

半导体抽运[100]和[111]切割方向 Nd:YAG 激光器 被动调 Q 实验的研究

孙 哲 程秋桐 姜梦华 惠勇凌 雷 旬 李 强

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 热应力双折射产生的热退偏是限制 Nd:YAG 激光器线偏振输出功率的重要因素, 相比于传统[111]切割方向 Nd:YAG 晶体,[100]切割方向 Nd:YAG 晶体的热退偏与振荡光偏振方向有关, 通过寻找合适的偏振方向, 能够显著提高[100]切割方向 Nd:YAG 激光器的线偏振输出功率。采用半导体端面抽运[111]和[100]切割方向的 Nd:YAG 晶体棒, 使用 Cr⁴⁺:YAG 晶体作为被动调 Q 晶体, 进行被动调 Q 对比实验研究。实验结果表明, 相比于传统的[111]切割方向 Nd:YAG 晶体棒, 采用半导体抽运[100]切割方向 Nd:YAG 晶体棒进行被动调 Q, 能够获得稳定、高消光比的线偏振激光输出, 输出激光消光比为 500:1, 稳定度高于 96.5%。

关键词 激光器; 被动调 Q; Nd:YAG; Cr⁴⁺:YAG

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.s114001

Investigation of Diode Pumped Passively Q-Switched [100]- and [111]-Cut Nd:YAG Laser

Sun Zhe Cheng Qiutong Jiang Menghua Hui Yongling Lei Hong Li Qiang

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract Thermal depolarization caused by birefringence is a major factor that limits the output power of linearly polarized Nd:YAG laser. Compared with conventional [111]-cut Nd:YAG rod, the thermal depolarization depends on the polarization direction for the [100]-cut Nd:YAG rod. The linearly polarized output power can be improved by suitable modification of the polarization direction of oscillate laser. The [111]- and [100]-cut Nd:YAG rods are used as the gain medium and the Cr⁴⁺:YAG crystal is used as the saturable absorber for passively Q-switched laser. The experiment demonstrates that in comparison with conventional [111]-cut Nd:YAG rod, highly stabled output with high extinction is achieved by using the [100]-cut Nd:YAG rod as the laser crystal. The extinction ratio is 500:1 and polarized output stability is higher than 96.5%.

Key words lasers; passive Q-switch; Nd:YAG; Cr⁴⁺:YAG

OCIS codes 140.3580; 140.3540; 140.3615; 260.5430

1 引 言

激光二极管抽运的 Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 激光器因其体积小、结构紧凑、重频高、脉宽短、峰值功率高等优点, 在激光雷达、激光微加工、遥感监测、非线性频率变换等领域具有广阔的应用前景^[1]。Cr⁴⁺:YAG 晶体具有热导性能好、吸收截面大、掺杂浓度

高、饱和光强小、损伤阈值高、光化学性质稳定、寿命长, 无退化现象易实现高峰值输出功率和高脉冲重复频率等优点, 从而被广泛应用在波长为 0.8~1.2 μm 的被动调 Q 激光器和锁模激光器中^[2-4]。

传统[111]切割方向的 Nd:YAG 晶体是应用最广泛的被动调 Q 激光器增益介质之一, 属于各向同

收稿日期: 2014-01-22; 收到修改稿日期: 2014-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(61378023)、北京市自然科学基金(4112005)

作者简介: 孙 哲(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事全固态激光技术方面的研究。

E-mail: allen-sun@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 李 强(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事全固态激光技术方面的研究。E-mail: ncltq@bjut.edu.cn

性晶体,由于半导体激光器的发射光谱和 Nd:YAG 晶体的吸收光谱匹配程度高,因此在大功率抽运的情况下,Nd:YAG 晶体的热效应会非常明显,进而产生热应力、热致双折射等效应。尤其对于被动调 Q 激光器,其腔内振荡光通常为线偏振光,因此由热应力、热致双折射等效应造成的热退偏效应将更加明显,严重影响[111]切割方向 Nd:YAG 被动调 Q 激光器输出激光的消光比和稳定性^[5-6]。

近几年,针对特殊切割方向 Nd:YAG 晶体棒热退偏的研究受到了广泛的关注。1970 年,Koechner 等^[7-8]对 Nd:YAG 晶体的热致双折射效应进行了计算,给出了数学模型。1980 年,Soms 等^[9]指出了 Koechner 结论中的错误,并正确计算出了[111]和[001]切割方向 Nd:YAG 晶体热致双折射大小。2002 年,Shoji 等^[10]系统地计算了[111],[100]和[110]切割方向 Nd:YAG 晶体的热致双折射大小,计算结果表明采用[110]切割方向 Nd:YAG 晶体,并适当选择光斑大小,就能够明显降低激光器的热退偏效应。2010 年,Puncken 等^[11]采用探测光对[100]和[110]切割方向 Nd:YAG 晶体的热退偏大小进行测量,从理论和实验上验证了采用[100]和[110]切割方向 Nd:YAG 晶体能够明显降低激光器的热退偏效应。2011 年,Tünnermann 等^[12]采用半导体端面抽运[111],[100]和[110]切割方向 Nd:YAG 棒激光器,在自由运转的条件下,采用[100]切割方向 Nd:YAG 晶体相比于[111]切割方向 Nd:YAG 晶体能够减小 80% 的热退偏损耗。2012 年,Sun 等^[13]采用半导体侧面抽运[111]和[100]切割方向 Nd:YAG 棒,进行自由运转实验,同样得出采用[100]切割方向 Nd:YAG 晶体能够明显降低激光器热退偏效应的结论,相比于[111]切割方向 Nd:YAG 晶体棒,采用[100]切割方向 Nd:YAG 晶体棒作为激光器增益介质时,能够将线偏振功率提高 1

倍以上。最近几年国内外研究人员的研究证明,采用特殊切割方向的 Nd:YAG 晶体棒代替传统[111]切割方向的 Nd:YAG 晶体棒能够减小热退偏,通过改变腔内的线偏振方向可以改变热退偏大小,并且存在一个热退偏最小的方向。

本文在前期实验研究的基础上^[13],采用半导体端面抽运[111]和[100]切割方向的 Nd:YAG 晶体棒,并采用 Cr⁴⁺:YAG 晶体作为被动调 Q 晶体,进行被动调 Q 实验研究。实验结果证明,采用[100]切割方向的 Nd:YAG 晶体棒作为被动调 Q 激光器的增益介质,能够明显提高输出激光脉冲的消光比和稳定性。

2 实验装置

为了对比研究[100]和[111]切割方向 Nd:YAG 晶体棒被动调 Q 输出特性,采用如图 1 所示的实验结构,HWP 为 1/2 波片,HR 为全反膜,AR 为增透膜,T 为透射率,[100]和[111]切割方向 Nd:YAG 晶体分别作为增益介质,分别对[100]和[111]切割方向 Nd:YAG 棒进行被动调 Q 实验研究。实验使用标定过晶轴方向的 Cr⁴⁺:YAG 晶体作为饱和和吸收体,采用铜热沉冷却,并且能够 360° 旋转调整。采用光纤耦合半导体激光器分别端面抽运[111]和[100]切割方向的 Nd:YAG 晶体棒,采用 1/2 波片改变抽运光的偏振方向,其中[100]切割方向的 Nd:YAG 晶体棒标定过晶轴方向。两种切割方向 Nd:YAG 晶体棒的掺杂浓度均为 1.0%,尺寸均为 $\varphi 3 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,晶体棒的冷却条件相同,谐振腔为腔长 180 mm 的对称平平腔,输出镜透射率为 50%。为了获得不同偏振状态下两种切割方向的 Nd:YAG 晶体棒被动调 Q 的输出特性,通过旋转 Cr⁴⁺:YAG 晶体,改变其在腔内对 1064 nm 振荡光的饱和吸收方向,即改变了腔内振荡光的线偏振方

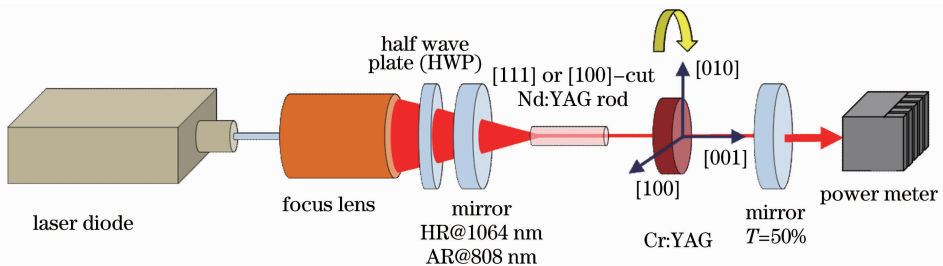


图 1 Nd:YAG 激光器被动调 Q 实验装置

Fig. 1 Experimental setup of passively Q-switched laser

向, 获得在 360° 范围内被动调 Q 激光输出的变化规律。实验采用 Tektronix TDS1012B-SC 数字示波器和 InGaAs PIN 光电探测器进行抽运脉冲波形的测量, 偏振分光棱镜 (PBS) 和功率计测量输出偏振方向及消光比。

3 实验结果及分析

对于光纤耦合半导体端面抽运激光器, 由于输出激光的偏振方向很大程度上取决于抽运光偏振方向^[14], 因此, 为了获得稳定的激光输出, 采用 1/2 波片调整抽运偏振方向。实验采用 [100] 切割方向 Nd:YAG 晶体棒作为激光器的增益介质, 由于 [100] 切割方向 Nd:YAG 晶体棒在不同腔内偏振态下存在各向异性输出特性, 存在较大线偏振功率输出的方向。为了获得稳定的高功率激光输出, 先调整 1/2 波片改变抽运偏振方向, 使其与 [100] 切割方向 Nd:YAG 晶体棒较大线偏振输出功率的方向相同, 即 [011]、 $[0\bar{1}1]$ 、 $[01\bar{1}]$ 和 $[0\bar{1}\bar{1}]$ 方向。

在抽运功率 2.5 W, 抽运脉宽 230 μ s, 重复频率 100 Hz 的条件下, 旋转 Cr⁴⁺:YAG 晶体晶轴方向, 使用偏振分光棱镜对输出激光的消光比进行测量, Cr⁴⁺:YAG 晶体与抽运偏振方向的位置示意图如图 2 所示, 其中 θ 是抽运偏振方向与 Cr⁴⁺:YAG 晶体 [110] 方向的夹角。实验结果如图 3 所示, 输出激光消光比随 Cr⁴⁺:YAG 晶体旋转角度呈周期性变化。当 θ 为 45°、135°、225° 和 315° 时, 抽运偏振方向与 Cr⁴⁺:YAG 晶体晶轴 [100] 或 [010] 方向平行, 此时消光比达到了 300:1, 输出激光的线偏振方向始

终沿抽运偏振方向。当 θ 为 0°、90°、180° 和 360° 时, 抽运偏振方向与 Cr⁴⁺:YAG 晶体晶轴 [100] 或 [010] 方向呈 45°, 此时输出激光非线性偏振激光。进一步增加抽运功率, 重复频率不变, 实验结果如图 3 所示。从图中可以看出, 输出激光消光比仍随 Cr⁴⁺:YAG 晶体旋转角度呈周期性变化, 当抽运偏振方向与 Cr⁴⁺:YAG 晶体晶轴 [100] 或 [010] 方向时, 平行消光比进一步提高, 达到了 500:1, 此时输出激光脉冲如图 4(a) 所示, 脉宽 12.98 ns, 稳定度约为 96.5%。当抽运偏振方向与 Cr⁴⁺:YAG 晶体晶轴 [100] 或 [010] 方向时, 输出激光非偏振光, 输出激光脉冲如图 4(b) 所示, 脉宽 13.10 ns, 稳定度约为 86.3%。

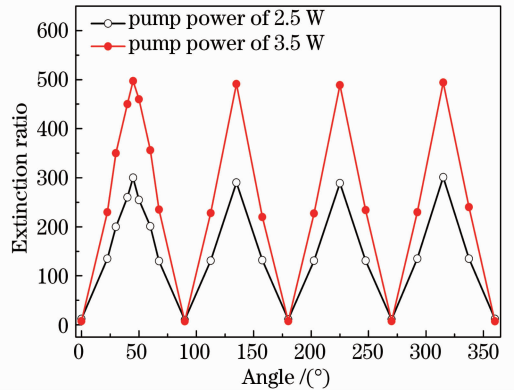


图 3 不同 Cr⁴⁺:YAG 晶体角度下, [100] 切割方向 Nd:YAG 被动调 Q 激光器的消光比

Fig. 3 Extinction ratio of [100]-cut Nd:YAG passively Q-switched laser as a function of rotation angle for [001]-cut Cr⁴⁺:YAG crystal

同时, 测量了 [100] 切割方向 Nd:YAG 被动调 Q 激光器中, Cr⁴⁺:YAG 晶体不同角度下的输出功率, 测量结果如图 5 所示。当 θ 为 45°、135°、225° 和 315° 时, 获得了最大输出功率为 300 mW, 单脉冲能量 3 mJ; 当 0°、90°、180° 和 360° 时, 获得最小输出功率为 255 mW, 单脉冲能量 2.55 mJ。实验对比发现, 不同 Cr⁴⁺:YAG 晶体角度下, 输出功率差异不大。进一步增加抽运功率后, 最大输出功率增加至 500 mW, 单脉冲能量 5 mJ, 最小输出功率增加至 440 mW, 单脉冲能量 4.4 mJ。

为了对 [100] 切割方向 Nd:YAG 被动调 Q 激光器高消光比的输出特性进行对比研究, 实验采用相同参数 [111] 切割方向 Nd:YAG 晶体棒作为增益介质, 在谐振腔结构相同的条件下进行被动调 Q 实验研究。由于 [111] 切割方向 Nd:YAG 晶体为各向同性晶体, 因此在腔内未加入 Cr⁴⁺:YAG 晶体, 旋转 1/2 波片改变抽运偏振方向时, 未发现输出功率

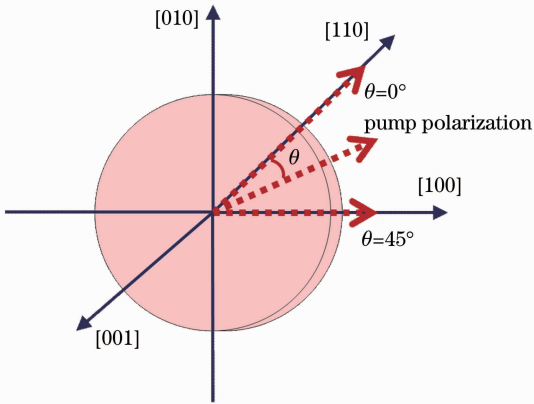


图 2 [001] 切割 Cr⁴⁺:YAG 晶体晶轴方向与抽运偏振方向相对位置示意图

Fig. 2 Relative position between polarization direction of pump laser and local symmetry axis of [001]-cut Cr⁴⁺:YAG

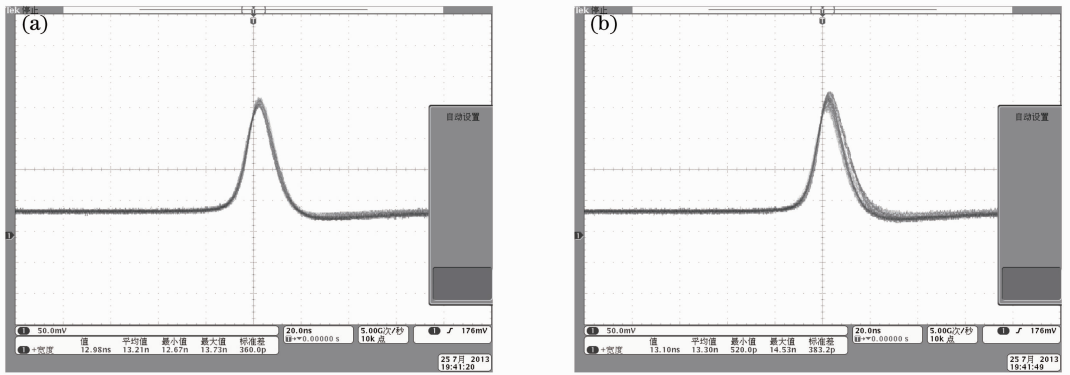


图 4 [100]切割方向 Nd:YAG 被动调 Q 激光器输出激光脉冲。(a) θ 为 45° 、 135° 、 225° 和 315° ；(b) θ 为 0° 、 90° 、 180° 和 360°

Fig. 4 Output pulse time shape for [100]-cut Nd:YAG passively Q-switched laser. (a) $\theta=45^\circ$, 135° , 225° and 315° ; (b) $\theta=0^\circ$, 90° , 180° and 360°

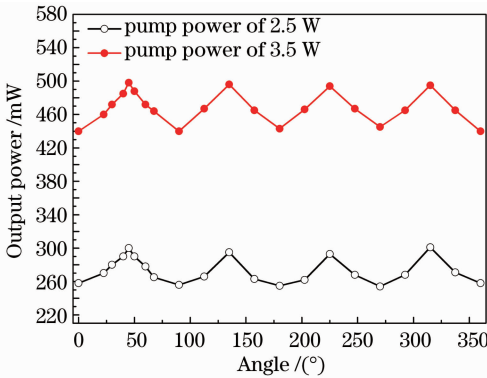


图 5 不同 Cr^{3+} :YAG 晶体角度下,[100]切割方向 Nd:YAG 被动调 Q 激光器的输出功率

Fig. 5 Output power of [100]-cut Nd:YAG passively Q-switched laser as a function of rotation angle for [001]-cut Cr^{3+} :YAG crystal

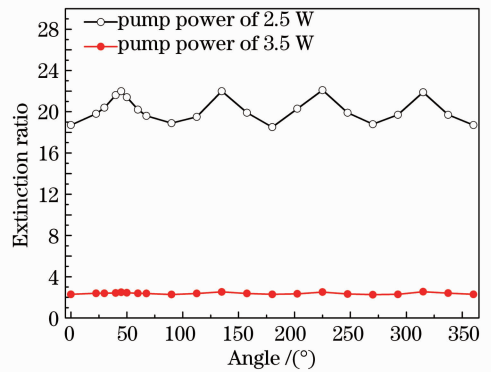


图 6 不同 Cr^{3+} :YAG 晶体角度下,[111]切割方向 Nd:YAG 晶体的消光比

Fig. 6 Extinction ratio of [111]-cut Nd:YAG passively Q-switched laser as a function of rotation angle for [001]-cut Cr^{3+} :YAG crystal

有明显变化。通过偏振分光棱镜(PBS)测量输出激光的消光比,在抽运功率 2.5 W,抽运脉宽 230 μs ,重复频率 100 Hz 的情况下,旋转 Cr^{3+} :YAG 晶体方向,消光比变化曲线如图 6 所示。从图中可以看出,输出激光的消光比同样随 Cr^{3+} :YAG 晶体旋转角度呈周期性变化,当 θ 为 45° 、 135° 、 225° 和 315° 时消光比最大,但是只有 25:1。当 θ 为 0° 、 90° 、 180° 和 360° 时消光比最小,只有 18:1。

当抽运光为低功率时,旋转 Cr^{3+} :YAG 晶体,[111]切割方向 Nd:YAG 晶体棒输出激光的消光比同样表现出了周期性变化。这是由于抽运光为线偏振光,偏振方向沿着 Cr^{3+} :YAG 晶体晶轴时,该偏振方向的粒子将首先反转达到阈值,产生沿该偏振方向的振荡光,达到阈值后形成激光输出。因此,该抽运偏振方向的输出功率高于其他方向,并且为线偏振光。但是由于[111]切割方向 Nd:YAG 晶体为

各向同性晶体,并且存在热退偏效应,因此在增加抽运功率后,输出激光的消光比随 Cr^{3+} :YAG 晶体旋转角度的周期性变化规律已经几乎不存在,输出激光消光比只有约 2:1,如图 6 所示。此时测量输出激光脉冲的脉宽及稳定度,当抽运偏振方向与 Cr^{3+} :YAG 晶体晶轴[100]或[010]方向平行时,输出激光脉冲如图 7(a)所示,脉宽 13.08 ns,稳定度约为 91.2%。当抽运偏振方向与 Cr^{3+} :YAG 晶体晶轴[100]或[010]方向时,输出激光非偏振光,输出激光脉冲如图 7(b)所示,脉宽 13.07 ns,稳定度约为 87.5%。

同时测量了[111]切割方向 Nd:YAG 被动调 Q 激光器中, Cr^{3+} :YAG 晶体不同角度下的输出功率,测量结果如图 8 所示。当 θ 为 45° 、 135° 、 225° 和 315° 时,获得了最大输出功率为 285 mW,单脉冲能量为 2.85 mJ。当 θ 为 0° 、 90° 、 180° 和 360° 时,获得最小输出功率为 265 mW,单脉冲能量为 2.65 mJ。

实验对比发现,不同 Cr⁴⁺:YAG 晶体角度下,输出功率差异不大。进一步增加抽运功率后,最大输出功率

增加至 485 W,单脉冲能量 4.85 mJ,略低于[100]切割方向 Nd:YAG 被动调 Q 激光器的最大输出功率。

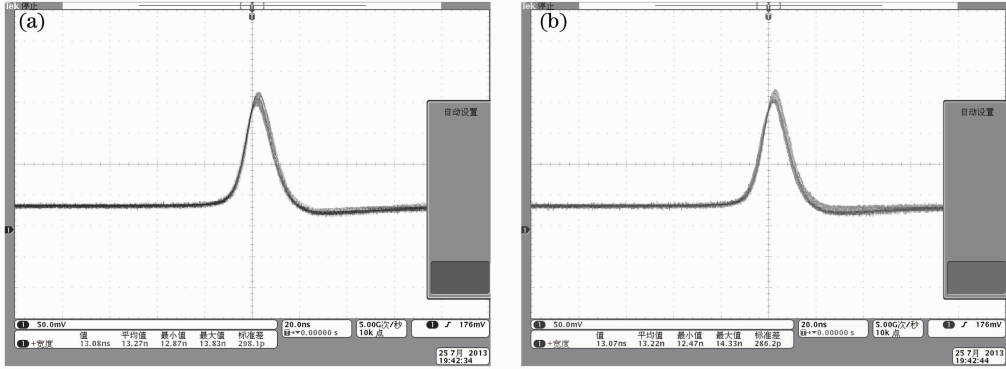


图 7 [111]切割方向 Nd:YAG 被动调 Q 激光器输出激光脉冲。(a) θ 为 45° 、 135° 、 225° 和 315° ; (b) θ 为 0° 、 90° 、 180° 和 360°

Fig. 7 Output pulse time shape for [111]-cut Nd:YAG passively Q-switched laser. (a) $\theta=45^\circ, 135^\circ, 225^\circ$ and 315° ; (b) $\theta=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ and 360°

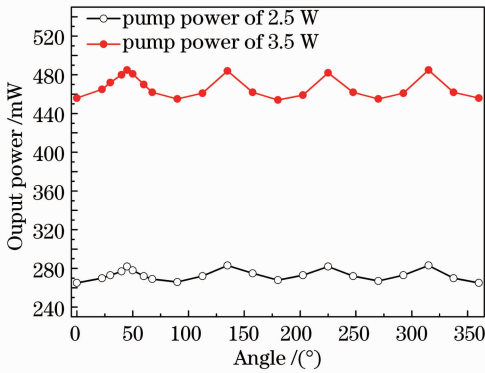


图 8 不同 Cr⁴⁺:YAG 晶体角度下,[111]切割方向 Nd:YAG 晶体的输出功率

Fig. 8 Output power of [111]-cut Nd:YAG passively Q-switched laser as a function of rotation angle for [001]-cut Cr⁴⁺:YAG crystal

为了对[100]切割方向 Nd:YAG 晶体棒的高消光比激光输出特性进行分析,采用图 9 做进一步说

明。Nd³⁺ 总共有 6 个方向, x_i 方向平行于 Nd:YAG 晶体立方单元中 X 轴的方向, y_i 和 z_i 方向平行于 Nd:YAG 晶体立方单元中面对角线的方向,即跃迁偶极子方向^[15]。偶极子与偶极子的相互作用是能量交换的主要原因,而这种能量交换只能发生在相互平行的方向上。根据偏振吸收选择规则^[15],激光增益正比于 $[\cos^2(\alpha_a)n_a + \cos^2(\alpha_b)n_b + \cos^2(\alpha_c)n_c]$,其中 n_i 为 a, b, c 三个方向上的反转粒子数; α_i 是 x_i 方向与偏振方向的夹角。对于[100]切割方向 Nd:YAG 晶体棒,假设抽运偏振方向沿着 [011]方向,对于[011]偏振方向增益正比于 $[1/(2n_a)+1/(2n_b)]$ 。由于谐振器内振荡光的建立起始于噪声,在抽运能量只能使 a 和 b 两个方向上的上能级粒子数达到阈值,只有 a 和 b 两个方向上的反转粒子数被倒空,而对于垂直于抽运偏振方向的 c 方向不存在粒子数向上能级反转,因此对于激光器第一个输出脉冲,偏振方向将沿[011]方向。因此,当抽运方向沿着被动调 Q 晶体 Cr⁴⁺:YAG 的晶轴方向,并且与[100]切割方向 Nd:YAG 晶体的 [011](或 $[0\bar{1}1]$ 、 $[01\bar{1}]$ 、 $[0\bar{1}\bar{1}]$)方向平行时,输出激光脉冲为线偏振光。同时,前期实验研究发现,当抽运偏振方向与 Cr⁴⁺:YAG 晶轴方向平行时,输出激光最稳定,且为线偏振激光^[16]。当旋转 Cr⁴⁺:YAG 晶体方向 45° ,即 θ 为 0° 、 90° 、 180° 和 360° 时,抽运偏振方向与[100]切割方向 Nd:YAG 晶体的 [011](或 $[0\bar{1}1]$ 、 $[01\bar{1}]$ 、 $[0\bar{1}\bar{1}]$)方向依然平行,但与 Cr⁴⁺:YAG 晶体晶轴方向呈 45° ,此时 Cr⁴⁺:YAG 晶体的 [010]和 [100]晶轴方向同时吸收腔内振荡粒子,所以两个晶轴方向的漂白作用均衡,从而

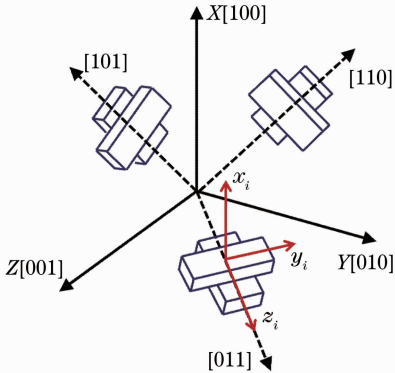


图 9 Nd:YAG 晶体立方单元中 Nd³⁺ 场方向示意图
Fig. 9 Orientations of the Nd³⁺ sites relative to the axes X, Y, Z of the cubic unit cell

两个晶轴方向的振荡光同时达到激光阈值,相互竞争从而产生的激光脉冲是非偏振光。因此,当抽运功率为2.5 W时,[100]切割方向 Nd:YAG 晶体棒的输出功率表现出了周期性变化,输出功率最大的方向与抽运偏振方向相同,输出激光为线偏振光。当进一步增大抽运功率后,由于[100]切割方向 Nd:YAG 晶体的各向异性特性,因此其消光比进一步提升。

由于实验采用[001]切割方向 Cr^{4+} :YAG 晶体作为饱和吸收体,与单一偏振方向的起偏器件不同,[001]切割方向的 Cr^{4+} :YAG 晶体在偏振方向平行于[010]和[100]两个正交的晶轴方向,存在两个对1064 nm 波长几乎相同的透射峰。当抽运偏振方向沿[001]切割方向 Cr^{4+} :YAG 晶轴方向 45° 时,[010]与[100]晶轴方向同时吸收沿抽运偏振方向的振荡光,两个晶轴方向均对振荡光产生漂白作用,从而产生两个正交偏振的随机脉冲信号输出。因此, Cr^{4+} :YAG 晶轴方向与抽运偏振方向相同和与抽运偏振方向呈 45° 两种情况下,[100]切割方向 Nd:YAG 被动调 Q 激光器输出功率差异不大。

4 结 论

采用[100]和[111]切割方向 Nd:YAG 晶体棒作为增益介质,[001]切割方向的 Cr^{4+} :YAG 晶体作为饱和吸收体,进行被动调 Q 实验研究。对于[100]切割方向 Nd:YAG 晶体,在旋转 Cr^{4+} :YAG 晶体一周的范围内,输出激光消光比和功率表现出了周期性变化,当抽运偏振方向沿着被动调 Q 晶体 Cr^{4+} :YAG 的晶轴方向,并且与[100]切割方向 Nd:YAG 晶体的[011](或 $[0\bar{1}1]$ 、 $[01\bar{1}]$ 、 $[0\bar{1}\bar{1}]$)方向平行时,获得了稳定、高消光比的线偏振光激光输出。对于[111]切割方向 Nd:YAG 晶体,在低功率抽运条件下,在旋转 Cr^{4+} :YAG 晶体一周的范围内,输出激光消光比和功率同样表现出了周期性变化,但由于热退偏效应,输出激光消光比明显小于[100]切割方向 Nd:YAG 晶体棒。实验研究证明,相比于传统的[111]切割方向 Nd:YAG 晶体棒,采用半导体抽运[100]切割方向 Nd:YAG 晶体棒进行被

动调 Q,能够获得稳定、高消光比的线偏振光激光输出。

参 考 文 献

- 1 J J Zayhowski. Passively Q-switched Nd:YAG microchip lasers and applications [J]. J Alloys and Compounds, 2000, 303-304: 393-400.
- 2 R J Lan, M D Liao, H H Yu, *et al.*. 3.3 ns Nd:LuVO₄ micro-type laser [J]. Laser Phys Lett, 2009, 6(4): 268-271.
- 3 A G Okhrimchuk, A V Shestakov. Absorption saturation mechanism for YAG:Cr⁴⁺ crystal [J]. Phys Rev B, 2000, 61(2): 988-995.
- 4 Y Wang, M Gong, P Yan, *et al.*. Stable polarization short pulse passively Q-switched monolithic microchip laser with [110] cut Cr⁴⁺:YAG [J]. Laser Phys Lett, 2009, 6(11): 788-790.
- 5 W Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Berlin: Springer, 2003.
- 6 S D Jackson, J A Piper. Thermally induced strain and birefringence calculations for a Nd:YAG rod encapsulated in a solid pump light collector [J]. Appl Opt, 1996, 35(9): 1409-1423.
- 7 W Koechner, D K Rice. Effect of birefringence on the performance of linearly polarized YAG:Nd lasers [J]. IEEE J Quantum Electron, 1970, 6(9): 557-566.
- 8 Walter Koechner, Dennis K Rice. Birefringence of YAG:Nd laser rods as a function of growth direction [J]. J Opt Soc Am, 1970, 61(6): 758-766.
- 9 L N Soms, A A Tarasov, V V Shashkin. Problem of depolarization of linearly polarized light by a YAG:Nd³⁺ laser-active element under thermally induced birefringence conditions [J]. Sov J Quantum Electron, 1980, 10(3): 350-351.
- 10 I Shoji, T Taira. Intrinsic reduction of the depolarization loss in solid-state lasers by use of a [110]-cut Y₃Al₅O₁₂ crystal [J]. Appl Phys Lett, 2002, 80(17): 3048-3050.
- 11 O Puncken, H Tünnermann, J J Morehead, *et al.*. Intrinsic reduction of the depolarization in Nd:YAG crystals [J]. Opt Express, 2010, 18(19): 20461-20474.
- 12 H Tünnermann, O Puncken, P Weßels, *et al.*. Linearly polarized single-mode Nd:YAG oscillators using [100]- and [110]-cut crystals [J]. Opt Express, 2011, 19(14): 12922-12999.
- 13 Zhe Sun, Qiang Li, Menghua Jiang, *et al.*. Improvement of the linearly polarized output power in Nd:YAG laser with [100]-cut rod [J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(s1): S11402.
- 14 N V Kravtsov, E G Lariontsev, N I Naumkin. Dependence of polarisation of radiation of a linear Nd:YAG laser on the pump radiation polarisation [J]. Quantum Electron, 2004, 34(9): 839-842.
- 15 M Lukae, S Troit, M KaZiE. Flip-flop polarization effect in cube-corer-flat cavity Nd:YAG laser [J]. IEEE J Quantum Electron, 1992, 28(11): 2560-2562.
- 16 Zhe Sun, Qiang Li, Yanli Su, *et al.*. Controllable polarization for passively Q-switched Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG laser [J]. Opt & Laser Technology, 2014, 56: 269-272.

栏目编辑:何卓铭