

基于圆环达曼光栅整形的环形光抽运的Nd:YAG声光调 Q 涡旋光激光器

徐 云 余俊杰 韩侠辉 李桂运 夏克贵 周常河 李建郎

中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

摘要 研究了圆环达曼光栅(CDG)整形的环形光抽运的声光调 Q Nd:YAG 激光器。该激光器的腔体由激光晶体、声光调制器以及平面输出耦合镜组成。所用抽运源为光纤耦合 808 nm 半导体激光器,其发射光经过 CDG 发生一级衍射,产生的环形光场强度分布用于端面抽运 Nd:YAG 激光晶体。实验获得了高光束质量、线偏振、且具有螺旋相位的主动调 Q 脉冲光输出。当吸收抽运功率为 5.6 W、声光调制器工作频率为 5 kHz 时,激光脉冲的平均功率为 470 mW,峰值功率达到 588 W,脉冲宽度为 160 ns。

关键词 激光器;声光调 Q;圆环达曼光栅;光束整形;涡旋光

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0601002

Acousto-Optically Q-Switched and Vortex Nd:YAG Laser by Using Circular Dammann Grating for Annular Pumping

Xu Yun Yu Junjie Han Xiahui Li Guiyun Xia Kegui Zhou Changhe Li Jianlang

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

Abstract An acousto-optically Q-switched vortex Nd:YAG laser by annular pumping of circular Dammann grating (CDG) shaping is investigated. The cavity of the laser is composed of a laser crystal, an acousto-optical modulator and a planar output coupling mirror. The pump source is a fiber coupling semiconductor laser of 808 nm. The annular intensity distribution of pump light is formed by the first-order diffraction of a CDG with high diffraction efficiency, which is used to end pumped Nd:YAG laser crystal. The active Q-switch pulse laser is obtained with high optical quality, linear polarization and spiral phase. The obtained power of laser pulse is 470 mW, the peak power of laser pulse reaches 588 W and pulse width is 160 ns, when the absorbed pump power is 5.6 W and the frequency of acousto-optical modulator is 5 kHz.

Key words lasers; acousto-optically Q-switch; circular Dammann grating; beam reshaping; vortex beam

OCIS codes 140.3580; 140.3540; 140.3530; 140.3480

1 引 言

近年来,涡旋光束因为其独特的光学性质受到越来越多的关注。拉盖尔-高斯(LG)光束就是一种典型的涡旋光束,由于具有一个螺旋相位因子,在沿着光束传播方向将形成螺旋形的波前相位,具有轨道角动量^[1-2];另外,在其光束的中心位置处是一个相位奇点,因而中心的光强为 0,使得其光强一般具有“面包圈”状的环形分布^[3]。这些特性使得涡旋光束在光学操纵^[4-6]、材料处理^[7]、超分辨显微镜^[8-9]、量子密码和量子通信^[10-11]等领域具有重要的应用前景。然而很多应用需要高效高质量的短脉冲、高峰值功率的激光光源,调 Q 技术是获得这种激光脉冲的简单常见的方法。

收稿日期: 2016-01-12; **收到修改稿日期:** 2016-02-24

基金项目: 国家自然科学基金(61275206, 61475166)

作者简介: 徐 云(1991-),女,硕士研究生,主要从事固体激光器方面的研究。E-mail: xuyunlife@163.com

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

E-mail: apuli@siom.ac.cn(通信联系人)

目前,产生涡旋光的方法主要有被动法和主动法。被动法是通过一些转换元件,比如柱透镜^[12]、螺旋相位板^[13]等,在腔外将高斯模式转换为 LG 模式。但是,通过被动转换的方法得到的涡旋光束一般光束质量较差,而且转换效率较低、并且不能用于高功率情况。因而,为了获得高功率、高光束质量的涡旋光,一般采用主动法,即直接在激光谐振腔中获得涡旋光束输出。由于具有螺旋相位分布的 LG₀₁ 模式具有环形的强度分布,所以可使用环形抽运光从增益介质的端面抽运激光器,实现激发光与抽运光模式的空间匹配,从而让激光器直接高效地输出涡旋光束。基于这一选模机理, Kim 等^[14]利用中空光纤将半导体激光器(LD)输出光转换为环形抽运光,搭建了一台环形光抽运、声光调 Q 的 Nd:YAG 涡旋激光器。Fang 等^[15]通过多模光纤离焦耦合的方式获得环形的抽运光,再用其抽运 Nd:YAG 晶体,通过在谐振腔内插入可饱和吸收体 Cr⁴⁺:YAG 获得了具有螺旋相位的脉冲激光输出。然而,上面两种获得环形抽运的方法都需要将 LD 输出的抽运光束重新耦合进光纤结构中,使得整个抽运光转换系统结构复杂且稳定性较低。可以直接将圆环达曼光栅(CDG)插入到传统的端面抽运激光器抽运系统中,将抽运光调制成了环形分布,从而实现了在激光器中直接输出涡旋光束。

CDG 是一种具有轴对称结构的二元相位光栅,由 Zhou 等^[16-17]发明,其相位结构沿半径方向呈周期分布。当平行光束入射到该光栅时,沿光束截面的半径方向交替产生 0、 π 周期性相移,在远场处形成多个不同衍射阶次的等强度环形分布或者单阶的衍射圆环,并且具有很高的衍射效率(一阶衍射的效率理论上可达 85% 以上),并且远场处的衍射环大小可通过改变聚焦透镜的焦距来控制。基于此考虑,本文设计制作了一个一阶 CDG,利用其产生的衍射环来抽运 Nd:YAG 固体激光器。该激光器的腔体由激光晶体和一个平面输出耦合镜组成,通过在谐振腔内插入声光调 Q 晶体,实现了 LG₀₁ 模式的激光脉冲输出。研究表明,基于 CDG 整形的环形光抽运 Nd:YAG 激光器可有效运行于主动调 Q 机制,输出纳秒宽度的涡旋激光脉冲,且该激光系统具有简单易调、成本低、结构紧凑等优点。

2 实验装置

基于 CDG 的声光调 Q Nd:YAG 激光器实验装置如图 1 所示。抽运源为光纤耦合输出的 LD,其输出激光的中心波长为 808 nm,尾纤的纤芯直径为 100 μm 、数值孔径(NA)为 0.22。LD 尾纤输出的抽运光由非球面透镜 L_1 (焦距为 f_1)准直后再由另一片非球面透镜 L_2 (焦距为 f_2)聚焦, L_1 和 L_2 之间插入一阶 CDG(有效通光孔径为 8 mm,光栅周期为 20 μm),将准直后近似于平行光的抽运光转换为环形抽运光。

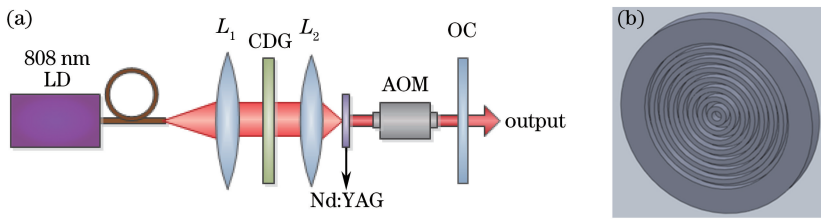


图 1 (a) 基于 CDG 的声光调 Q 激光器实验装置图; (b) CDG 示意图

Fig. 1 (a) Experimental setup of acousto-optically Q-switched laser based on a CDG;
(b) schematic diagram of the CDG

实验中所用的增益介质为 Nd:YAG 晶体,晶体直径为 10 mm,长度为 2 mm,其中 Nd³⁺ 的原子数分数为 1.0%。激光晶体的前表面镀 808 nm 的增透膜和 1064 nm 的全反膜,作为激光腔的前腔镜,其后表面镀 1064 nm 的增透膜。激光晶体夹持在两片铜质热沉之间。两铜质热沉的中心均有 2 mm 的通光孔,与 Nd:YAG 晶体后表面接触的热沉通有 23 $^{\circ}\text{C}$ 的冷却水。激光器输出耦合镜采用对 1064 nm 透射率为 2% 的平面镜,并放置在距离激光晶体前表面 135 mm 处。

透镜 L_1 和 L_2 的不同组合会对整形后的抽运光斑大小有影响, Li 等^[18]对其进行了研究,在 6 种不同组合下分别获得连续涡旋激光输出(每组 L_1 和 L_2 的焦距分别为 $f_1 = 25.4$ mm 和 $f_2 = 25.4$ mm、 $f_1 = 25.4$ mm 和 $f_2 = 15$ mm、 $f_1 = 15$ mm 和 $f_2 = 15$ mm、 $f_1 = 11$ mm 和 $f_2 = 10$ mm、 $f_1 = 11$ mm 和 $f_2 = 8$ mm、 $f_1 = 15$ mm 和 $f_2 = 8$ mm),文献[18]对其进行了详细的分析,在此不再赘述。在连续涡旋激光器实

验中, $f_1 = 15 \text{ mm}$ 和 $f_2 = 8 \text{ mm}$ 这一组合得到的激光输出的效率最高, 且入射到激光晶体的抽运光斑最小, 更易实现激光腔的模式匹配, 故在声光调 Q 涡旋光激光器实验中直接采用这一透镜组合 ($f_1 = 15 \text{ mm}$ 和 $f_2 = 8 \text{ mm}$)。

实验中使用的声光调 Q 开关为型号为 QS27-8C-B 的调制器 (Gooch & Housego 公司), 其通光孔径为 8 mm , 最高调制频率为 27.15 MHz 。使用激光功率计测量输出激光功率, 使用电荷耦合器件 (CCD) 测量输出激光模场的强度分布。使用 300 MHz 的数字式示波器观察记录采集到的脉冲序列和脉冲形状。

3 实验结果与讨论

将声光晶体调至工作状态, 逐步增加 LD 的抽运功率使其超过激光器的阈值, 激光器开始输出主动调 Q 的环形激光脉冲。不同脉冲重复频率下, 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 P_{abs} 的变化曲线如图 2 所示。

从图中可以看出, 当 $P_{\text{abs}} = 1.8 \text{ W}$ 时, 激光器达到阈值, 且在一定脉冲重复频率下, 输出激光的平均功率随抽运功率的增加而增加。当脉冲重复频率为 5 kHz 时, 斜率效率为 10.5% , 在 $P_{\text{abs}} = 5.7 \text{ W}$ 时, 最高获得 479 mW 的激光输出, 继续增大抽运功率, 出现饱和现象。当脉冲重复频率为 7 和 10 kHz 时, 输出激光的平均功率随吸收抽运功率的变化曲线不再是线性的, 而是中间出现明显的平缓区, 这可能是因为随着脉冲重复频率的增加, 激光晶体的热透镜效应逐渐明显。

同时测量了输出激光的光谱 (图 3), 其中心波长为 1064.22 nm , 光谱宽度为 1.86 nm 。

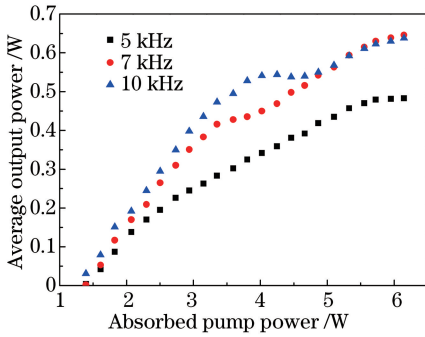


图 2 不同脉冲重复频率下, 输出激光的平均功率随吸收抽运功率的变化曲线

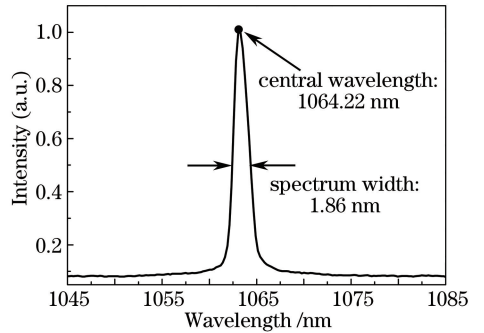


图 3 $P_{\text{abs}} = 5.1 \text{ W}$ 时输出激光的光谱
Fig. 3 Spectrum of output laser at $P_{\text{abs}} = 5.1 \text{ W}$

Fig. 2 Average output power of the laser versus the absorbed pump power at different pulse repetition frequencies

输出激光的强度分布如图 4 所示。当抽运功率一定时, 不同脉冲重复频率下输出激光均保持环形分布; 当脉冲重复频率一定时, 输出激光在一定吸收抽运功率范围内均保持较好的环形分布。

当 $P_{\text{abs}} = 5.1 \text{ W}$ 、 $f = 5 \text{ kHz}$ 时, 激光器输出激光的光强分布和利用 LG_{01} 模式强度分布曲线拟合结果如

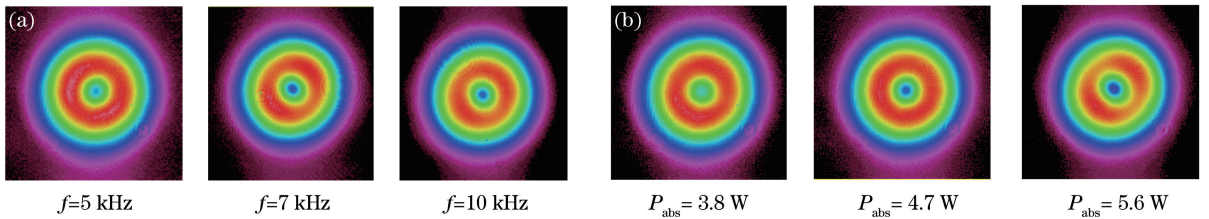


图 4 (a) 当 $P_{\text{abs}} = 5.1 \text{ W}$ 时, 不同脉冲重复频率下输出激光的强度分布;
(b) 当 $f = 5 \text{ kHz}$ 时, 不同吸收抽运功率下输出激光的强度分布

Fig. 4 (a) Variation of intensity distributions of output laser with pulse repetition frequencies when $P_{\text{abs}} = 5.1 \text{ W}$; (b) variation of intensity distributions of output laser with absorbed pump powers when $f = 5 \text{ kHz}$

图 5(a)所示,从中可以看出,测量结果与理论都符合得较好,且空心光束的均匀性很好。为了进一步分析输出激光的模式,测量了其光束质量 M^2 ,并对测量曲线进行拟合,得到输出空心光束的 $M^2 = 2.2$,接近于理想的 LG_{01} 模的 $M^2 = 2$,结果如图 5(b)所示,再次印证了所得激光为 LG_{01} 模式。由于实验中所用的声光调 Q 晶体工作于压缩波模式(C 模式),声波作用与激光束的偏振态有关,其调制效率相对于某一特定偏振的激光具有较高的效率,对输出激光进行偏振态检测,结果显示输出激光均保持稳定的线偏振,偏振消光比为 369:1,对应 99% 的偏振纯度。

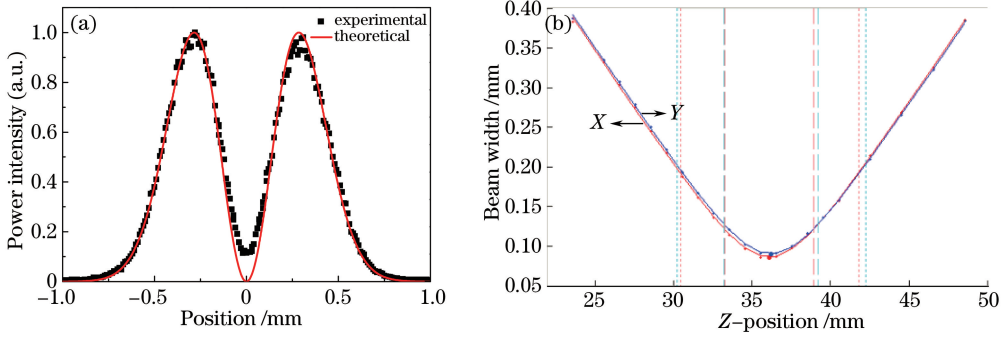


图 5 当 $P_{\text{abs}} = 5.1 \text{ W}$ 、 $f = 5 \text{ kHz}$ 时,输出激光的(a)强度分布及拟合曲线;
(b)水平方向和竖直方向上的光束半径及拟合曲线

Fig. 5 (a) Intensity distribution and fitted curve; (b) beam radii and fitted curve in horizontal and vertical directions of the output laser when $P_{\text{abs}} = 5.1 \text{ W}$, $f = 5 \text{ kHz}$

利用马赫-曾德尔干涉仪^[3,19-20]对输出激光的相位结构进行测量,其干涉图如图 6 所示。可以看到出现了叉形条纹,表明输出激光带有螺旋相位,拓扑电荷为 1。综上分析可以得出输出激光为线偏振的涡旋 LG_{01} 模。

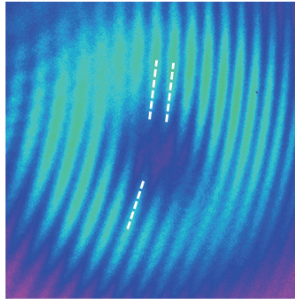


图 6 输出激光束与参考平面波的干涉实验图样

Fig. 6 Measured interference pattern between the output laser beam and reference plane wave

在对激光器输出光束的模式、偏振态和相位进行分析之后,下面对激光器输出的脉冲特性进行测量。图 7 为 $P_{\text{abs}} = 5.1 \text{ W}$ 、 $f = 5 \text{ kHz}$ 时的脉冲序列和脉冲形状。从图中可以看出,此时输出脉冲的重复频率为

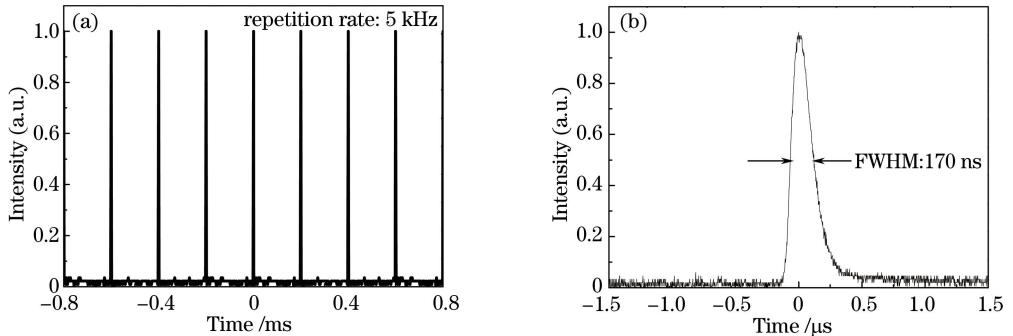


图 7 $P_{\text{abs}} = 5.1 \text{ W}$ 、 $f = 5 \text{ kHz}$ 时的(a)脉冲序列; (b)单脉冲形状

Fig. 7 (a) Laser pulse train; (b) single pulse envelope when $P_{\text{abs}} = 5.1 \text{ W}$, $f = 5 \text{ kHz}$

5 kHz,半峰全宽(FWHM)为 170 ns。

图 8 为给定脉冲重复频率下,输出激光的脉冲宽度、峰值功率、脉冲能量随吸收抽运功率的变化曲线。从中可以看出,随着吸收抽运功率的增加,输出脉冲的宽度从 3.5 W 时的 204 ns 逐渐减小至 5.6 W 时的 160 ns;在实验所用的抽运功率范围内,脉冲的峰值功率和脉冲能量随吸收抽运功率的增加均保持近似线性的增加。当 $P_{\text{abs}}=5.6$ W 时,脉冲的峰值功率达到 588 W,脉冲能量达到 94 μJ 。

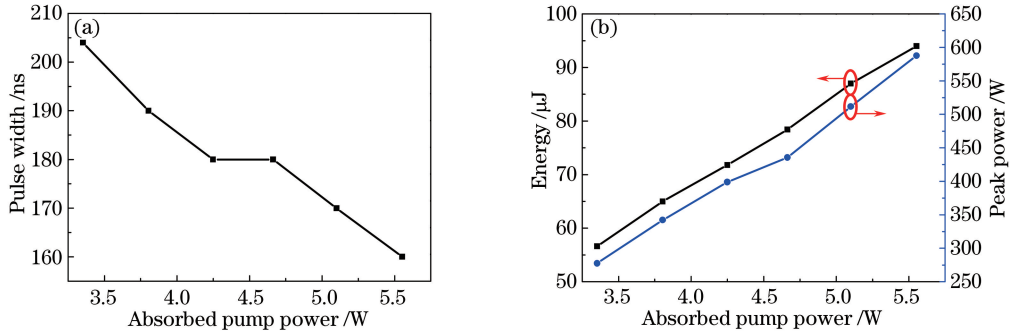


图 8 当 $f=5$ kHz 时,输出激光的(a)脉冲宽度;(b)脉冲能量和峰值功率随吸收抽运功率的变化曲线

Fig. 8 (a) Pulse width and (b) pulse energy and peak power versus absorbed pump power when $f=5$ kHz

4 结 论

通过在传统的端面抽运激光器抽运系统中引入一阶 CDG,实现了声光调 Q 的高光束质量的线偏振脉冲涡旋光束输出。当 $P_{\text{abs}}=5.6$ W,声光调 Q 开关工作于 5 kHz 时,输出激光脉冲的峰值功率达到 588 W,脉冲能量达到 94 μJ ,脉冲宽度为 160 ns。CDG 的引入降低了涡旋光激光器的成本,而且该激光器结构紧凑、简单易调,可有效运行于主动调 Q 机制,输出纳秒宽度的涡旋激光脉冲。为后续即将开展的涡旋光激光器的腔内倍频研究,以及将激光波长拓展至可见光波段奠定了基础。

参 考 文 献

- Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J, *et al.*. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- Li Xinzhong, Tian Xiaomin, Wang Hui, *et al.*. Study on properties of speckle field formed by Laguerre-Gaussian beam illumination[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0726001.
李新忠, 田晓敏, 王 辉, 等. 拉盖尔-高斯光束照射产生散斑场的特性研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0726001.
- Harris M, Hill C A, Tapster P R, *et al.*. Laser modes with helical wave fronts[J]. *Physical Review A*, 1994, 49(4): 3119-3122.
- Grier D G. A revolution in optical manipulation[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 810-816.
- Gahagan K T, Swartzlander G A. Optical vortex trapping of particles[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(11): 827-829.
- Luo Wei, Cheng Shubo, Yuan Zhanzhong, *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.
- Toyoda K, Miyamoto K, Aoki N, *et al.*. Using optical vortex to control the chirality of twisted metal nanostructures[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(7): 3645-3649.
- Terakado G, Watanabe K, Kano H. Scanning confocal total internal reflection fluorescence microscopy by using radial polarization in the illumination system[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(6): 1114-1118.
- Züchner T, Failla A V, Meixner A J. Light microscopy with doughnut modes: A concept to detect, characterize, and manipulate individual nanoobjects[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2011, 50(23): 5274-5293.
- Langford N K, Dalton R B, Harvey M D, *et al.*. Measuring entangled qutrits and their use for quantum bit commitment [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(5): 053601.
- Guo Jianjun, Guo Banghong, Cheng Guangming, *et al.*. Research progress on photon orbital angular momentum in quantum communication applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(8): 080003.

- 郭建军, 郭邦红, 程广明, 等. 光子轨道角动量在量子通信中应用的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(8): 080003.
- 12 Dholakia K, Simpson N B, Padgett M J, *et al.*. Second-harmonic generation and the orbital angular momentum of light [J]. *Physical Review A*, 1996, 54(5): R3742-R3745.
- 13 Turnbull G A, Robertson D A, Smith G M, *et al.*. The generation of free-space Laguerre-Gaussian modes at millimetre-wave frequencies by use of a spiral phaseplate[J]. *Optics Communications*, 1996, 127(4-6): 183-188.
- 14 Kim D J, Kim J W, Clarkson W A. Q-switched Nd:YAG optical vortex lasers[J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29449-29454.
- 15 Fang Z, Xia K, Yao Y, *et al.*. Radially polarized and passively Q-switched Nd:YAG laser under annular-shaped pumping [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21(1): 1600406.
- 16 Zhou C H, Jia J, Liu L R. Circular Damman grating[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(22): 2174-2176.
- 17 Jia J, Zhou C H, Liu L R. Circular Damman grating and its applications[C]. *Proceedings of SPIE: Nano-Optics and Nano-Structures*, 2002, 4923: 119-126.
- 18 Li J, Yao Y, Yu J, *et al.*. Efficient vortex laser with annular pumping formed by circle damman grating[J]. *Photonics Technology Letters*, 2015, 28(4): 473-476.
- 19 Fang Z, Yao Y, Xia K, *et al.*. Simple Nd:YAG laser generates vector and vortex beam[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(3): 031405.
- 20 Hermosa N P, Manaois C O. Phase structure of helico-conical optical beams[J]. *Optics Communications*, 2007, 271(1): 178-183.