

不同切割方向 Ho:YAP 晶体激光输出特性的 实验研究

赵开祺^{1,2,3}, 刘晶^{2,3}, 余婷^{2,3*}, 孟佳^{1,2,3}, 司继良⁴, 施翔春^{2,3}, 叶锡生^{2,3}, 曹清^{1**}

¹上海大学理学院, 上海 200444;

²中国科学院上海光学精密机械研究所高功率光纤激光技术实验室, 上海 201800;

³中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800;

⁴中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800

摘要 不同切割方向的 Ho:YAP 晶体的激光输出特性存在差别。针对掺杂浓度为 0.5% (原子数分数) 的 Ho:YAP 晶体开展 a、b、c 三种切割方向的激光输出特性实验研究。采用最大输出功率为 44.3 W 的 1915 nm 掺铥光纤激光器端面泵浦 Ho:YAP 晶体, 在三种切割方向上均获得了大于 20 W 的连续激光输出, 其中 b 向切割晶体输出激光的中心波长近 2118 nm, 最大功率为 23.6 W, 斜率效率为 61.98%, a 向切割晶体与 b 向切割晶体的输出结果相近, c 向切割晶体在达到最大输出功率时的中心波长为 2129 nm; 当采用腔内声光调 Q 获得脉冲输出时, a、c 向切割晶体出现了中心波长偏移和多波长起振现象, 而 b 向切割晶体则获得了中心波长近 2118 nm 的稳定脉冲输出, 且其在重复频率为 20 kHz 时的最大平均输出功率为 22.3 W, 脉宽为 20 ns, 斜率效率为 55.22%, 光束质量因子分别为 $M_x^2 = 1.81$ 和 $M_y^2 = 1.50$ 。选用 b 向切割的 Ho:YAP 晶体更有利于实现稳定且高效的 2118 nm 连续激光及纳秒级脉冲激光输出。

关键词 材料; Ho:YAP 晶体; 输出特性; 切割方向; 2 μm 激光

中图分类号 TN248

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0403004

Experimental Investigation of Laser Output Characteristics of Ho:YAP Crystal in Different Cutting Directions

Zhao Kaiqi^{1,2,3}, Liu Jing^{2,3}, Yu Ting^{2,3*}, Meng Jia^{1,2,3},
Si Jiliang⁴, Shi Xiangchun^{2,3}, Ye Xisheng^{2,3}, Cao Qing^{1**}

¹College of Sciences, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

²Laboratory of High Power Fiber Laser Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

³Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics
and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

⁴Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract The laser output characteristics of Ho:YAP crystal are discrepant along different cutting directions. In this study, a-cut, b-cut, and c-cut 0.5% (atomic fraction) Ho:YAP crystals were used to investigate laser output characteristics. Using a thulium-doped fiber laser with a central wavelength of 1915 nm and maximum power of 44.3 W to end pump the Ho:YAP crystal along each cutting direction, continuous-wave laser power greater than 20 W was achieved. For the b-cut crystal, the central wavelength of the output laser is close to 2118 nm and the maximum continuous-wave output power and slope efficiency are 23.6 W and 61.98%, respectively. The results for the a-cut crystal are similar to those for the b-cut crystal, but the central wavelength for the c-cut crystal is 2129 nm

收稿日期: 2019-10-29; 修回日期: 2019-12-02; 录用日期: 2019-12-12

基金项目: 预研基金(6140A24010403)

* E-mail: yuting@siom.ac.cn; ** E-mail: qcao@shu.edu.cn

when the maximum output laser power is achieved. When the Ho:YAP laser operates in an in-cavity acoustic-optical Q-switched state, central wavelength shifting and multi-wavelength resonance occur in the a-cut and c-cut crystals. However, for the b-cut crystal, a stable pulsed laser output with a central wavelength close to 2118 nm can be obtained. For a pulse repetition rate of 20 kHz, the maximum average output power, pulse width, slope efficiency, and beam quality factor are 22.3 W, 20 ns, 55.22%, $M_x^2 = 1.81$, and $M_y^2 = 1.50$, respectively. From these results, it can be concluded that the b-cut Ho:YAP crystal is more suitable for obtaining stable and efficient 2118-nm continuous-wave lasers and nanosecond-level pulsed laser output.

Key words materials; Ho:YAP crystal; output characteristics; cutting direction; 2 micron laser

OCIS codes 140.3380; 160.1190; 140.3580; 140.3070

1 引 言

短波红外激光在遥感^[1]、生物医疗^[2-3]等领域具有重要应用,其中2 μm波段高功率或大能量激光系统常被用作3~5 μm波段中红外光参量振荡器的泵浦源^[4-5]。随着技术的发展,应用1.9 μm波段激光同带泵浦掺钬(Ho)固体激光增益介质已成为目前高效产生2 μm波段激光的重要技术途径。

当前,较成熟的掺钬固体激光增益介质主要有Ho:YAG^[5-6]、Ho:YLF^[7-9]、Ho:YAP^[10-12]等。Ho:YAP晶体(Ho:YAlO₃)因属于正交晶系而具有自然双折射的特性,用作激光增益介质时输出的激光为线偏振光。该晶体在1.9~2.2 μm范围内具有丰富的发射谱线,且其热膨胀系数、热导率、吸收光谱与发射光谱等存在各向异性^[10],不同切割方向晶体的激光输出特性存在一定差别。Ho:YAP晶体基质材料YAP与YAG具有相似的物理特性,包括较高的机械强度、硬度以及较好的热传导性能^[13]。目前,随着晶体生长工艺的进步,已能获得大尺寸Ho:YAP晶块。

Ho:YAP晶体具有吸收、发射谱线丰富以及输出具有各向异性等特点,对其进行研究分析并得出能够实现稳定输出的具体的切割方向,对于输出功率的进一步提升以及泵浦实现中红外激光输出具有重要意义。目前,对不同切割方向Ho:YAP晶体的输出性能进行横向对比、评价的研究报道较少,鉴于此,本文采用掺钬光纤激光器(TDFL)分别端面泵浦a、b、c三种切割方向(a-cut、b-cut、c-cut)的Ho:YAP晶体(掺杂原子数分数为0.5%),研究了不同切割方向的晶体在2.1 μm附近的连续/调Q脉冲激光输出特性。

2 Ho:YAP晶体的吸收谱及荧光发射谱

实验中所采用的Ho:YAP晶体系中国科学院上海光学精密机械研究所自研的。首先测试晶体的吸

收谱与发射谱。用Lambda 950型光谱仪对由同一根晶体棒加工而成的掺杂浓度为0.5%(原子数分数)、尺寸为4 mm×4 mm×30 mm的a-cut、b-cut、c-cut Ho:YAP晶块进行1800~2200 nm波段的吸收谱测量,波长分辨率为1 nm,测量精度为±0.3 nm,结果如图1所示。其中:a-cut晶体在1917,1947,1977 nm附近的吸收截面分别为 1.28×10^{-20} , 1.1×10^{-20} , 1.05×10^{-20} cm²; b-cut晶体在1916,1930,1977 nm附近的吸收截面分别为 9.35×10^{-21} , 1.14×10^{-20} , 1.12×10^{-20} cm²; c-cut晶体在1916,1929,1978 nm附近的吸收截面分别为 1.04×10^{-20} , 1.03×10^{-20} , 0.85×10^{-20} cm²。

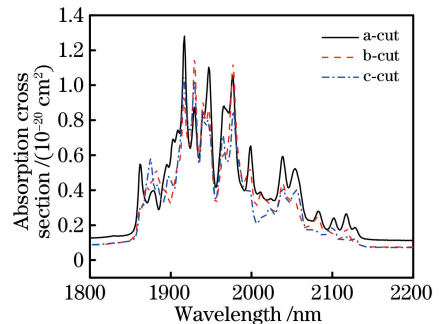


图1 不同切割方向的Ho:YAP晶体的吸收谱
Fig. 1 Absorption spectra of a-cut, b-cut and c-cut Ho:YAP crystal

接着测试三个切割方向的Ho:YAP晶体的荧光发射谱。使用中心波长为1915.3 nm的掺铈光纤振荡器在室温下激发Ho:YAP荧光,采用AQ6375型光谱仪测试荧光发射谱,结果如图2所示。可见:在2.1 μm附近,a-cut晶体在2083,2102,2117,2134 nm处有较强的发射峰,b-cut晶体在2083,2094,2117 nm处有较强的发射峰,c-cut晶体在2083,2102,2117,2128 nm处有较强的发射峰。

3 实验装置

图3所示为实验装置示意图。因为三个切割方向的Ho:YAP晶体在1915 nm附近均有较大的吸收截面,所以采用中心波长为1915.3 nm、最大输出功

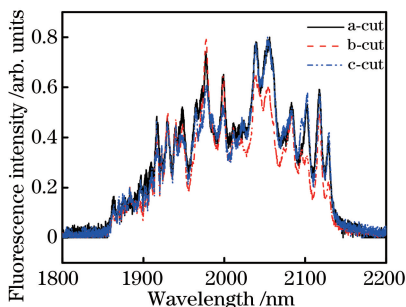


图 2 室温下不同切割方向的Ho:YAP晶体的荧光光谱

Fig. 2 Room temperature fluorescence spectra of a-cut, b-cut and c-cut Ho:YAP crystal

率为 44.3 W, 3 dB 谱宽约为 0.4 nm 的掺铥光纤振荡器作为泵浦源。激光经光纤跳线输出到自由空间后,通过一对焦距比为 10:150 的耦合透镜组(M1和M2)聚焦于Ho:YAP晶体前表面附近。

尺寸为 4 mm×4 mm×30 mm 的 a-cut、b-cut、c-cut Ho:YAP晶体两端面镀有对泵浦光和信号光

的增透膜。在侧面包裹铝箔后,将晶体置于长度匹配的紫铜热沉上,通水冷却。不同切割方向晶体对泵浦光的吸收有所不同,使用 10 W 泵浦激光进行测试,a、b、c 三个切割方向的晶体的吸收率分别为 80.17%、68.58%和 78%。前腔镜 M3 为平面镜,镀有对 2118 nm 激光高反,对 1915 nm 激光高透的薄膜。输出耦合腔镜 M4 为曲率半径 $R = -100$ mm 的平凹镜,它对 2118 nm 激光的透过率 $T = 40\%$ 。由 M3 和 M4 构成的 Ho:YAP 谐振腔长度为 135 mm。由 ABCD 矩阵计算可知,上述激光谐振腔内 Ho:YAP 晶体附近的振荡光斑直径为 0.4 mm。晶体前表面上泵浦光斑的直径为 0.5 mm。国产声光调制器(AOM)的驱动功率为 40 W,通光孔径为 2 mm,轴向通光长度约为 50 mm。在进行连续激光输出实验时,腔内插入了声光 Q 开关。用滤光片 M5(10° , HR@1915 nm, HT@2118 nm)将剩余泵浦光滤除后,采用功率计测试输出激光功率。

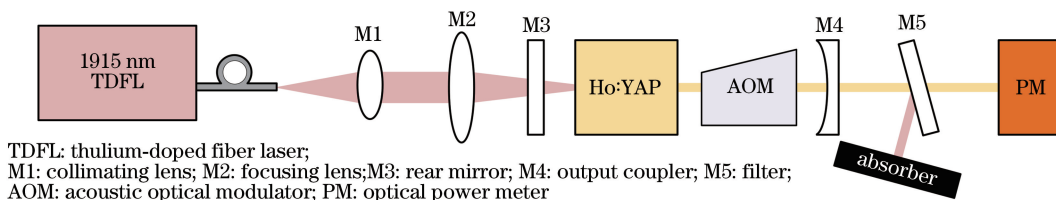


图 3 Ho:YAP激光器的实验装置示意图

Fig. 3 Experimental schematic of Ho:YAP laser

4 实验结果及分析

4.1 连续激光输出特性

不同切割方向的Ho:YAP晶体的连续激光输出功率随泵浦功率的变化曲线如图4所示。当泵浦功率达到最大值 44.3 W 时,a-cut 晶体的激光输出功率为 22.9 W,斜率效率为 59.38%,光-光效率为 51.69%;b-cut 晶体的激光输出功率为 23.6 W,斜率效率为 61.98%,光-光效率为 53.27%;c-cut 晶体的激光输出功率为 24.5 W,斜率效率为 67.42%,光-光效率为 55.30%。

图5给出了使用 AQ6375 型光谱仪对不同切割方向Ho:YAP晶体激光输出光谱进行测量的结果。在 1.8~2.2 μm 波长范围内,a-cut 晶体仅在中心波长为 2117.7320 nm 处有激光输出,谱宽为 0.5309 nm,如图 5(a)所示;b-cut 晶体仅在中心波长为 2117.7527 nm 处有激光输出,谱宽为 0.4469 nm,如图 5(b)所示;c-cut 晶体在最大泵浦功率下输出激光的中心波长为 2128.9896 nm,谱宽

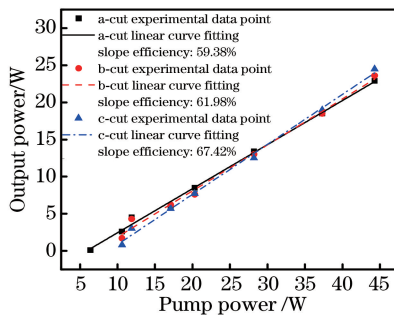


图 4 Ho:YAP晶体的连续激光输出功率特性图

Fig. 4 Continuous wave (CW) laser output power characteristics of Ho:YAP crystal

为 0.4176 nm,如图 5(c)所示。在实验过程中,以 a-cut 和 b-cut 晶体为工作介质的振荡器始终保持单一且稳定的中心波长振荡输出,而 c-cut 晶体的输出波长在泵浦功率上升过程中会发生跳变:泵浦功率小于 11.79 W 时以中心波长 2102 nm 运转,达到 17.1 W 时输出 2102 nm 和 2129 nm 两个波长且以 2129 nm 为主,泵浦功率进一步提升后以 2129 nm 单一中心波长运转。

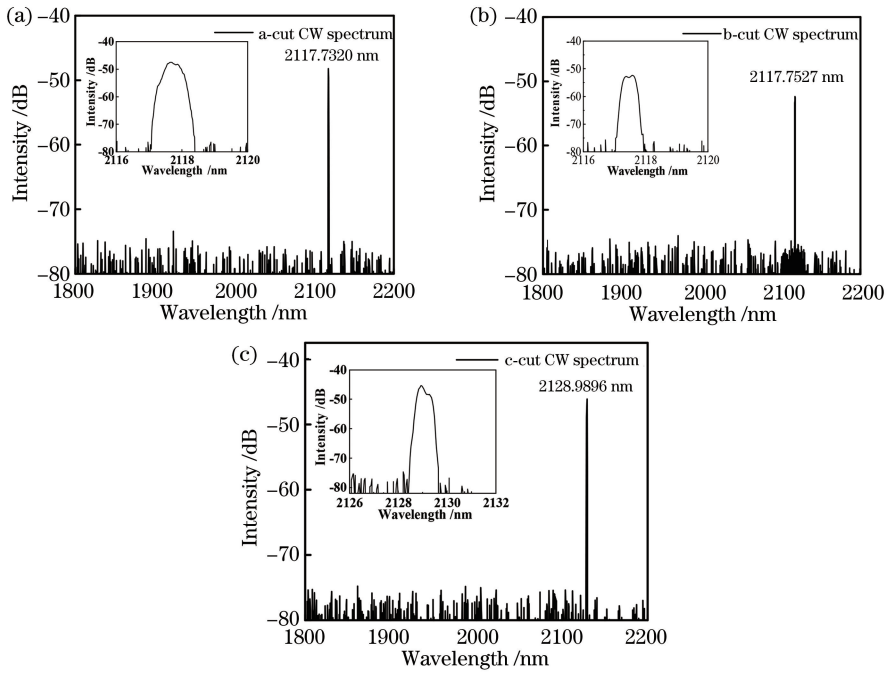


图 5 不同切割方向的Ho:YAP晶体的连续激光输出光谱图。(a) a-cut;(b) b-cut;(c) c-cut

Fig. 5 CW laser output spectra of Ho:YAP crystal in different cutting directions. (a) a-cut; (b) b-cut; (c) c-cut

由上述结果可见;c-cut晶体的激光输出功率以及斜率效率最高,但是波长在2102 nm与2129 nm之间发生了数次跳变,光谱稳定性不佳;相比之下,a-cut和b-cut晶体的输出光谱稳定性较好,且b-cut晶体的斜率效率稍高;三种切割方向Ho:YAP晶体在相同实验条件下的激光输出谱宽相近,均处于0.4~0.5 nm范围。

4.2 调Q脉冲激光输出特性

采用腔内声光调制方式研究三种切割方向Ho:YAP晶体脉冲激光的输出特性。在工作重复频率为20 kHz的条件下,图6给出了Ho:YAP晶体的调Q脉冲激光输出功率特性。当1915 nm掺铋光纤激光的输出功率达到最大值44.3 W时,a-cut晶体的平均输出功率为18.0 W,斜率效率为48.37%,光-光效率为40.63%;b-cut晶体的平均输出功率为22.3 W,斜率效率为55.22%,光-光效率为50.34%;c-cut晶体的平均输出功率为22.0 W,斜率效率为57.80%,光-光效率为49.66%。

接着对三种切割方向Ho:YAP晶体的脉冲激光进行光谱测量,结果发现a-cut和c-cut晶体都出现了不同程度的中心波长偏移和多波长起振,而b-cut晶体的脉冲输出激光为单光谱。

图7给出了不同泵浦功率下a-cut Ho:YAP激光器的调Q输出激光光谱。对于a-cut晶体,随着泵浦功率增大,输出激光的中心波长在2102 nm和

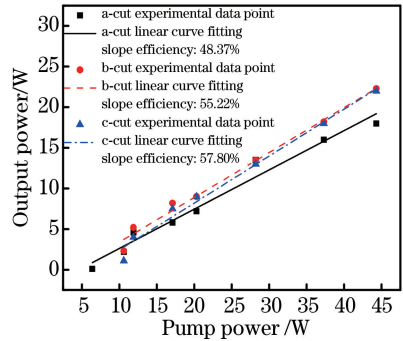


图 6 Ho:YAP调Q脉冲激光输出功率随泵浦功率的变化
Fig. 6 Variation of Q-switched Ho:YAP laser output power versus pump power

2130 nm间竞争:在低功率泵浦下,输出光谱仅位于2102 nm处;当泵浦功率提高到37.3 W时,初期仅在2130 nm处起振,输出激光功率为18 W,随后出现2102,2118,2130 nm同时振荡,如图7(a)所示,最终为2102 nm和2130 nm两个波长稳定并存,输出功率也稳定在16 W左右;当泵浦功率为44.3 W时,初期仅在2102 nm处起振,稍后转为2101 nm和2130 nm并存,如图7(b)所示,输出功率为18 W,其中波长2101 nm处的输出功率占总功率的95%以上。当a-cut晶体脉冲输出功率为7 W、中心波长为2102 nm时,测得的光束质量因子 M^2 如图8所示,其中 $M_x^2 = 1.49, M_y^2 = 1.51$ 。

对于c-cut晶体,其输出中心波长的变化趋势

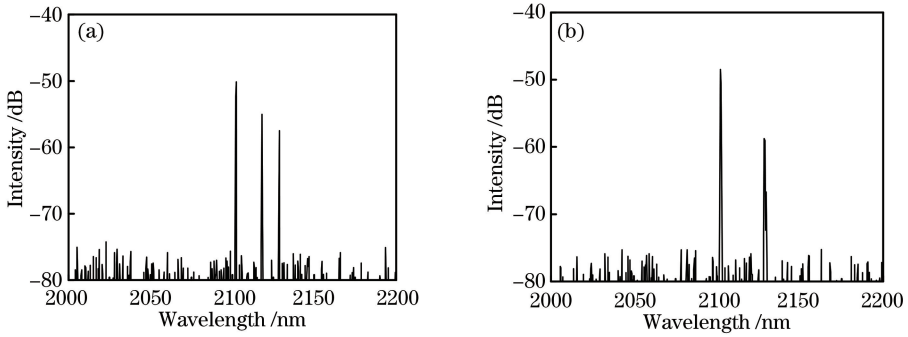


图 7 不同泵浦功率下 a-cut Ho:YAP激光器的调 Q 输出光谱。(a) 37.3 W;(b) 44.3 W

Fig. 7 Output spectra of Q-switched a-cut Ho:YAP laser at different pump power. (a) 37.3 W; (b) 44.3 W

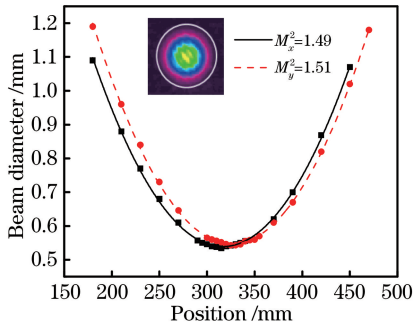


图 8 a-cut Ho:YAP晶体脉冲在输出功率为7 W 时的光束质量因子 M^2

Fig. 8 Beam quality factor M^2 of a-cut Ho:YAP crystal at pulse laser power of 7 W

与连续输出时的基本一致:泵浦功率达到 11.89 W 前,输出 2102 nm 激光;在泵浦功率从 11.89 W 提升至 37.3 W 的过程中,输出 2129 nm 激光;当泵浦功率达到 44.3 W 时,稳定后波长(2129 nm)的光谱强度占总光谱强度的 99%以上,在 2102 nm 处微弱起振,如图 9 所示。虽然输出光谱随泵浦功率的提升而变化,但在最高泵浦功率下趋于稳定,测得的中心波长为 2129.1187 nm,谱宽为 0.2741 nm,用 PIN 管和示波器测得此时的脉冲输出波形如图 10 所示,脉宽为 27 ns,脉冲无拖尾且稳定。c-cut 晶体脉冲的输出功率为 10 W,中心波长 2129 nm 处的光束质量因子测试结果如图 11 所示,其中 $M_x^2 = 1.57$, $M_y^2 = 1.71$ 。

比较而言,b-cut 晶体在调 Q 脉冲输出状态下的输出光谱、脉冲形状等更为稳定(见图 12 和图 13):仅有中心波长为 2117.9360 nm 的激光输出(如图 12 中虚线部分所示),谱宽为 0.2539 nm;脉宽(半峰全宽)为 20 ns,脉冲无拖尾且稳定。对输出激光进行了 10 min 的功率稳定性测试,结果如图 14 所示,脉冲激光输出的不稳定性为 $\pm 4\%$ 。输出功率为 16 W、中心波长为 2118 nm 的 b-cut 晶体脉冲的光

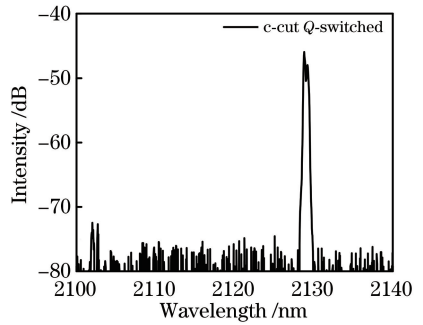


图 9 c-cut Ho:YAP激光器的调 Q 输出光谱

Fig. 9 Output spectrum of Q-switched c-cut Ho:YAP laser

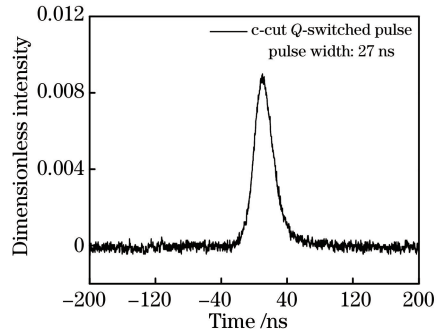


图 10 c-cut Ho:YAP激光器的输出脉冲

Fig. 10 Output pulse of c-cut Ho:YAP laser

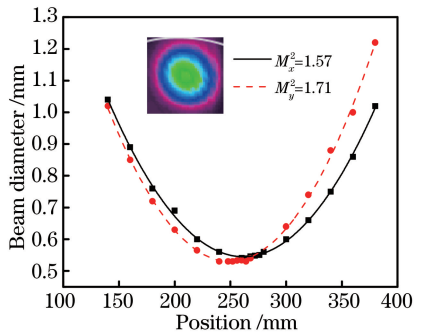


图 11 c-cut Ho:YAP晶体脉冲在输出功率为 10 W 时的光束质量因子

Fig. 11 Beam quality factor of c-cut Ho:YAP crystal at pulse laser power of 10 W

束质量因子测试结果如图 15 所示,其中 $M_x^2 = 1.81$, $M_y^2 = 1.50$ 。

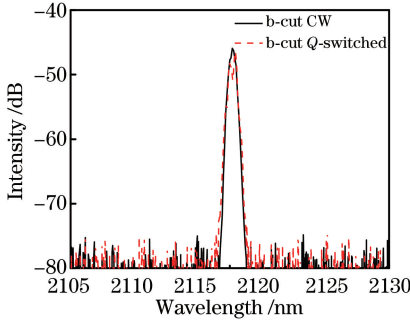


图 12 b-cut Ho:YAP激光器的输出光谱
Fig. 12 Output spectra of b-cut Ho:YAP laser

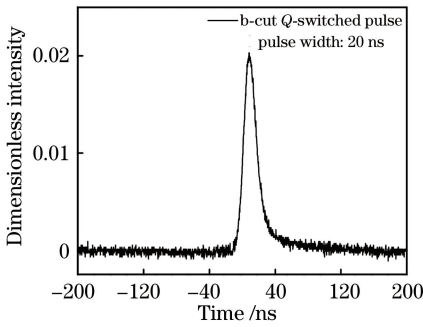


图 13 b-cut Ho:YAP激光器的输出脉冲波形
Fig. 13 Output pulse waveform of b-cut Ho:YAP laser

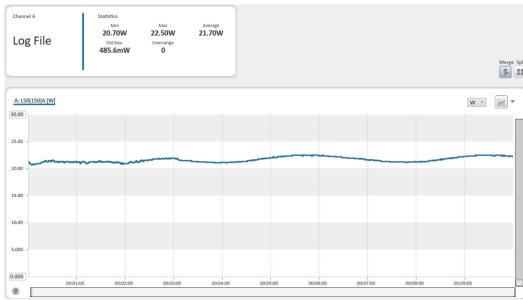


图 14 b-cut Ho:YAP晶体的脉冲激光输出稳定性测试结果
Fig. 14 Pulse laser power stability test of b-cut Ho:YAP crystal

综上,在腔内声光调 Q 后,以不同切割方向的 Ho:YAP 晶体为工作介质的激光器的输出发生了变化:a-cut 晶体出现了 2102,2118,2130 nm 的多波长起振,在大多数情况下,波长为 2102 nm 的激光能量占大部分,激光输出功率和斜率效率比连续输出时明显下降;b-cut 晶体仍能保持中心波长近 2118 nm 运转,且脉冲输出波形、功率稳定;c-cut 晶体的输出光谱在 2102 nm 和 2129 nm 之间跳变,随着泵浦功率升高,2129 nm 能相对稳定地占据激光能量的绝大部分,脉冲输出波形趋于稳定,但激光输

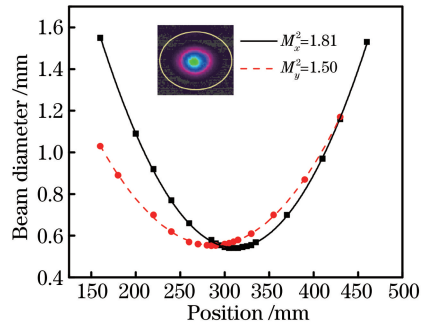


图 15 b-cut Ho:YAP 晶体脉冲在输出功率为 16 W 时的光束质量因子

Fig. 15 Beam quality factor of b-cut Ho:YAP crystal at pulse laser power of 16 W

输出功率略低于 b-cut 晶体。

实验结果显示,c-cut 晶体的斜率效率、连续输出功率高于其余两个切割方向的晶体。结合给出的晶体吸收谱、荧光发射谱进行分析后认为:虽然三种切割方向的 Ho:YAP 晶体对 1915 nm 泵浦光均具有较大的吸收截面,但 c-cut 晶体在 2.12 μm 附近的发射截面更大,且晶体本身对激光输出波长的吸收相对较小;在参数一致的实验装置中,由同一根晶棒制成的相同尺寸、不同切割方向 Ho:YAP 晶体的激光阈值相差不大,所以 c-cut 晶体的斜率效率、连续输出功率相对较高;在调 Q 脉冲输出时,由于多波长起振的缘故,c-cut 晶体的输出功率比 b-cut 晶体略小一些。对于 a-cut 和 c-cut 晶体出现的输出中心波长偏移以及光谱跳变的现象,文献[14]指出这是再吸收损耗以及输出耦合腔镜的透射率等参数引起的。由荧光谱可知:a-cut、c-cut 晶体在 2102,2118,2134 nm 附近均有较强的发射峰,而晶体本身对于这几个波长也有一定的吸收;在泵浦强度增大过程中,这几个波长的增益受腔损耗、镀膜参数、晶体本身的吸收与激发等因素的共同作用,其中增益较高的波长容易同时起振或相互竞争;而 b-cut 晶体的 2118 nm 发射峰与相邻发射峰波长的间隔相对较大,不易受镀膜参数的影响,且在 2118 nm 处发射截面较大。因此,b-cut 晶体的输出波长易保持稳定,而 a-cut、c-cut 晶体存在几个阈值强度相当的发射峰,容易发生竞争,导致光谱跳变。对于激光波长输出不稳定的情况,可以采用腔内插入法布里-珀罗标准具、镀膜等选波长措施来获得单一波长的激光输出。

5 结 论

本文报道了三种不同切割方向的 0.5% (原子数

分数)Ho:YAP晶体的连续及脉冲激光输出特性研究。采用最大输出功率为 44.3 W 的 1915 nm 掺铥光纤激光器端面泵浦 Ho:YAP 晶体,在三个切割方向上均获得了大于 20 W 的连续激光输出,其中:b-cut 晶体输出激光的中心波长近 2118 nm,最大连续输出功率为 23.6 W,斜率效率为 61.98%;a-cut 晶体的输出结果与 b-cut 晶体相近,而 c-cut 晶体的输出光谱稳定性不佳。当驱动腔内声光调制器以重复频率 20 kHz 工作时,a-cut、c-cut 晶体出现了中心波长偏移和多波长起振的现象,仅有 b-cut 晶体获得了中心波长近 2118 nm 的稳定脉冲输出,最大平均功率为 22.3 W,脉宽为 20 ns,斜率效率为 55.22%,光束质量因子分别为 $M_x^2 = 1.81$ 和 $M_y^2 = 1.50$ 。实验表明,使用 b-cut 晶体更利于实现稳定、高效的连续波或纳秒级脉冲的近 2118 nm 激光输出。为此,后续拟采用 b-cut 晶体进一步深入研究,为中红外非线性频率变换提供可靠的泵浦源。本实验结果及分析为研究该型晶体不同切割方向的波长特性、输出效率以及稳定性等提供了参考,也为掺铥元素激光晶体的性能对比提供了参考。

参 考 文 献

- [1] Koch G J, Barnes B W, Petros M, et al. Coherent differential absorption lidar measurements of CO₂ [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(26): 5092-5099.
- [2] Bach T, Herrmann T R W, Cellarius C, et al. Bladder neck incision using a 70 W 2 micron continuous wave laser (RevoLix) [J]. *World Journal of Urology*, 2007, 25(3): 263-267.
- [3] Fried N M, Murray K E. High-power thulium fiber laser ablation of urinary tissues at 1.94 μm [J]. *Journal of Endourology*, 2005, 19(1): 25-31.
- [4] Leindecker N, Marandi A, Byer R L, et al. Octave-spanning ultrafast OPO with 26–61 μm instantaneous bandwidth pumped by femtosecond Tm-fiber laser [J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 7046-7053.
- [5] Shen Y J, Yao B Q, Duan X M, et al. 103 W in-band dual-end-pumped Ho:YAG laser [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(17): 3558-3560.
- [6] Zhao B R, Yao B Q, Qian C P, et al. 231 W dual-end-pumped Ho:YAG MOPA system and its application to a mid-infrared ZGP OPO [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(24): 5989-5992.
- [7] Dergachev A, Armstrong D, Smith A, et al. 3.4-μm ZGP RISTRA nanosecond optical parametric oscillator pumped by a 2.05-μm Ho:YLF MOPA system [J]. *Optics Express*, 2007, 15(22): 14404-14413.
- [8] Wang F, Shen D Y, Fan D Y, et al. Efficient Ho:YLF laser pumped by tunable Tm-doped fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(7): 1727-1731.
王飞, 沈德元, 范滇元, 等. 可调谐掺铥光纤激光器共振抽运的 Ho:YLF 固体激光器 [J]. *中国激光*, 2009, 36(7): 1727-1731.
- [9] Bollig C, Strauss H J, Esser M J D, et al. Compact fibre-laser-pumped Ho:YLF oscillator-amplifier system [C] // *European Conference on Lasers and Electro-Optics and the European Quantum Electronics Conference*, June 14-19, 2009. Munich, Germany: IEEE, 2009: 5196612.
- [10] Yao B Q, Duan X M, Zheng L L, et al. Continuous-wave and Q-switched operation of a resonantly pumped Ho:YAlO₃ laser [J]. *Optics Express*, 2008, 16(19): 14668-14674.
- [11] Duan X M, Yao B Q, Yang X T, et al. Room temperature efficient continuous wave and Q-switched operation of a Ho:YAP laser [J]. *Applied Physics B*, 2009, 96(2/3): 379-383.
- [12] Yu T, Ye X S, Yang Z G, et al. All fiber thulium-doped fiber laser pumped Q-switched Ho:YAP laser [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10173: 101731M.
- [13] Weber M J, Bass M, Andringa K, et al. Czochralski growth and properties of YAlO₃ laser crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 1969, 15(10): 342-345.
- [14] Stoneman R C, Esterowitz L. Efficient 1.94-μm Tm:YAlO₃ laser [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1995, 1(1): 78-81.