

半导体激光二极管泵浦双偏振四波长 掺钕钒酸钇薄片激光¹

许惠英

蔡志平

(厦门大学电子工程系 厦门 361005)

(厦门大学物理学系 厦门 361005)

摘要 报道了半导体激光二极管泵浦四波长同时激射的双偏振 c 轴切割掺钕钒酸钇薄片激光器件. 激光器的起振为 11 mW, 光-光转换效率大于 26.5%, 在 40 mW 的 LD 泵浦下输出 12 mW 的 1.06 μm 激光总功率. 同时, 研究该激光晶体结构及其薄片晶体的 $^4F_{3/2}$ $^4I_{11/2}$ 跃迁荧光发射光谱, 阐明多波长同时激射与双偏振产生的物理机制.

关键词 双偏振, 四波长薄片激光器, c 轴切割掺钕钒酸钇

中国图书分类号 TN 248

多波长同时激射激光器在未来波分复用等多路高速、大容量光通信和大气与海洋信息传输等领域具有广泛应用前景, 因此, 引起了许多国家的研究人员重视. Danailov 等人在 Nd:YAG 晶体中实现了 1.06 μm 附近的四波长同时激射脉冲激光运行^[1], 但是其起振阈值高、效率较低, 而且还需要两对色散棱镜和角度调整等复杂的腔体组合, 不利于实际应用. 为了获得小型高效的激光二极管(LD)泵浦多波长同时激射的连续激光器, 我们采用新型的 c 轴切割 Nd:YVO₄ 薄片激光晶体, 利用简单平凹腔优化技术, 已实现了 1.06 μm 附近的三波长同时激射的连续激光运转^[2], 不仅阈值低, 效率较高, 而且输出激光呈双偏振. 本文在文献[2]工作的基础上, 详尽地研究激光晶体的光谱分布, 改善激光腔体条件, 进一步探索该激光器的多波长同时激射及其偏振行为.

1 激光晶体薄片与发射光谱

实验中所用的 Nd:YVO₄ 薄片激光晶体系福建物质结构研究所按我们设计要求, 采用 Czochralski 向下提拉法沿 c 轴生长而成的, Nd³⁺ 离子掺杂浓度为 1at.%, 沿 c 轴切割成截面为 3 mm \times 3 mm、厚度为 0.5 mm 的薄片样品(ab 光轴平行于截面, 即所谓 c 切割). 用 HeNe 激光器直接照射, 未见明显的散射中心存在(但比样品的散射中心明显, 说明晶体质量比 a 轴切割 Nd:YVO₄ 的略差).

c 轴切割 Nd:YVO₄ 薄片的晶体结构为 D_{2d} 点群对称, 由群论分析可知, 激光下能级 $^4I_{11/2}$ 在晶体场中分裂为 6 个 Stark 子能级, 而激光上能级 $^4F_{3/2}$ 则分裂为 2 个 Stark 子能级, 如图 1 所示. 为了避免因受激发射放大引起荧光发射谱的饱和失真, 首先, 发射光谱检测实验中采用

未镀膜的 Nd:YVO₄ 薄片样品,以减小样品长度,降低增益水平,同时,测试时尽量以低强度的激光泵浦,确保荧光发射运转于小信号状态.用 10 mW 的 810 nm LD 激发⁴F_{3/2}+²H_{9/2}能带,输出荧光光谱用光谱分辨率为 0.1 nm 的 ADVANTTEST 8031A 傅里叶光谱分析仪测量.这里需要指出的是,由于 LD 输出的激光是单横模线偏振激光,在固定强度泵浦光注入薄片样品之前插入一半波片以改变泵浦光的偏振取向,输出的荧光光谱由傅里叶光谱分析仪即时记录显示,结果表明,⁴F_{3/2}→⁴I_{11/2} 荧光发射光谱结构及其强度均与泵浦光的偏振取向无关.同样,固定泵浦条件,在输入光谱仪之前插入一格兰·汤姆逊棱镜,结果表明,输出的荧光光谱与偏振取向无关,这意味着 c 轴切割 Nd:YVO₄ 薄片晶体具有光学均匀性.图 2 为所测得⁴F_{3/2}→⁴I_{11/2} 跃迁的典型荧光发射光谱,从图中可见,1.066 8 μm 的强度最强,1.062 8 μm 其次,1.065 4 μm 较弱,而 1.064 8 μm 则最弱,这四条发射谱线所对应的受激发射截面绝对值已在文献[2] 给出.显然,该荧光发射光谱是多波长同时起振激光器件设计的基础,也是解释其工作机理的依据.

2 激光器设计

与 a 轴切割 Nd:YVO₄ 薄片激光晶体相比,本工作所用的 c 轴切割 Nd:YVO₄ 薄片激光晶体的受激发射截面要小 3 倍^[3,4],因此,在相同的腔体设计和泵浦条件下其激光性能(起振阈值、相应的激光转换效率)要低数倍.为了获得高性能的 LD 泵浦 c 轴切割 Nd:YVO₄ 薄片激光器件,选用高稳定的平凹腔结构.泵浦光源为 SDL-5422 型 AlGaAs 单管 LD,其主要激光性能如下:输出特性呈单横模线偏振,最大输出功率达 135 mW,将温度固定在 20℃ 以使输出激光的中心波长处于 810 nm 左右,对应于 Nd:YVO₄ 的⁴I_{9/2}→⁴F_{3/2}+²H_{9/2} 跃迁吸收峰处.薄片激光器的腔体设计如下:在输入端面上直接镀 1.064 μm 高反射(R> 99.5%)和 810 nm 增透(T= 92%) 介质膜,并作为激光器的输入腔镜.激光器的输出耦合镜是一曲率半径(ROC)为 50 mm 的凹球面镜,并镀成在 810 nm 处具有高反射(R> 99.7%)和在 1.064 μm 激光波长处的透射率 T= 4%,由此构成平凹腔.在本实验中,尽量缩短激光器腔长,且约为 2 mm.

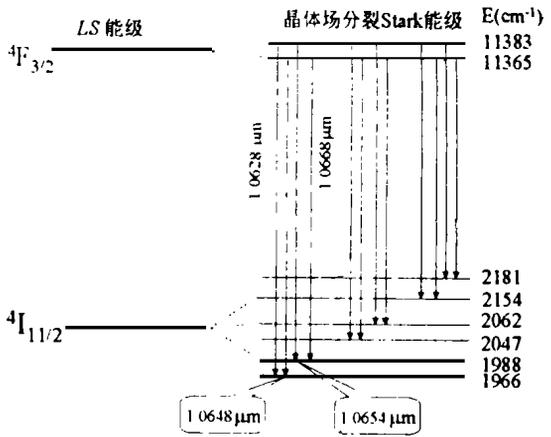


图 1 掺钕钒酸钇晶体⁴F_{3/2}→⁴I_{11/2}跃迁能级图
Fig. 1 Energy-levels for the transition ⁴F_{3/2}→⁴I_{11/2} in Nd³⁺ YVO₄ crystal

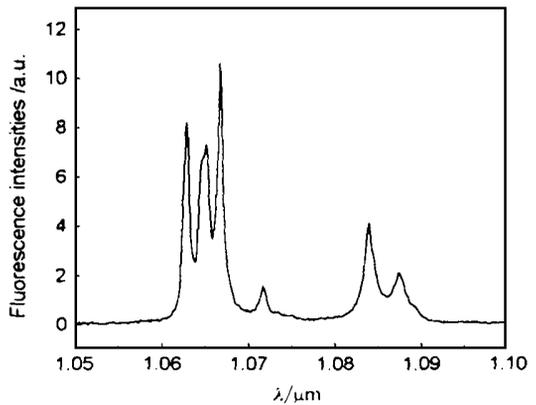


图 2 ⁴F_{3/2}→⁴I_{11/2} 荧光发射光谱
Fig. 2 Fluorescence spectrum for the transition of ⁴F_{3/2}→⁴I_{11/2}

图 3 为薄片激光输出功率随泵浦功率的输出特性曲线, 其偏振行为与文献[2]中的图 2 相同, 即沿着 a 轴方向的激光强度 P_a 比沿着 b 轴方向的 P_b 强, 而且 a 轴方向激光的起振阈值只有 11.5 mW, 略低于 b 轴方向的, 也低于文献[2]中的 13 mW. 这是因为尽管 c 轴切割 Nd:YVO₄ 薄片激光晶体属于各向同性的激光材料, 但是由于晶体在 a、b 轴方向上的应力效应不同, 这种应力引起的双折射性足以导致了激光的双偏振效应. 应当指出, 通过改变激光腔镜的位置及其倾角, 输出激光的偏振属性未改变, 从而实验证明了腔体系统的双折射性效应比薄片晶体本身的要弱. 与文献[2]不同的是, 随着吸收的泵浦功率 P_{abs} 的增大, 总的输出激光功率 P_t (即 $P_t = P_a + P_b$)、 P_a 、 P_b 都成线性增加, 而激光器总的光-光转换效率为 26.5%, 比文献[2]中的 20% 高. 当 $P_{abs} > 28$ mW 时, P_t 、 P_a 、 P_b 随着 P_{abs} 的增大而呈非线性同步增加, 而不是文献[2]中 P_a 、 P_b 呈反相增加. 这种不同性来源于本激光器的腔体设计使得激光模斑半径较小, 导致在 a、b 轴上激光的有源模体积存在一定的错位, 因此在泵浦有源区内, P_a 、 P_b 同时且充分地利用反转集居数密度, 这正是本激光器的输出性能更高的缘故.

为了进一步探究高泵浦条件下的激光输出功率的非线性增长的物理机制, 我们测量了在不同的泵浦水平下输出的激光光谱, 结果发现, 当 $P_{abs} < 18$ mW (约为阈值 P_{th} 的 1.5 倍) 时, 输出激光仅包含 $\lambda_1 = 1.0668 \mu\text{m}$ 单一波长, 如图 4 所示, 对应于 $P_{abs} = 12$ mW 时的激光光谱. 当 P_{abs} 介于 18 ~ 29 mW 之间, 输出激光工作于双波长状态, 除了第 1 条激光谱线外, 还含有另一条谱线 $\lambda_2 = 1.0654 \mu\text{m}$, $P_{abs} = 18$ mW 时所测得输出激光光谱如图 5 所示. 然而, 当 P_{abs} 达到 30 mW (约为 P_{th} 的 3 倍) 时, 位于 $\lambda_3 = 1.0628 \mu\text{m}$ 的第 3 条激光谱线开始起振, 图 6 所示为泵浦功率 $P_{abs} = 30$ mW 时所测得的典型三谱线激光光谱. 进一步增大 P_{abs} 到 37 mW 左右, 位于 $\lambda_4 = 1.0648 \mu\text{m}$ 的第 4 条激光谱线也同时激射, 图 7 所示 $P_{abs} = 38$ mW 泵浦下所测得的激光光谱. 从上述激光光谱随泵浦功率的依赖关系, 容易看出, 当泵浦功率 $P_{abs} < 30$ mW 时, 输出激光由 $1.0668 \mu\text{m}$ 的主谱线构成 (如图 5 示, 激光的第 2 谱线 $1.0654 \mu\text{m}$ 强度比主谱线 $1.0668 \mu\text{m}$ 小 20 dB 以上), 因此, 激光功率的输出-输入特性与单频激光器的相似, 呈线性增长. 在 $P_{abs} = 30$ mW 左右, 由于第 3 激光谱线 λ_3 开始起振, 而该谱线所对应的受激发射截面 σ_3 仅小于 σ_1 而大于 σ_2 和 σ_4 , 故 λ_3 激光的斜体效率较高, 此外, 由于空间烧孔效应的作用, 3 条件线激光 λ_2 、 λ_3 和 λ_4 的起振充分利用了主线激光 λ_1 在腔轴上的剩余反转粒子数, 所以偏振输出激光功率 P_1 、 P_2 和总输出功率 P_t 随 P_{abs} 增加的速率变大, 导致了图 3 中激光功率输出特性的非线性增长关系. 至于在大泵浦 ($P_{abs} > 32$ mW) 情况下激光输出特性出现的饱和行为, 因为本工作采用了紧凑模斑设计以降低薄片激光器的起振阈值, 然而, 另一方面容易引起泵浦吸收饱和效应, 导致输出激光饱和, 限制了高功率激光输出. 最后, 当泵浦功率 $P_{abs} > 36$ mW 时, 因热效

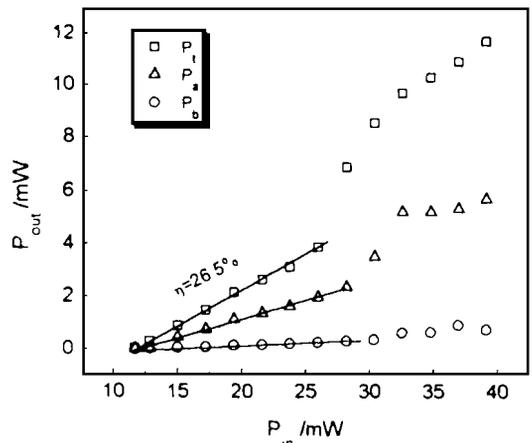


图 3 偏振激光输出特性

Fig. 3 Output characteristics for polarized laser

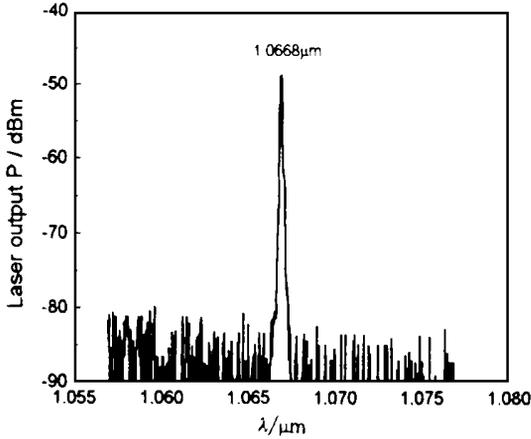


图 4 $P_{abs} = 12 \text{ mW}$ 时输出激光光谱

Fig. 4 Laser spectrum as $P_{abs} = 12 \text{ mW}$

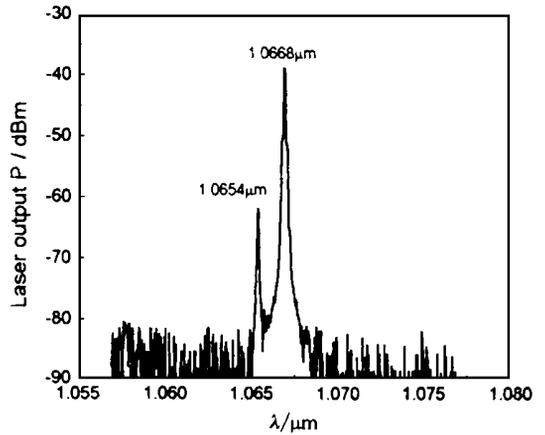


图 5 同图 4, 但 $P_{abs} = 18 \text{ mW}$

Fig. 5 The same as Fig. 4, but $P_{abs} = 18 \text{ mW}$

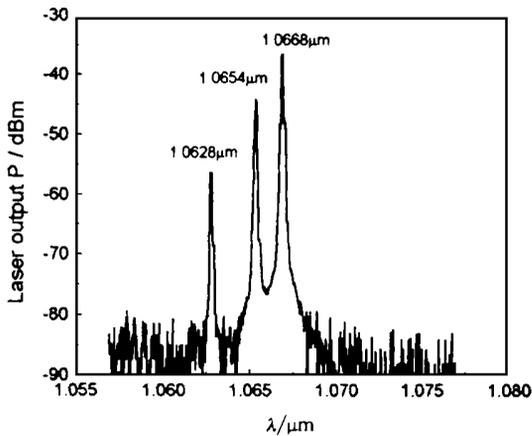


图 6 同图 4, 但 $P_{abs} = 30 \text{ mW}$

Fig. 6 The same as Fig. 4, but $P_{abs} = 30 \text{ mW}$

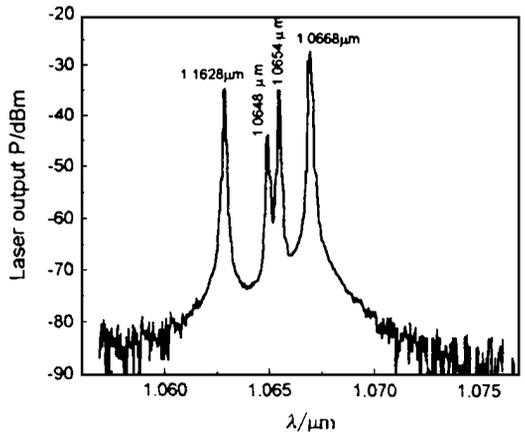


图 7 同图 4, 但 $P_{abs} = 38 \text{ mW}$

Fig. 7 The same as Fig. 4, but $P_{abs} = 38 \text{ mW}$

应等缘故使得双偏振激光模斑增大, 两模之间的耦合加强, 过渡到文献[2]中的情形, 此时, 随着 P_{abs} 的增大, 总输出激光功率 P_t 增加, P_a 也呈增加趋势, 而 P_b 则与 P_a 反相地趋于减小, 如图 3 所示, 这与低功率情形截然不同。

3 结 论

本文通过平凹腔薄片激光器的腔体调整达到控制双偏振激光模式的空间匹配状态, 在 810 nm 的 LD 泵浦下, 获得低阈值、高光-光转换效率的双偏振四波长同时起振新型的 c 轴切割 Nd:YVO₄ 薄片激光器, 在 40 mW 的 810 nm 激光泵浦下输出 12 mW 的 1.06 μm 的激光。通过对 c 轴切割 Nd:YVO₄ 薄片激光晶体的激活离子掺杂浓度和样品长度的优化设计, 在已商业化且价格便宜的 1 W 级 810 nm LD 的泵浦下可望获得 100 mW 级的双偏振四波长同时

起振 c 轴切割 Nd:YVO₄ 薄片激光器, 从而达到许多领域的应用要求.

参 考 文 献

- 1 Danailov M B, Milev I Y. Continuous multiwavelength operation of Nd:YAG laser. Appl. Phys. Lett., 1992, 61: 746 ~ 748
- 2 Cai Z P, Xu H Y, Stephan G. Bipolarization and multiwavelength diode-pumped Nd:YVO₄ microchip laser. Opt. Commun., 1997, 135: 295 ~ 299
- 3 Cai Z P, Chardon A, Sanchez F et al. Investigation of absorption saturation in diode end-pumped microchip lasers. SPIE Proc., 1996, 2 889: 70 ~ 78
- 4 蔡志平, 许惠英, Chardon A 等. 钛宝石激光端面泵浦掺钕钒酸钇薄片激光器. 厦门大学学报(自然科学版), 1997, 36(4): 548 ~ 553

Bipolarization and Four-wavelength Simultaneous Oscillation Nd³⁺:YVO₄ Microchip Laser Pumped by Diode Laser

Xu Huiying

(Dept. of Elect. Engin., Xiamen Univ., Xiamen 361005)

Cai Zhiping

(Dept. of Phys., Xiamen Univ., Xiamen 361005)

Abstract A bipolarization and four-wavelength simultaneous oscillation in a c-cut Nd:YVO₄ microchip laser pumped by diode laser is reported in this paper. A low threshold of 11 mW was obtained with an optical-optical conversion efficiency more than 26.5% for this laser, and the laser output power as much as 12 mW at 1.06 μm has been achieved under the 40 mW pumping level at 810 nm. Meanwhile, the microchip crystal structure and the fluorescence spectra originating from the transition of ⁴F_{3/2} - ⁴I_{11/2} have been studied. The laser generation mechanism with bipolarization and four-wavelength simultaneously operating has also been physically understood.

Key words Bipolarization, Four-wavelength microchip laser, c-cut Nd³⁺:YVO₄