

## 3.2 ns 高峰值功率 YAG/Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 键合晶体被动调 Q 径向偏振微片激光器

韩侠辉 夏克贵 李桂运 李建郎

中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

**摘要** 实验利用 YAG/Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 键合晶体和光子晶体光栅镜获得高峰值功率和高光束质量的被动调 Q 径向脉冲激光输出, 激光器的输出功率达到 435 mW, 斜率效率为 14.7%。在吸收抽运功率为 6.8 W 时, 输出激光脉冲的峰值功率达到 15.7 kW, 脉冲能量达到 50.1 μJ, 脉冲宽度为 3.2 ns, 重复频率为 8.1 kHz, 径向偏振纯度为 95.8%。实验中的晶体均采用 <111> 的切割方向, 输出径向偏振光束的均匀性得到提高。

**关键词** 激光器; 被动调 Q; 键合晶体; 矢量光束; 径向偏振

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0702010

## 3.2 ns High Peak Power Radially Polarized Pulsed Output from Passively Q-Switched Microchip Laser with Composite Structure of YAG/Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG Crystal

Han Xiahui Xia Kegui Li Guiyun Li Jianlang

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

**Abstract** High peak power radially polarized laser pulse is obtained from a passively Q-switched microchip laser with composite structure of YAG/Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG crystal and photonic crystal grating mirror as the polarization-selective output coupler. The average output power is 435 mW and a slope efficiency is 15.7%. The laser pulse output has a maximum peak power of 15.7 kW, a minimum pulse duration of 3.2 ns, and repetition rate of 8.1 kHz at absorbed pump power of 6.5 W. The polarization degree of the radially polarized pulse is measured to be as high as 95.8%. All of the crystals in the experiment are <111> cut which is more beneficial for this laser to improve the uniformity of output radially polarized beam.

**Key words** lasers; passively Q-switch; composite crystal; vector beams; radially polarization

**OCIS codes** 140.3480; 140.3530; 140.3540; 140.3580; 140.3945

### 1 引 言

近年来, 矢量偏振光束由于所具有的独特性质而得到了越来越多研究人员的关注<sup>[1-2]</sup>。径向偏振光束即作为一种常见的矢量偏振光束, 其振幅和偏振方向都具有轴对称性而且任意位置处的偏振方向都沿着半径方向<sup>[3]</sup>。径向偏振光束具有紧聚焦的特性, 经过高数值孔径(NA)的透镜聚焦后具有更小的焦斑尺寸而且焦点附近会形成一个很强的纵向电场<sup>[4]</sup>, 可以应用于高分辨成像<sup>[5]</sup>、粒子捕获<sup>[6]</sup>和电子加速<sup>[7]</sup>等方面。此外, 相比传统的线偏振光和圆偏振光, 金属材料对径向偏振光具有更大的吸收系数, 因而径向偏振光在工业加工领域也具有广阔的应用前景<sup>[8]</sup>。由于径向偏振光束是一种轴对称性的矢量偏振光束, 光束中心位置处是一个振

收稿日期: 2015-02-02; 收到修改稿日期: 2015-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(61275206, 61475166)、青年自然科学基金(61405226)、上海市青年自然科学基金(14ZR1445200)

作者简介: 韩侠辉(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事新型固体激光器方面的研究。E-mail: hxiahui@163.com

导师简介: 李建郎(1970—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事新型固态激光器技术等方面的研究。

E-mail: apuli@siom.ac.cn(通信联系人)

幅奇点,使得径向偏振光束一般具有环形光束的形式。当被应用于激光光镊时,这种空心的环形光束具有更好的微粒操控能力<sup>[9]</sup>。另外,将环形光束应用于生物荧光超分辨显微镜中可以实现超越衍射极限的显微效果。但很多应用均需要高峰值功率和短脉宽的径向偏振激光脉冲,而被动调 $Q$ 激光技术是获得这种激光脉冲的一种简单常见的方法。

2008年,Li等<sup>[10]</sup>利用光子晶体光栅镜(PCG)作为径向偏振的选模元件,在Nd:YAG陶瓷微片上获得峰值功率为759 W、脉冲宽度为86 ns的径向偏振被动调 $Q$ 脉冲输出。激光陶瓷的制造工艺和增益介质中热效应的影响限制了激光输出特性的进一步提高。2011年,Xia等<sup>[11]</sup>利用Nd:YAG键合晶体块代替Nd:YAG陶瓷微片,将被动调 $Q$ 径向偏振激光脉冲的峰值功率提高到1.5 kW,脉冲宽度压缩到18.9 ns。2014年,Chang等<sup>[12-13]</sup>报道了基于其他选模方式的被动调 $Q$ 的矢量偏振脉冲激光器的输出峰值功率为几个千瓦,脉冲宽度为几十纳秒。根据被动调 $Q$ 理论<sup>[14]</sup>,激光谐振腔的腔长越短,输出激光脉冲的宽度越短,峰值功率越高。文献[10-13]中,由于可饱和吸收体 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 和增益介质之间采用的是分离式的结构,或者是由于激光腔内插入的选模元件的影响,激光器的腔长不能进一步缩短,限制了激光器输出脉冲宽度的压缩和峰值功率的提高。此外,虽然YAG晶体是各向同性的,但研究表明,某些切向的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的透过率具有一定的偏振选择性,只有 $\langle 111 \rangle$ 切向的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的透过率对激光的偏振不敏感<sup>[15-16]</sup>。另外,Nd:YAG中的热致双折射特性也与其切割方向有关,只有 $\langle 111 \rangle$ 切向的Nd:YAG晶体热致折射率的变化具有轴对称性<sup>[17]</sup>。由于矢量偏振光束一般具有轴对称的环状光强分布,因此,在矢量偏振的激光器中,Nd:YAG和 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体都应采用 $\langle 111 \rangle$ 切向。如果不注意晶体的切向,激光器输出的矢量偏振光束的均匀性会受影响<sup>[10-12]</sup>。

为了获得高峰值功率和短脉宽的被动调 $Q$ 径向偏振激光脉冲,激光增益晶体Nd:YAG和被动调 $Q$ 晶体 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 之间采用热键合的结构,有效缩短了激光谐振腔的长度。光子晶体光栅镜作为输出耦合镜又可以实现对径向偏振的选模作用。由于腔内不需要加入额外的选模元件,激光器结构简单而紧凑。整个激光谐振腔的长度缩短到8 mm,输出脉冲的宽度压缩到3.2 ns,峰值功率提高到15.7 kW。另外,由于实验中Nd:YAG晶体和 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体都采用了 $\langle 111 \rangle$ 切向,输出的空心环形光束的均匀性得到提高。

## 2 实验装置

基于YAG/Nd:YAG/ $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 键合晶体的被动调 $Q$ 径向偏振微片激光器的实验装置如图1所示。抽运源为光纤耦合输出半导体激光器(LD),LD的中心波长为808 nm,耦合光纤的纤芯直径为400  $\mu\text{m}$ ,NA为0.22。实验中YAG/Nd:YAG/ $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的各部分采用热扩散的方式键合在一起,YAG、Nd:YAG、 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 都采用 $\langle 111 \rangle$ 切向,长度分别为1.5、1.5、0.85 mm。前端键合的未掺杂的YAG晶体由于对抽运光无吸收,因而没有热量产生,可以有效减小晶体前端面上膜的热形变;另外,采用键合结构可以有效缩短激光腔的长度,有利于获得高峰值功率和高光束质量的短脉冲被动调 $Q$ 激光输出。键合晶体的前表面S1镀有对808 nm的增透膜和对1064 nm的高反膜,后表面S2镀有对1064 nm的增透膜。晶体直径为5 mm,侧面用铜块包裹,铜块内通有23  $^{\circ}\text{C}$ 的冷却水。实验中Nd:YAG晶体的掺杂粒子数分数为1.1%, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的初始透过率为0.84。光子晶体光栅镜在1064 nm处对径向偏振光的反射率为90%,对切向偏振完全透过,可以用来选出径向偏振模式并用作输出耦合镜,激光器的腔长为8 mm。

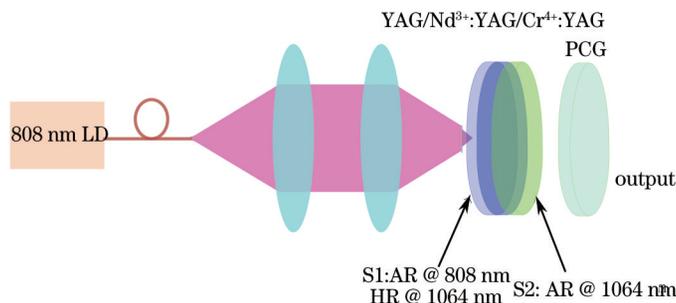


图1 被动调 $Q$ 径向偏振YAG/Nd:YAG/ $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 薄片激光器实验装置图

Fig.1 Experimental setup of radially polarized passively  $Q$ -switched YAG/Nd:YAG/ $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  microchip laser

### 3 实验结果与讨论

调节光子晶体光栅镜使其位于激光谐振腔轴线的中心,逐步增加LD的抽运功率使其超过激光器的阈值,激光器开始输出被动调Q的环形激光脉冲。激光器输出的激光脉冲的平均功率随激光晶体吸收的抽运功率的变化曲线如图2所示。

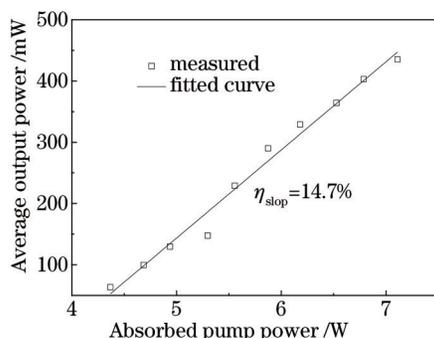


图2 激光器输出的平均功率随吸收的抽运功率的变化曲线

Fig.2 Average output power of the laser versus the absorbed pump power

从图2可以看出,当吸收的抽运功率为4.4 W时,激光器达到阈值。在阈值以上激光器输出的平均功率随吸收抽运功率线性增加,斜率效率为14.7%。当吸收抽运功率为7.5 W时,激光器的输出功率达到435 mW,此时激光器还没有出现饱和现象,如果进一步增大抽运功率,激光器的输出功率还可以进一步提高。这是由于为了增加激光器的输出能量,压缩脉冲宽度,根据被动调Q理论<sup>[14]</sup>对激光器的参数进行优化设计而选择的可饱和吸收体的初始透过率较低,这会增加激光器的损耗,使得斜率效率下降。图3(a)、(b)分别给出了吸收抽运功率为5.3 W时,示波器测得的单个脉冲的波形和调Q脉冲序列。从图3中可以看出,此时激光器输出脉冲的半峰全宽(FWHM)为3.2 ns,脉冲的重复频率为5.3 kHz。

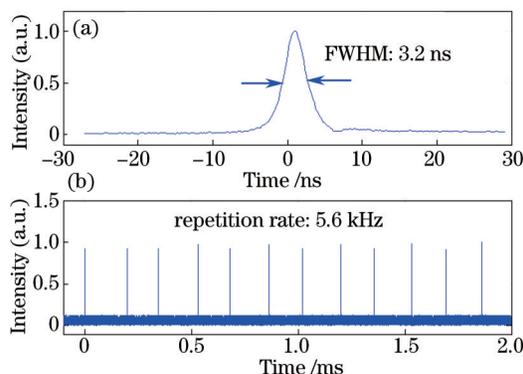


图3 吸收抽运功率为5.3 W时,示波器测得的(a)单个脉冲波形和(b)调Q脉冲序列

Fig.3 Observed oscilloscope traces of (a) laser pulse envelope and (b) pulse train when absorbed pump power is 5.3 W

图4和图5给出了输出脉冲的重复频率、脉冲宽度、峰值功率、脉冲能量随吸收抽运功率的变化关系。从图4中可以看出,输出脉冲的重复频率随抽运近似线性增加;在抽运较弱时,脉冲宽度随抽运的增强而变窄,但当吸收的抽运功率大于5.3 W时,脉冲宽度保持在3.2 ns不再减小。从图5中可以看出,随着抽运的增强,脉冲的峰值功率和脉冲能量均有增大的趋势。当吸收抽运为6.8 W时,脉冲的峰值功率达到15.7 kW,脉冲能量达到50.1 μJ,相对应的脉冲宽度为3.2 ns,重复频率为8.1 kHz。

在吸收抽运功率为5.3 W时,用电荷耦合元件(CCD)相机采集的激光器输出光斑图样如图6所示。从图6(a)可以看出,激光器输出的是环形的空心光斑。图6(b)~(e)是激光光束通过不同取向的线偏振片后的光斑图样。从中可以看出激光光束通过线偏振片后变成与线偏振片偏振取向相同的两个边瓣,由此可以推断出激光器输出的是径向偏振光束。图7(a)~(b)分别是激光器输出的环形空心光束在x和y方向上的光强分布和利用LG<sub>01</sub>\*模式的强度分布曲线对测量数据进行拟合的结果。从图7中可以看出x和y方向上测量结果与理论结果都符合得很好,可以判定激光器输出的是径向偏振的LG<sub>01</sub>\*模式,而且环形的均匀性很好。为了测量

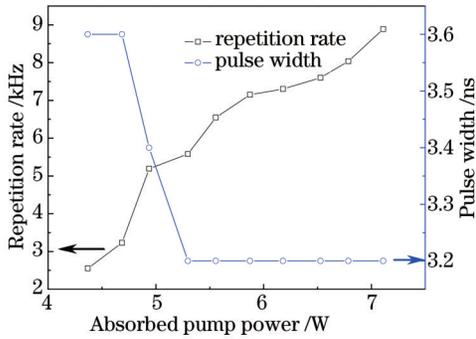


图4 脉冲重复频率和脉冲宽度随吸收抽运功率的变化曲线

Fig.4 Repetition rate and pulse width versus absorbed pump power

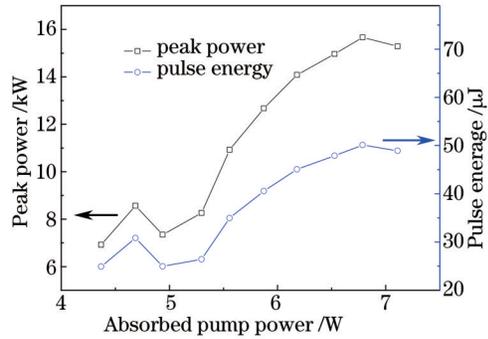


图5 峰值功率和脉冲能量随吸收抽运功率的变化曲线

Fig.5 Peak power and pulse energy versus absorbed pump power

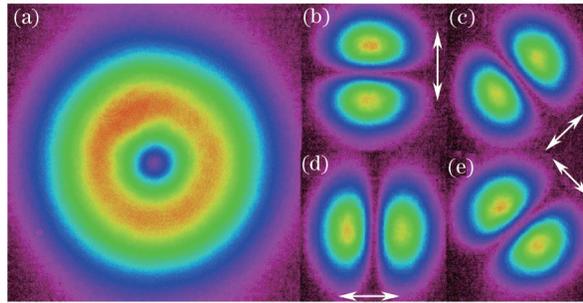


图6 在吸收抽运功率为5.3 W时,(a) 输出激光的全光斑图样;(b)~(e) 通过不同取向的线偏振片后的光斑图样(箭头表示线偏振片的取向)

Fig.6 (a) Intensity distribution of the full beam profile when absorbed pump power is 5.3 W; (b)~(e) variations of intensity distribution of the passage beam through the polarizer analyzer with different orientations of the polarizer axes (where white arrows indict the directions of the polarizer analyzer's axis)

输出激光光束的径向偏振纯度,在激光器输出镜后1.2 m处,用一个直径约为200  $\mu\text{m}$ 的孔径光阑在整个光斑上选取一点测量其偏振特性。此时,整个光斑的直径约为2.5 mm,远大于光阑孔径的尺寸。由于径向偏振光束光斑上各个位置处的偏振方向沿径向分布,因而可以用通过该光阑后的光束的线偏振度表示径向偏振的纯度。在吸收抽运功率为5.3 W时,测得的偏振消光比为46:1,偏振纯度为95.8%。

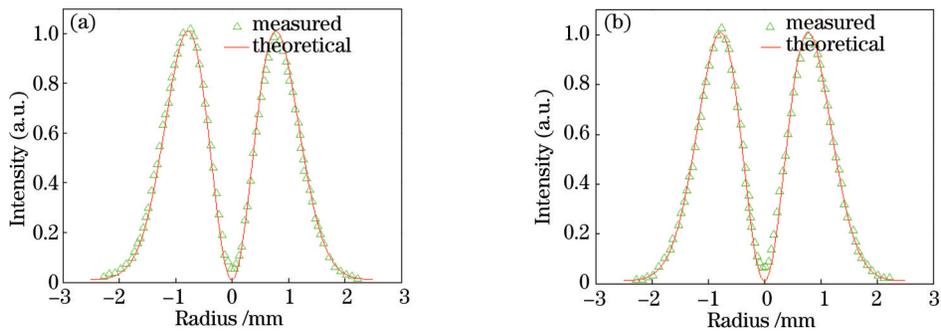


图7 吸收抽运功率为5.3 W时,环形空心光在(a)水平和(b)垂直方向上的光强分布和拟合曲线

Fig.7 (a) Horizontal and (b) vertical intensity distributions and fitted curves of the doughnut-shaped laser mode when absorbed pump power is 5.3 W

目前,在基模运转的被动调Q薄片激光器中,已经能够实现亚纳秒量级的激光脉冲输出。这种高峰值功率和极短脉宽的被动调Q激光脉冲在很多情况下具有特殊的应用。根据被动调Q理论<sup>[14]</sup>,通过降低可饱和吸收体的初始透过率,可以减小输出激光脉冲的脉宽,提高脉冲的能量。为了获得亚纳秒量级的被动调Q径向偏振激光脉冲,用另一块YAG/Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG结构的键合晶体(各部分的长度分别为1、2.5、1.5 mm,Cr<sup>4+</sup>:YAG的初始透过率为0.4)做对比实验。利用激光器的速率方程理论进行数值模拟,可以计算出在此配置下,激光器的输出脉冲宽度为314 ps。然而,实验中出现了光子晶体光栅镜被打坏的情况。作为径向偏振

选择元件的光子晶体光栅镜是由多层具有高低折射率的 $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 与 $\text{SiO}_2$ 的亚波长锯齿状光栅堆栈而成。由于 $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 材料的损伤阈值相对较低,因此当激光器的输出脉冲的脉宽降低到皮秒量级时,脉冲的峰值功率达到 $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 材料的损伤阈值,造成光子晶体光栅镜的损坏。因此,下一步工作将集中在通过增加输出耦合镜的透过率以降低激光腔内的能量或者使用由具有更高损伤阈值的材料制造的光子晶体光栅镜以期获得皮秒量级的高峰值功率径向偏振激光脉冲。

## 4 结 论

利用YAG/Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG键合晶体和光子晶体光栅镜,实验得到高峰值功率和高光束质量的被动调Q径向脉冲激光输出。输出激光脉冲的峰值功率达到15.7 kW,脉冲能量达到50.1  $\mu\text{J}$ ,脉冲宽度为3.2 ns,重复频率为8.1 kHz。与已有文献中报道的结果相比,激光脉冲的峰值功率提高了一个数量级,脉冲宽度压缩了一个数量级,而且该激光器结构简单紧凑,使径向偏振光束向工业化应用又迈进一步。另外,由于考虑到晶体切向对径向偏振激光器光束均匀性的影响,实验中晶体都采用<111>的切割方向,输出光斑的均匀性也得到提高。

## 参 考 文 献

- 1 Xia Kegui, Li Jianlang. Recent development in radially polarized solid-state laser with composite laser crystal[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(8): 080015.  
夏克贵, 李建郎. 基于键合晶体的径向偏振固体激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8): 080015.
- 2 Li Zhengwei, Chen Meng, Li Gang. Side-pumped Nd:YAG mode-locked radially polarized laser[J]. Chinese J lasers, 2014, 41(1): 0102006.  
李政委, 陈 檬, 李 港. 侧面抽运Nd:YAG锁模径向偏振光[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0102006.
- 3 Qiwen Zhan. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications[J]. Adv Opt Photonics, 2009, 1(1): 1-57.
- 4 Qiwen Zhan, James R Leger. Focus shaping using cylindrical vector beams[J]. Opt Express, 2002, 10(7): 324-331.
- 5 Yuichi Kozawa, Terumasa Hibi, Aya Sat, *et al.*. Lateral resolution enhancement of laser scanning microscopy by a higher-order radially polarized mode beam[J]. Opt Express, 2011, 19(17): 15947-15954.
- 6 Youyi Zhuang, Yaoju Zhang, Biaofeng Ding, *et al.*. Trapping rayleigh particles using highly focused higher-order radially polarized beams[J]. Opt Commun, 2011, 284(7): 1734-1739.
- 7 Lin Dai, Jianxing Li, Weiping Zang, *et al.*. Vacuum electron acceleration driven by a tightly focused radially polarized Gaussian beam[J]. Opt Express, 2011, 19(10): 9303-9308.
- 8 V G Niziev, A V Nesterov. Influence of beam polarization on laser cutting efficiency[J]. J Phys D: Appl Phys, 1999, 32(13): 1455-1461.
- 9 Luo Wei, Cheng Shubo, Yuan Zhangzhong, *et al.*. Power-exponent-phase vortices for manipulating particles[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1109001.  
罗 伟, 程书博, 袁战忠, 等. 幂指数相位涡旋光束用于微粒操控[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1109001.
- 10 Jianlang Li, Kenichi Ueda, Mitsuru Musha, *et al.*. Radially polarized and pulsed output from passively Q-switched Nd:YAG ceramic microchip laser[J]. Opt Lett, 2008, 33(22): 2686-2688.
- 11 Kegui Xia, Jianlang Li. Radially polarized and passively Q-switched Nd:YAG laser with composite structure of gain medium[J]. Chin Opt Lett, 2011, 9(10): 101402.
- 12 Kenchia Chang, Donglin Li, Mingdar Wei. Self-sustaining azimuthal polarization in a passively Q-switched Nd:GdVO<sub>4</sub> laser with a Cr<sup>4+</sup>:YAG saturable absorber[J]. JOSA B, 2014, 31(2): 382-386.
- 13 Zhiqiang Fang, Kegui Xia, Yao Yao, *et al.*. Radially polarized and passively Q-switched Nd:YAG laser under annular-shaped pumping[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electron, 2015, 21(1): 1600406.
- 14 John J Degnan. Optimization of passively Q-switched lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electron, 1995, 31(11): 1890-1901.
- 15 H Eilers, K R Hoffman, W M Dennis, *et al.*. Saturation of 1.064  $\mu\text{m}$  absorption in Cr,Ca:Y<sub>3</sub>A<sub>15</sub>O<sub>12</sub> crystals[J]. Appl Phys Lett, 1992, 61(25): 2958-2960.
- 16 H Sakai, A Sone, H Kan, *et al.*. Polarization stabilizing for diode-pumped passively Q-switched Nd:YAG microchip lasers[C]. Advanced Solid-State Photonics, 2006: MD2.
- 17 Oliver Puncken, Henrik Tünnermann, James J Morehead, *et al.*. Intrinsic reduction of the depolarization in Nd:YAG crystals[J]. Opt Express, 2010, 18 (19): 20461-20474.