶体当 $(F_2^+)_H$ 心的吸光度为 0.5 左右时,其色心激光输出稳定性较佳. 当 $(F_2^+)_H$ 心浓度太低时,或不能维持正常的激光振荡,或由于晶体中缺陷热平衡作用色心激光输出很快衰减. 当 $(F_2^+)_H$ 心浓度太高时,势必影响晶体的光学性质,增加色心晶体制备的难度;而 $(F_2^+)_H$ 心在缺陷平衡作用下也将衰减,从而影响色心激光的输出质量.

从 $(F_2^+)_H$ 心的形成机理(2)式看出,色心晶体中除了必须足够量的 F 心、 $\text{O}^{2-} - \text{F}^+$ 偶极子外,其它高阶聚集心应尽可能少. 高阶聚集心的存在不仅不利于 $(F_2)_H$ 心的制备,且也将影响色心激光的运转. 特别是在光泵浦波长处具有吸光性质的高阶聚集心,由于吸收泵光不但降低了色心激光的光-光转换效率,而且由此产生的热畸变也将影响色心激光的输出质量和稳定性. 在 $(F_2^+)_H$ 心的制备过程中,需尽可能消除不利于色心激光振荡的其它各种高阶聚集心.

4 实验结果与分析

用 44 W 型平面光栅单色仪测得 $\text{NaCl}(\text{OH}^-):(\text{F}_2^+)_\text{H}$ 宽带色心激光的输出波形如图 5 所示. 其输出功率与泵浦光功率如图 6 所示. 斜线效率 5.6%, 泵浦阈值功率 450 mW. 泵浦功率在 2~5 W 间, 色心激光的输出波动较小 (<5%). 泵浦功率小于 2 W 或大于 5 W 时, 输出波动较大. 前者主要受泵浦激光稳定性的影响, 后者则主要受色心晶体损伤等影响.

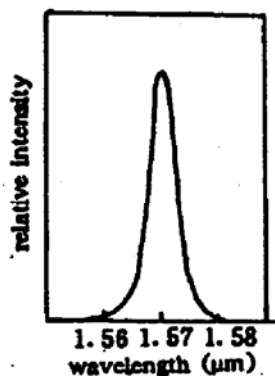


Fig. 5 Wave shape of broad color center laser output

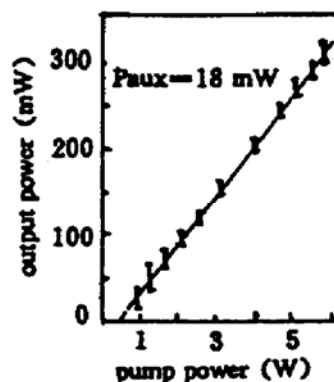


Fig. 6 The relation between output power of color center laser and power of pump laser

$(\text{F}_2^+)_\text{H}$ 色心激光运转需要有辅助光的作用. 图 7 给出了色心激光输出与辅助光强度的关系. 色心激光输出强烈依赖于辅助光的强度并很快出现饱和现象. 在出现饱和以前, 色心激光输出波动较大, 饱和后输出波动较小. 尽管辅助光功率只要大于 8 mW, 色心激光输出就出现饱和现象, 但却是 $\text{NaCl}(\text{OH}^-):(\text{F}_2^+)_\text{H}$ 色心激光稳定运转所必需的. 没有辅助光的作用, 色心激光输出将很快衰减. 目前, 对辅助光作用的物理机制尚待进一步研究. 一般认为^[10], 辅助光的作用是使色心重取向抵消激光工作心由于光热作用所产生的色心轴翻转, 保证晶体中有足够大的激活心浓度以维持色心激光的稳定运转.

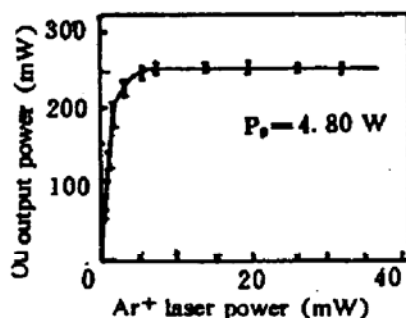


Fig. 7 The relation between output power of color center laser and the power of auxiliary light

经六小时的连续运转和一个多月的重复运转, $\text{NaCl}(\text{OH}^-):(\text{F}_2^+)_\text{H}$ 色心激光均能稳定、无衰减地运行. 这一实验结果表明, $(\text{F}_2^+)_\text{H}$ 心具有良好的稳定性和重现性.

结 语 在色心的形成过程中, OH^- 分解成 $\text{O}^{2-}-\text{F}^+$ 偶极子和 H^0 间隙原子, 起着空间陷阱和电子陷阱作用. 由于受 O^{2-} 的扰动, $(\text{F}_2^+)_\text{H}$ 心具有较低的电子亲和力和较大的离解能, 使 F_2^+ 心的稳定性得到有效的提高.

X-腔内具有较小的束腰半径 ($w_0 \sim 35 \mu\text{m}$), 满足了色心激光运转的需要. 由于调整方便, 而在实际中常被采用. 本文在系统分析影响色心激光输出的各种因素(谐振腔的性质、激光工作心的浓度和纯度、辅助光的强度等)的基础上, 利用纵向同轴泵浦, 获得了峰值波长 $1.57 \mu\text{m}$ 、阈值功率 450 mW、斜线效率 5.6% 的低温宽带 $\text{NaCl}(\text{OH}^-):(\text{F}_2^+)_\text{H}$ 色心激光的稳定输出.

我所潘子龙、刘新民和中国计量科学院的沈乃澄、张学斌等同志参加了部分工作，作者谨表谢意。

参 考 文 献

- [1] C. R. Pollock, Optical properties of laser-active color centers. *J. Lumin.*, 1986, **35**(1): 65~78
 [2] 许承晃, 掺杂碱卤晶体中的类 F_2^+ 型色心. 华侨大学学报. 1990, **11**(3): 209~221
 [3] C. R. Pollock, J. F. Pinto, E. Georgiou, Recent progress in color lasers. *Appl. Phys.*, 1989, **B48**(2): 287~292
 [4] 吴季怀, 许承晃, 邱继展等, $\text{NaCl}(\text{OH}^-):(\text{F}_2^+)_H$ 色心激光晶体. 华侨大学学报, 1990, **11**(3): 222~228
 [5] 黄妙良, 许承晃, 林碧洲等, $\text{NaCl}(\text{OH}^-):(\text{F}_2^+)_H$ 色心激光的研究. 激光技术, 1992, **16**(3): 151~154
 [6] 徐荣甫, 刘敬海, 激光器件与技术教程. 北京: 北京工业学院出版社, 1986, 114~116
 [7] D. Wand, W. Gellermann, F. Luty, Tunable cw laser operation in the 1.45~2.16 μm range based on F_2^+ -like centers in O_2^- doped NaCl KCl and KBr crystals. *J. Appl. Phys.*, 1987, **61**(3): 864~869
 [8] 林碧洲, 黄妙良, 许承晃, 连续色心激光器 X-腔的分析. 激光杂志, 1992, **13**(2): 81~84
 [9] H. Kogelnik, Imaging of optical mode-resonators with interal lenses. *B. S. T. J.*, 1965, **44**(3): 455~494
 [10] E. Georgiou, J. F. Pinto, C. R. Pollock, Optical properties and formation of oxygen-perturbed F_2^+ color center in NaCl. *Phys. Rev.*, 1987, **35**(14): 7636~7645

Experimental Study of Broad $\text{NaCl}(\text{OH}^-):(\text{F}_2^+)_H$ Color Center Laser at low Temperature

Lin Bizhou Xu Chenguang Wu Jihuai Huang Miaoliang
 Qiu Jizhan Lin Jianmieng

(Institute of Material Physical Chemistry, Huaqiao University, Quanzhou 362011)

(Received 23 March 1993; revised 12 May 1993)

Abstract Doping OH^- -ions into NaCl crystal can improve the stability of F_2^+ color center efficiently. Based on X-shaped 4-mirror folded resonator, a cryogenic broad $\text{NaCl}(\text{OH}^-):(\text{F}_2^+)_H$ color center laser with 1.57 μm peak wavelength and over 250 mW output has been achieved. In the paper, the stability effect of OH^- -ions on F_2^+ centers is discussed and the influential factors on color center laser oscillations are analysed.

Key words color center, color center laser, stability.