

LD 泵浦 Nd:YVO₄ 晶体 LBO 临界相位匹配倍频 671nm 激光器^①郑 权^② 檀慧明 赵 岭* 钱龙生

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130022)

(*中国科学院上海光学精密机械研究所 上海 201800)

摘要 报道了国产 LD 泵浦 Nd:YVO₄ 晶体,首次用临界相位匹配方式 LBO 腔内倍频实现了高效率的 671nm 红激光输出。当注入泵浦功率为 800mW 时,用 II 类临界相位匹配 LBO 倍频,红激光基模输出 52mW,光-光转换效率达 6.5%;用 I 类临界相位匹配 LBO 倍频,红激光基模输出 97mW,光-光转换效率达 12.1%。

关键词 LD 泵浦, Nd:YVO₄, LBO, 临界相位匹配, 红激光

0 引言

众所周知, Nd:YVO₄ 中的 Nd³⁺ 离子除了 1.064μm 的受激辐射跃迁外,还可产生 1.342μm 波段的弱辐射。Nd³⁺ 离子在 YVO₄ 中的掺杂浓度高,在 1.342μm 处的发射截面($6 \times 10^{-19} \text{cm}^2$)和分支比(0.24)也比较大^[1],并且偏振发射,很适合用 LD 泵浦,经腔内倍频输出波长 671nm 的红激光。

近年来,尽管红光半导体激光器已经商品化,但存在发散角大、光束质量差、线宽宽、输出波长及功率随温度漂移等缺点,仍然难以在彩色显示、腔内调制、超短脉冲等有特殊要求的领域取代 LD 泵浦的全固体红光激光器。

对于 LD 泵浦 Nd:YVO₄ 晶体、腔内倍频的红光激光器,已有一些文献报道^[2-5],其中水平较高的有:中国科学院物理研究所用 10W 的 LD 泵浦,采用了 II 类临界相位匹配 KTP 倍频,实现了 70mW 的 671nm 输出^[3];该所用 10W 的 LD 泵浦三镜折叠腔结构,采用了 I 类非临界相位匹配(NCPM 温度约 5℃)LBO 进行腔内倍频,实现了 502mW 的 671nm 输出,光-光转换效率超过 8.3%^[4];意大利研究人员用 10W 的 LD 泵浦三镜折叠腔结构,采用了 II 类

非临界相位匹配(NCPM 温度约 38℃)LBO 进行腔内倍频,实现了 430mW 的 671nm 输出^[5]。分析各种方式,用 KTP 倍频时晶体不需要进行精确的温度控制,但因走离角大,导致倍频效率低、光

斑质量差;而非临界相位匹配 LBO 虽然倍频效率高,但对温控要求十分严格,难以产业化。特别是 I 类非临界相位匹配 LBO 倍频效率虽然最高,但其匹配温度低,室温下要求环境干燥,否则晶体表面易结雾而影响器件正常工作。至于临界相位匹配下 LBO 进行腔内倍频产生 671nm 红激光,国内外尚未见文献报道。

本文从理论上分析了 LBO 在 I 类和 II 类临界相位匹配条件下进行腔内倍频的特性,并在适合产品化的简单直腔结构中获得了较高的倍频效率和良好的光束质量。

1 LBO 临界相位匹配腔内倍频特性

计算了 I 类和 II 类临界相位匹配方式下 LBO 对 1.342μm 倍频时的匹配条件和容限参数。其有效非线性系数、走离角、允许角等重要参数列于表 I。为便于同常用的 II 类临界相位匹配条件下的 KTP 作比较,表 I 中也列出了 KTP 的参数值。由表 I 可以看出,对 1.342μm 倍频时,LBO 有效非线性系数 d_{eff} 明显小于 KTP 的,但却具有走离角小、允许角大、相互作用长度长的优点。

根据由走离效应决定的倍频晶体最大作用长度 (L)公式^[6]:

$$L = 1.16\omega/\rho$$

其中, ω 为基频激光束半径, ρ 为走离角。上式表明,在走离角 ρ 很小的情况下,适当减小 ω 仍有较大的 L 值。而减小 ω ,会增加腔内经过 LBO 的基频光功率密度,从而提高倍频效率。



① 863 计划(863-307-22-51, 863-715-235-2B, 863-307-16-05)资助项目。

② 男,1973 年生,博士生;研究方向:大功率及高性能 LD 泵浦固体激光器器件与技术;联系人。

(收稿日期:2000-12-25)

表 1 3 种临界相位匹配倍频晶体参数比较

晶体	参数	转换方式 (1342-671)	匹配角 (θ, φ)	d_{eff} / $\mu\text{m}\cdot\text{V}^{-1}$	走离角 / mrad	允许角 / $\text{mrad}\cdot\text{m}$	作用长度 $L/\mu\text{m}$
LBO(I)		e-e-o	86.1°, 0°	0.817	3.45	24.29	34.1
LBO(II)		e-o-e	3.6°, 0°	0.645	3.25	26.07	35.9
KTP(II)		o-e-o	58.9°, 0°	2.84	44.3	1.69	2.6

LD 泵浦的全固体激光器结构紧凑,谐振内光腰半径很小,一般为几十至几百 μm 量级。若设 $\omega = 100\mu\text{m}$,则可计算出对应的基频光波在各晶体中的相互作用长度值(见表 1)。考虑到内腔倍频时倍频光输出功率与有效非线性系数 d_{eff} 和晶体作用长度 L 的乘积平方成正比,对表 1 中 d_{eff} 与 L 相乘,可知 LBO(I) 对应的值最大,为 27.86; LBO(II) 其次,为 23.16; 而 KTP 仅为 7.38。因此,使用 LBO 临界匹配方式远优于 KTP。

综上所述,虽然 LBO 的有效非线性系数较小,但其倍频时走离角小、允许角大,有效工作区长,综合倍频效果将远高于 KTP。可以通过选用较长的 LBO,优化设计出相对小的光腰尺寸来获得较高的倍频转换效率。

2 实验装置

通过计算机编程对谐振腔参数进行优化设计,实验装置如图 1 所示。

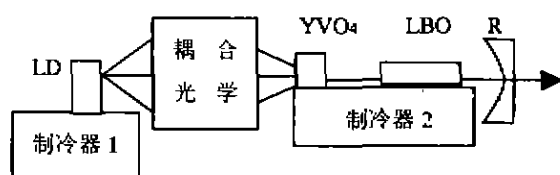


图 1 实验装置

采用中国科学院半导体所提供的 1W 国产 LD 泵浦,23℃ 下其中心发射波长为 806.4nm,发散角为 $7.2 \times 33.6\text{deg}^2$ 。LD 发出的光经过耦合光学系统的准直、扩束、聚焦,最终成为椭圆度约为 0.88,束腰半径约 $90\mu\text{m}$ 的高质量泵浦光,入射到 Nd:YVO₄ (厚 1.3mm,掺杂 3.0at.%) 上。由于侧重考虑了提高泵浦光斑的质量,耦合系统的传输效率较低,约为 85%。

Nd:YVO₄ 受激发射时 $1.064\mu\text{m}$ 比 $1.342\mu\text{m}$ 的发射截面大,因此若想获得 $1.342\mu\text{m}$ 的激光振荡,必须首先抑制 $1.064\mu\text{m}$ 起振。理论计算表明,

在谐振腔对 $1.064\mu\text{m}$ 的透过率大于 90% 时,可以确保在相当高的泵浦功率下也只有 $1.342\mu\text{m}$ 形成激光振荡。同时,合理地分配谐振腔内各元件对 808nm、 $1.064\mu\text{m}$ 、 $1.342\mu\text{m}$ 以及倍频产生的 671nm 的透射率和反射率要求是很重要的,直接影响着激光器的总体效率。

Nd:YVO₄ 的左端面镀 808nm 增透和 $1.342\mu\text{m}$ 高反膜作为一个腔镜,右端面镀 $1.342\mu\text{m}$ 增透膜;输出平凹镜 R 凹面曲率半径为 50mm,凹面镀 $1.342\mu\text{m}$ 高反膜和 $671\text{nm}/1.064\mu\text{m}$ 增透膜,平面镀 671nm 增透膜;倍频晶体 LBO ($2\text{mm} \times 2\text{mm} \times 10\text{mm}$),两端均镀 $1.342\mu\text{m}/671\text{nm}$ 双色增透膜。在各镀膜要求相互冲突时,侧重满足了 $1.342\mu\text{m}$ 的要求。谐振腔长约 30mm,机械结构稳定,抗震动。

LD、Nd:YVO₄ 和 LBO 用半导体制冷器进行严格的温控。调节制冷器 1 的电流,控制 LD 的温度,使其发光波长与 Nd³⁺ 离子的吸收峰重合,以最大限度地吸收和利用泵浦能量。YVO₄ 与 LBO 共用一个制冷器 2 温控,减少 YVO₄ 的热效应,防止 LBO 晶体最佳匹配角随温度变化。两制冷器的温控精度为 0.02℃。

3 实验结果

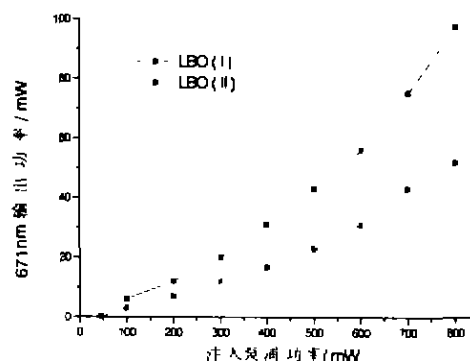


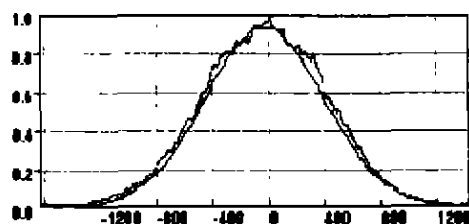
图 2 671nm 输出功率与泵浦注入功率的关系

在同样实验装置中分别用 I 类和 II 类临界相

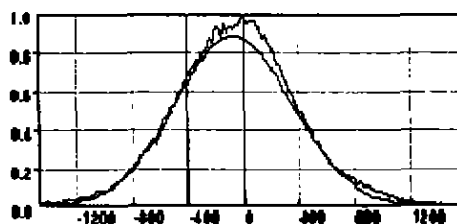
位匹配 LBO 进行了 1342 ~ 671nm 的倍频实验,取得了很好的实验结果。先用滤光片滤去 808nm 和 1.342 μ m 的光干扰,测量了 671nm 红激光输出随注入泵浦功率的变化情况。图 2 给出了 671nm 输出功率随注入泵浦功率的函数曲线图。

图 2 表明,两种情况下泵浦阈值功率相差不大,均约为 40mW,但之后使用 I 类临界相位匹配 LBO 实现 1342 ~ 671nm 转换时,倍频效率明显高于 II 类。这主要是因为 I 类匹配(e+e-o 方式)下具有双

折射效应的 LBO 晶体不会影响基频光的线偏振方向,从而使最佳匹配角度有保证,倍频效率高。当入射至 YVO₄ 上的泵浦功率为 800mW 时,用 II 类临界相位匹配 LBO 倍频,红激光输出 52mW,光-光转换效率达 6.5%;用 I 类临界相位匹配 LBO 倍频红激光输出 97mW,光-光转换效率达 12.1%。图 3 给出了用 Photon 公司生产的光束轮廓仪测量的红激光远场光斑的能量分布图,说明均为基横模(TEM₀₀)输出。



(a) I 类临界相位匹配



(b) II 类临界相位匹配

图 3 红激光远场光斑能量分布图

为了研究 LBO 温度对激光器输出功率的影响,调节 LBO 的温控电流,考查 LBO 在不同温度下 671nm 输出功率的波动情况。图 4 给出了两种匹配类型下 671nm 输出功率随 LBO 温控的变化曲线图(图中横坐标为 LBO 夹具上的热敏电阻值)。

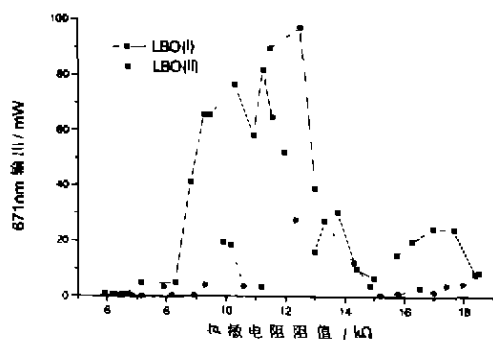


图 4 671nm 输出功率随 LBO 温度(热敏电阻值)的变化

图 4 表明,对于 LBO 相位匹配时的温度特性, I 类明显优于 II 类。使用 I 类 LBO,图 4 曲线表明,半最大全宽达到 4k Ω ,对应温度范围约为 10 $^{\circ}$ C,与理论计算结果接近^[7],而且可在 11 ~ 12k Ω 区域找到功率变化较小的低值极值点,十分有利于激光器的稳定运转;使用 II 类相位匹配时则不然,出现高值功率的温度范围小,大约只有 1.5k Ω ,而且对应两个极值点的功率差值很大,不利于激光器的长期稳定运转。因此, I 类比 II 类临界相位匹配的 LBO 倍

频效率高,工作稳区大。实验中, I 类匹配下激光器输出功率 70mW 时,每隔 10min 测定一点,48h 连续工作功率稳定性优于 $\pm 2\%$ 。

4 结论

本文从激光产生和倍频理论出发,分析了影响红光产生效率的主要因素,对适合产品化的简单直腔结构进行了优化设计。采用国产 LD 泵浦 Nd:YVO₄ 晶体,首次用临界相位匹配方式 LBO 晶体进行 1342nm 的腔内倍频,实现了高效率的倍频红激光输出。当注入泵浦功率为 800mW 时,用 II 类临界相位匹配 LBO 倍频,红激光基模输出 52mW,光-光转换效率达 6.5%;用 I 类临界相位匹配 LBO 倍频,红激光基模输出 97mW,光-光转换效率达 12.1%。后者是目前所查文献中同等泵浦功率下输出功率和转换效率最高的。由于直腔结构只输出了一个方向的倍频光,若采用三镜折叠腔结构,输出功率还会大幅度提高。因此可以认为,采用 I 类临界相位匹配 LBO 腔内倍频是实现高效率 671nm 输出的较好选择。

参考文献:

- [1] Tucker A W, Birnbaum M, Fincher C L. *J Appl Phys.*, 1977, 48(12): 4907
- [2] 王长青,沈得元,卢建仁等. *中国激光*, 1997, 24(7): 577

- [3] 张恒利,何京良,侯玮等 中国激光, 1999, 26(6): 481
 [4] 张恒利,何京良,陈毓川等 物理学报, 1998, 47(9): 1579
 [5] Agnesi A, Reah G C, Gobbi P G *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, 34(7): 1297
 [6] Zondy J J, Abed M, Khodja S *J Opt Soc Am B*, 1994, 11(12): 2368
 [7] Kato K. *IEEE J Quantum Electron*, 1994, 30(12): 2950

LD-pumped Nd:YVO₄ Frequency-doubled by CPM LBO Laser at 671nm

Zheng Quan, Tan Huiming, Zhao Ling*, Qian Longsheng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, Changchun 130022)

(* Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS, Shanghai 201800)

Abstract

A design of LD-pumped high efficient Nd:YVO₄/LBO red laser is reported. Using critical phase-matching LBO for the first time, 671nm red laser is obtained by 1.342 μ m intracavity frequency doubling. With 800mW incident pump laser, 52mW and 97mW TEM₀₀ mode red laser output are obtained by II-typed and I-typed LBO. The optical-to-optical conversions are up to 6.5% and 12.1% respectively.

Key words: LD-pumped, Nd:YVO₄, LBO, Critical phase-matching, Red laser

(上接第 23 页)

- [18] 林敏,尤崇构.核农学报 1987, 1: 1
 [19] Folsom B R, Chapman P J *Appl Environ Microbiol*, 1990, 56: 1279
 [20] Fannche C, Elmersh C. *FEMS Microbiol. Lett*, 1981, 10: 199
 [21] Wang K W, Baltzig B C, Cewandonski G A. *Biotechnology and Bioengineering*, 1996, 51(1): 87
 [22] 伊萍,杨彦希,杨惠芳.环境科学, 1997, 18(1): 10
 [23] 陈明.芳香族降解菌的分离及废水模拟生物处理 [学位论文]中国农业科学院研究生院, 2001
 [24] Yeh W K, Ornston L N. *Pro Natl Acad Sci USA*, 1980, 143: 5365

Characteristics Degradation of Phenol by *Pseudomonas* sp. phen8 and Screen of Its Mutants

Xiang Shurong, Lin Min*

(Lanzhou Institute of Animal and Vet Pharm Science CAAS, Lanzhou, Gansu 730050)

(* Institution of atomic energy for application, CAAS, Beijing 100094)

Abstracts

Characteristics of biodegradation of phenol by *Pseudomonas* sp. phen8 were examined with respect to substrate utilization, influence of glucose. Four mutants deleting the function of phenol-degrading were screened. The study shows that glucose added to the medium promotes cell growth and decreases the degradation of phenol. Additionally, cell growth and the degradation are enhanced by elevated phenol concentration within 0 ~ 7mmol/L and inhibited by that above 7mmol/L. Because the mutants deleting the capability of phenol-degrading were selected by Tn5 insertion into the chromosome in *Pseudomonas* sp. phen8, the basic work was conducted for the future study on gene location, clone and regulation of gene expression.

Key words: Biodegradation, Phenol, *Pseudomonas* sp, Mutant