

高功率可调谐连续 $\text{NaCl} : (\text{F}_2^+)_\text{H}$ 色心激光器

张贵芬

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 报道了掺硫和掺氧 $\text{NaCl} : (\text{F}_2^+)_\text{H}$ 色心激光器的最新实验结果. 最高输出功率分别达 3 W 和 4.8 W. 实验比较了掺硫及掺氧 $(\text{F}_2^+)_\text{H}$ 心的热光稳定性.

关键词 $(\text{F}_2^+)_\text{H}$ 心, 色心激光器.

1 引 言

掺氧 NaCl 晶体中形成 $(\text{F}_2^+)_\text{H}$ 心的发现, 使色心激光取得了突破性的进展^[1]. 低温连续工作数百小时未发现色心退色现象. 激光输出功率达到 W 级水平. 用附加腔锁模技术, 激光脉宽已压缩到 75 fs. 调谐范围从 1.4 μm 到 1.76 μm . 激光峰值波长正处在光纤的透明区, 对光纤通讯、孤子激光的产生及窄带半导体动力学过程的研究具有重要意义.

$(\text{F}_2^+)_\text{H}$ 心中的角标 H 表示 F_2^+ 心束缚在二价负离子杂质处, 如 O^{--} 及 S^{--} 离子等. 这里氧离子一方面作为电子陷阱捕获多余电子, 防止 F_2^+ 心俘获电子变成 F_2 心. 另一方面又以更强的库伦力从空间上束缚 F_2^+ 心, 防止光泵引起色心轴再定向过程而导致 F_2^+ 心的消失. 掺氧的成功启发人们利用掺杂同族其它元素(S, Se 和 Te)来进一步改善 F_2^+ 心的稳定性. 掺硫 NaCl 晶体中 $(\text{F}_2^+)_\text{H}$ 心的光谱实验数据表明, 色心的热光稳定性有了新的提高, 并有可能过渡到室温下工作^[2]. 为清楚起见, 下面将掺硫和掺氧的 $(\text{F}_2^+)_\text{H}$ 心分别表示为 $\text{F}_2^+ : \text{S}^{--}$ 和 $\text{F}_2^+ : \text{O}^{--}$ 心.

本文简短报道 NaCl 晶体中 $\text{F}_2^+ : \text{S}^{--}$ 和 $\text{F}_2^+ : \text{O}^{--}$ 心热光稳定性对比及最新的激光实验结果. $\text{F}_2^+ : \text{S}^{--}$ 心激光功率已达到了 3 W, $\text{F}_2^+ : \text{O}^{--}$ 心最高为 4.8 W.

2 色心晶体的制备

为获得高功率激光输出, 首先要生长出掺杂均匀高光学质量的晶体. 其次通过适当的着色及热光处理, 使该晶体具有高色心密度和激光振荡波长处低吸收损耗使. 晶体生长采用提拉法. 原料用高纯度 NaCl 掺进 Na_2S 和 NaOH 粉末, 均匀混合在一起. 掺杂浓度在 50~100 ppm. 晶体在氩气氛中生长. 对长成的晶体, 选取优质部位切割成 $(6 \times 8 \times 10)$ mm^3 晶体块, 放入钠蒸气热管炉内进行附加着色. 炉温为 700°C, 钠蒸气压为 6.7×10^3 Pa, 着色时间为 2

~3 小时. 着色后晶体在降温过程中生成大量胶质粒子和高聚集心, 晶体呈兰色. 经多次淬火消除这些有害的胶质粒子并使聚集心分解成 F 心. 淬火方法是将晶体加热到 650°C, 保温 5 分钟左右, 然后把晶体温度突然降到室温. 高温下聚集心分解成 F 心, 突然降温使 F 心冻结下来, 来不及聚集. 淬火后的晶体四周变白, 内部呈黄色. 此时晶体中含有大量的 F 心. 对晶体进行研磨抛光后, 室温下用汞灯紫外光照射 20 min 左右, 即形成 $(F_2^+)_H$ 心的 a 组态. 晶体

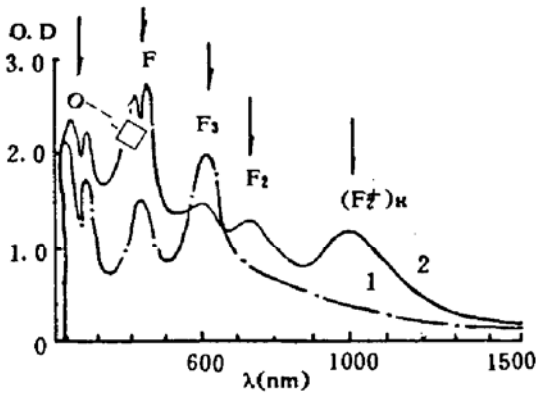


Fig. 1 Absorption spectrum of NaCl color center crystal. Curve 1: After queching. Curve 2: After aggregation

呈橄榄绿色. 降温到 77 K, 色心吸收峰在 1.05 μm , 荧光峰在 1.49 μm . 在 77 K 下用汞灯再照 5 min, 形成 $(F_2^+)_H$ 心的 b 组态, 相应于 O^{--} 离子、空位和 F 心三基元的最紧密结构. 此时色心吸收峰红移到 1.08 μm , 荧光峰移到 1.55 μm . $F_2^+ : S^{--}$ 心和 $F_2^+ : O^{--}$ 心的波长稍有差异^[2]. 图 1 为掺氧 NaCl 晶体的色心吸收谱. 淬火后 230 nm 和 290 nm 吸收峰相应于 $O^{--}-\square$ 的吸收. 450 nm 和 610 nm 吸收带相应于 F 心和 F_3 的吸收. 汞灯照射后, F_3 心减少, F_2 心和 $(F_2^+)_H$ 心出现. 室温下吸收峰处于 720 nm 和 1.0 μm 处. 汞灯光照也使 F_3 心分解成 F_2 心和 F 心, F 心和 $O^{--}-\square$ 结合成 $(F_2^+)_H$ 心. 淬火同时消除了胶质粒子, 降低了激光波长 (1.55 μm) 和光泵波长 (1.06

μm) 上的无用吸收, 有利于提高激光转换效率. 处理好的晶体在 1.5 μm 处的透过率高达 90% 以上.

3 实验装置和结果

首先测量了 $F_2^+ : S^{--}$ 和 $F_2^+ : O^{--}$ 心在室温下的热光稳定性. 其方法是逐天测量色心晶体的吸收谱. 光密度的变化代表了色心密度的变化. 热稳定性是将晶体避光保存, 测量色心随时间的衰变速率. 所得结果是 $F_2^+ : S^{--}$ 心半衰期为 20 天左右, $F_2^+ : O^{--}$ 心半衰期为 12 天左右. 此结果和文献[2]中的计算结果大致相同. 光稳定性是将晶体暴露在自然光中, 用同样方法测色心衰变过程. 测得结果是 $F_2^+ : S^{--}$ 心半衰期为 50~60 小时, $F_2^+ : O^{--}$ 心为 30 小时左右. 为了比较起见, 也测量了纯 NaCl 中 F_2^+ 心的半衰期, 大约是 2~3 hr. 这说明掺杂确实改善了色心稳定性, 而掺硫的效果比掺氧更好.

为了提高色心激光输出功率, 实验采用了二条措施. 一是把晶体温度降到 40~50K 之间, 二是采用线型三镜腔代替传统的折迭腔. 线型腔扩大了晶体的利用体积, 且更易于调整. 晶体长度加大到 10 mm 以上. 实验装置如图 2 所示. 泵浦源为连续 Nd:YAG 激光器, 最高输出功率 20W. L_1, L_2 和 F 为聚焦透镜组. M_1 为双色镜, 1.06 μm 光高透, 1.55 μm 高反. 透镜 F_0 对 1.55 μm 光增透, 焦距为 f_0 . 色心晶体端面未镀增透膜. M_2 为输出耦合镜, 在 1.55 μm 处透过率为 20% 及 50% 二种. 由 M_1, F_0 和 M_2 组成三镜线型腔, 其稳定区范围 $2S = \delta = f_0^2/d_2 \approx 18.2 \text{ mm}$. d_1 选在稳定区中心处, 光斑尺寸近似为 $\omega_{01} = f_0(\lambda/2\pi d_1)^{1/2}$, $\omega_{02} = (d_2\lambda/\pi)^{1/2}$ ^[3]. 式中 λ 为真空中波长. 本实验中 $\omega_{01} \approx 96 \mu\text{m}$, 较之常用折迭腔的斑点尺寸扩大了约 4 倍, 这是

增加输出功率的重要因素. 激光输出对 d_1 的小量变化不敏感. 调整透镜 L_1 和 L_2 使泵浦光斑尺寸和激光模斑尺寸有最佳匹配, 保证有最大转换效率. 调谐棱镜(图中未画出)放置在靠近输出镜 M_2 处并与光轴成布儒斯特角. 色心激光运转时, 用 Hg-Xe 灯做辅助光源, 经透镜 L_3 会聚在晶体侧面上.

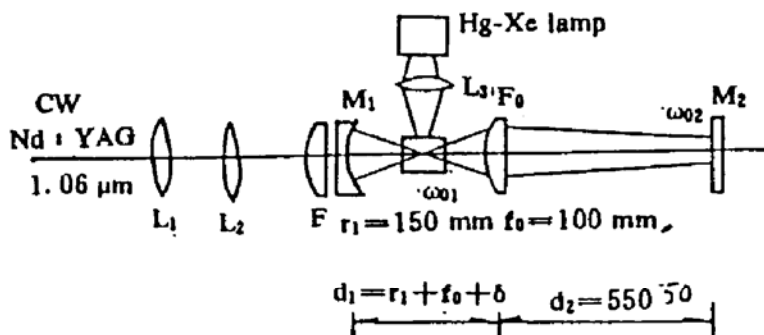


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

图 3 为 $\text{F}_2^-:\text{S}^{2-}$ 心激光输出特性曲线. 最大输出功率达到 3 W, 单横模振荡. 图 4 为调谐曲线, 调谐范围从 1.43 μm 到 1.76 μm . 调谐范围受到输出镜反射率特性的限制, 在长波和短波边缘, 镜子反射率迅速下降. 对 $\text{F}_2^-:\text{O}^{2-}$ 心, 用 K^+ 离子激光作辅助光源时, 最大输出达到 4.8 W.

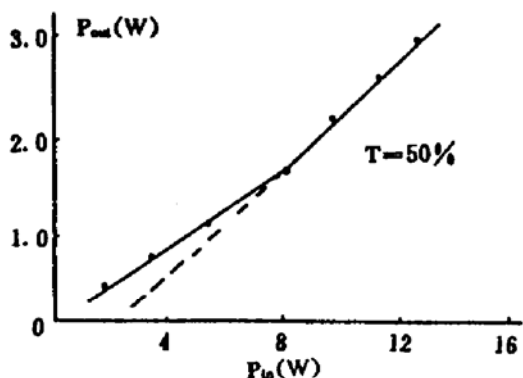


Fig. 3 Output/input power characteristics for $\text{F}_2^-:\text{S}^{2-}$ laser in NaCl

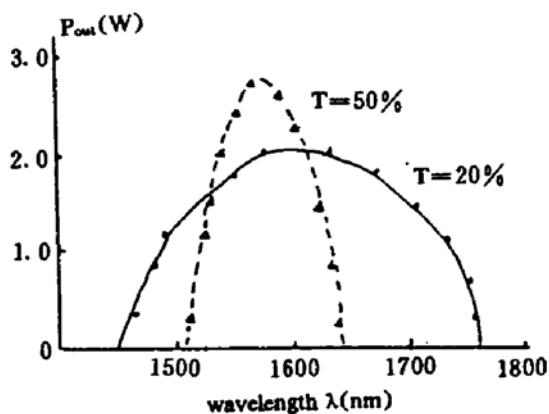


Fig. 4 Tuning curves of $\text{F}_2^-:\text{S}^{2-}$ lasers

在实验过程中从未发现色心退色现象, 说明 $(\text{F}_2^-)_\text{H}$ 心是很稳定的. 对 $\text{F}_2^-:\text{O}^{2-}$ 心, 激光工作时须用辅助光. 关闭辅助光, 激光输出在几分钟内下降 30% 左右. 打开辅助光, 激光输出恢复到原来水平. 因为泵浦光不是线偏振光, 所以激光不会停止振荡. 打开辅助光能使激光恢复到原来功率, 说明光泵引起色心轴的再定向, 但没有远离氧离子, $\text{NaCl}:(\text{F}_2^-)_\text{H}$ 心没消失. 对 $\text{F}_2^-:\text{S}^{2-}$ 心, 关闭辅助光 2 hr 内, 未发现激光功率下降. 这表明硫离子对 F_2^- 心有更强的束缚力. 这和室温下 $\text{F}_2^-:\text{S}^{2-}$ 心有更好的热光稳定性的结果是一致的. 可以期望, 掺杂硒及碲会给 F_2^- 心带来更好的结果.

本工作是受法国 C. I. E. S 资助, 在岗大学原子光谱实验室完成的. 作者对 J. Margerie 教授和 J. L. Doualan 博士给予的支持和帮助表示感谢.

参 考 文 献

- [1] J. F. Pinto, E. Georgiou, C. R. Pollock, Stable color-center laser in OH-doped NaCl operating in the 1.41~1.81 μm region. *Opt. Lett.*, 1986, 11(8): 519~521
- [2] Y. Suzuki, Optical and thermal properties of sulfur-perturbed F_2^+ centers in NaCl as the laser active centers. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1992, 31: 809~815
- [3] L. F. Mollenauer, M. L. Stitch, M. Bass, *Laser Handbook*, edited by M. L. Stitch, M. Bass, North-Holland, Amsterdam, 1985: 190~194

High-Power Tunable CW NaCl : $(F_2^+)_H$ Color Center Lasers

Zhang Guifen

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 16 July 1993; revised 26 August 1993)

Abstract The recent experimental results of $(F_2^+)_H$ color center laser are reported in NaCl crystal doped with sulfur and oxygen ions. The maximum power of 3 W and 4.8 W has been obtained with $F_2^+ : S^{--}$ and $F_2^+ : O^{--}$ centers respectively. The thermal and optical stability of $F_2^+ : S^{--}$ and $F_2^+ : O^{--}$ centers compared experimentally.

Key words $(F_2^+)_H$ centers, color center laser.