

径向偏振光的产生方法及应用

唐新春 高健存 王坤 方茗

(清华大学物理系, 北京 100086)

摘要 径向偏振光与传统的均匀偏振光相比,其偏振态具有完美的轴对称特性,而且其光强在中心轴上始终为中空的分布。对近年来国内外学者对径向偏振光的研究现状进行了综述,简要介绍了径向偏振光的电场特性、产生方法及其应用。通过分析总结认为,采用衍射光栅反射镜是产生高功率和高质量径向偏振激光的新的发展趋势之一。

关键词 激光光学;径向偏振激光;产生方法;衍射光栅反射镜

中图分类号 O436.6 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.030001

Generation of a Radially Polarized Light and Its Applications

Tang Xinchun Gao Jiancun Wang Kun Fang Ming

(Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100086, China)

Abstract Compared with the traditional uniformly polarized light, the radially polarized laser performs perfect spatial axial symmetry and its light intensity configuration is always zero along the central axis. Based on reviewing recent work, its optical properties, generation methods and newest applications are summarized. In accordance with this methods, we summarize that using the diffraction grating mirror to generate radially polarized laser is the most valued method of generating high-quality and high-power radially polarized laser.

Key words laser optics; radially polarized laser; generation method; diffraction grating mirror

OCIS codes 140.3460; 050.1940; 260.5430

1 引言

激光自问世以来,在工业领域发挥着越来越大的作用。激光作为横电磁波,其电场矢量始终处于与其传播方向垂直的平面内,而偏振作为电磁波最基本的特征之一,是由电场矢量表征的。在主平面内的电场矢量的振动具有多种状态。根据振动状态的均匀性可以将激光分为均匀偏振光与非均匀偏振光。均匀偏振光包括通常所说的线偏振光、圆偏振光、椭圆偏振光、自然光和部分偏振光。非均匀偏振光为径向偏振光与角向偏振光。

最近的研究发现,电矢量具有轴对称的偏振光在物理及材料加工方面具有不可替代的优势,因而目前已受到国内外学者的广泛关注。径向偏振光和角向偏振光刚好具有电矢量轴对称的特性。径向偏振光具有完美的光束轴对称性,使得它与线偏振光和圆偏振光相比有着许多显著不同的特点。比如,径向偏振光具有沿光轴对称的电场分布以及中空的圆环型光束结构、卓越的光束特性;径向偏振光和角向偏振光都是偏振本征态,它们在 c 切向的晶体内传播时,不会发生电场矢量串扰的现象,而均匀偏振光则没有这个性质;径向偏振光在高数值孔径的透镜聚焦下,可以产生超越衍射极限的极小聚焦光斑,比线偏振光和圆偏振光的聚焦光斑质量更好;在金属加工方面,采用径向偏振光的金属切割效率是圆偏振光效率的两倍。另一方面,径向偏振光相对于角向偏振光而言,具有以下特性:径向偏振光经过透镜聚焦系统后,在远场能形成单个极小的聚焦光斑,而角向偏振光则形成多个聚焦光斑;在金属切割中,由于径向偏振光始终是 p 分量的偏振光,其方向始

收稿日期: 2012-12-03; **收到修改稿日期**: 2012-12-26; **网络出版日期**: 2013-02-27

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院联合基金(10976015)和国家 973 计划(2007CB935300)资助课题。

作者简介: 唐新春(1987—),男,硕士研究生,主要从事固体激光器方面的研究。E-mail: txc19870309@163.com

导师简介: 高健存(1962—),男,副教授,博士生导师,主要从事激光及非线性光学等方面的研究。

E-mail: gaojc@mail.tsinghua.edu.cn(通信联系人)

终平行于金属表面,因此其角度因素不会对切割过程产生影响;在金属钻孔中,径向偏振光较之角向偏振光,其钻孔形状更均匀,钻孔深度更深。近年来,径向偏振光的这些特性得到了许多新的应用,例如在捕捉和操控金属粒子^[1,2]、金属切割^[3,4]、提高显微镜的分辨率^[5,6]、提高存储密度^[7]、研制新型干涉仪^[8]等方面。随着人们对径向偏振光研究的不断深入,它的一些新特性将会被发现,从而将在越来越多的领域得到更为广泛的应用。

2 径向偏振光的产生方法

所谓径向偏振光是指电矢量振动方向在光束横截面上具有轴对称性并且始终沿径向的一种偏振光。其定义来源于电场强度的表达式,如图 1 所示,电场中每点的电矢量相对于矢径旋转角度为 ϕ ,则其电场强度可表示为^[9]

$$\mathbf{E}(r, \theta) = E_0(r) [r \cos \phi + \theta \sin \phi],$$

式中 \mathbf{r} 、 θ 分别为径向和角向的单位矢量。

当 $\phi=0$ 时,电场强度为 $\mathbf{E}(r, \theta) = E_0(r) \mathbf{r}$,即为径向偏振光;当 $\phi=\pi/2$ 时,电场强度 $\mathbf{E}(r, \theta) = E_0(r) \sin \phi \theta$,即为角向偏振光。其电场矢量振动方向如图 1 所示。

1972 年,日本 Tohoku 大学 Mushiake 等^[10]首次在实验中获得径向偏振光。他们在氦氖激光器中加入圆锥电介质元件,给除径向偏振以外的其他偏振分量以高损耗,从而通过激光器输出径向偏振光。虽然径向偏振光被发现已有 40 年的历史,但是由于设备的局限性,人们以往对径向偏振光的特性并不十分了解。最近几年,当人们注意到其非凡的特性和广泛的应用前景时,纷纷寻找更为有效的方法来产生径向偏振光。目前,径向偏振光的生成方法繁多,但总体上可分为两大类:1)在激光器的谐振腔中加入某些特性的光学元器件,让其产生径向偏振光,这类方法称为腔内法;2)腔外法,即能形成径向偏振光的元器件或装置是在激光谐振腔之外。在腔内法中,又有几种方法产生径向偏振光,比如在腔内加入轴对称的激活介质、使用具有偏振选择性的轴对称光学元件和采用具有偏振选择特性的衍射光栅等。同样,在腔外法大类中,也有几种方法适合于腔外生成径向偏振光的,比如将两束偏振方向正交的 TEM_{01} 的光束通过相干合成得到径向偏振光、对线偏振光采用极化整形技术得到径向偏振光和在腔外加入具有偏振选择特性的衍射光栅生成径向偏振光等。下面将详细介绍近年常见的生成径向偏振光的实验方法。

2.1 在腔内使用轴对称的激活介质产生径向偏振光

这种方法利用轴对称光抽运介质中双折射效应所导致的特殊物理效应来分离出所需的径向偏振光。具体而言,此效应所导致的热透镜对于两种不同偏振光(径向偏振光与角向偏振光)而言,它们焦距会不同,从而稳定范围也不一致。进而可以选择合适的稳定性范围将二者分离出来,得到所需要的径向偏振光。Yonezawa^[11]设计的装置如图 2 所示。该装置的激光腔包含凹透镜, c 轴切向的晶体,输出耦合器三部分。Nd:YVO₄ 晶体为正双折射晶体,其对应于波长为 $1.065 \mu\text{m}$ 的 o 光的折射率是 1.9573,而对于 e 光的折射率为 2.1652。此谐振腔由平面镜和凹透镜组成,镜间间距近似可看作等于凹透镜的半径, $n_e > n_o$,所以 e 光稳定长度大于 o 光稳定长度。因此选择特殊的腔体设计,只让 e 光稳定振荡,则会形成径向偏振光输出。

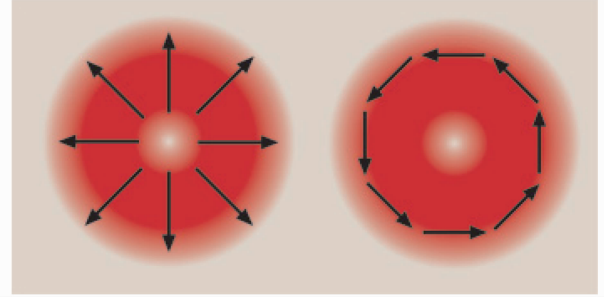


图 1 径向偏振光和角向偏振光^[9]

Fig. 1 Radially polarized light and azimuthally polarized light^[9]

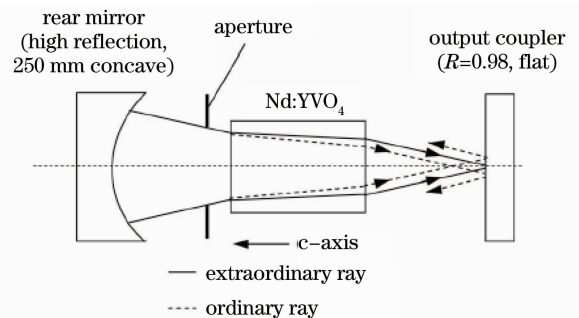


图 2 采用轴对称激活介质的实验装置图^[11]

Fig. 2 Experimental setup by applying the axially symmetric crystal^[11]

另外,也可以在腔内人为添加小型光阑来选择出想要的偏振光。运用此种方法也可以生成径向偏振光。

以色列的 Moshe^[12] 同样利用了径向偏振光和角向偏振光在双折射效应的影响下折射率的差异会造成聚焦特性不同的性质,在其焦面上设置小孔,人为地选择需要的偏振模式。目前已实现了输出功率为 600 W,光束质量因子 $M^2=3.5$ 的径向偏振光输出^[13],其装置如图 3 所示。

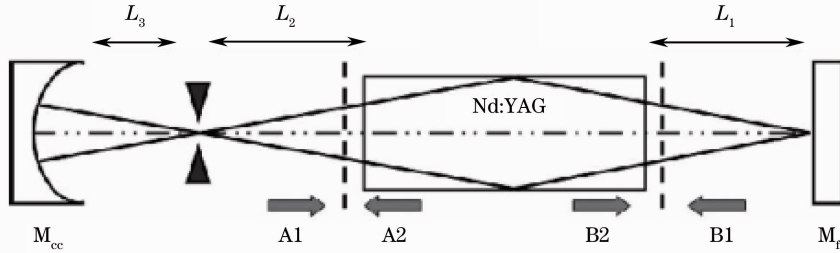


图 3 光阑选择模式装置示意图^[13]

Fig. 3 Experimental configuration of using selective apertures^[13]

2.2 在腔内使用具有偏振选择性的轴对称光学元件生成径向偏振光

此方法主要是利用具有偏振选择性的轴对称光学元件,如圆锥形布儒斯特窗、圆锥形后反射镜、轴对称凹槽偏振选择衍射器件等,来实现径向偏振光的输出,具有结构简单、在低功率输出的条件下稳定性高等特点。Kozawa 等^[14] 设计了如图 4 所示的布儒斯特光学元件(圆锥形布儒斯特棱镜,CBP),可以实现高稳定性的径向偏振光输出。此布儒斯特光学元件由一个凸棱镜和一个凹棱镜组合而成,并且凸棱镜和凹棱镜的顶角设计满足布儒斯特条件。利用此装置可以从 Nd:YAG 激光谐振腔中直接生成径向偏振光束。值得注意的是此凸棱镜的侧面有 SiO_2 和 Ta_2O_5 组成的多层结构,用以提高偏振选择性。

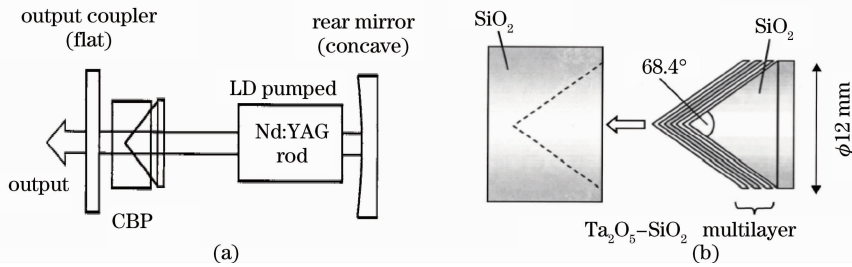


图 4 (a)腔内装置图;(b)圆锥形布儒斯特棱镜光学元件^[14]

Fig. 4 (a) Setup of the cavity; (b) CBP structure^[14]

2.3 在腔内使用光子晶体光栅产生径向偏振光

光子晶体光栅具有很强的偏振选择能力,将其作为激光器谐振腔的后腔镜获得径向偏振光也是产生径向偏振光的方法之一。此方法克服了径向偏振光的纯度低、光束轴对称性差以及斜效率低等问题。中国科

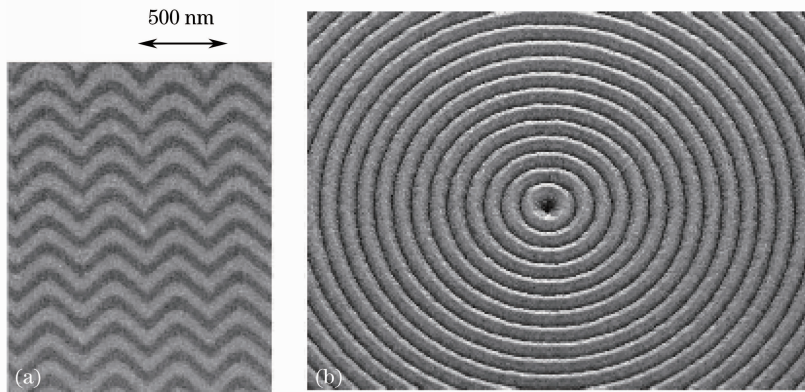


图 5 扫描电镜下光子晶体光栅的结构图。(a)剖视图;(b)俯视图^[15]

Fig. 5 Structure images of photonic crystal grating obtained by employing scanning electron microscope(SEM). (a) Cross section; (b) top view^[15]

学院上海光学精密机械研究所(简称上海光机所)的 Li 等^[15]于 2008 年采用光子晶体光栅镜成功获得径向偏振光输出。图 5(a)为偏振选择光子晶体光栅镜的剖视图,光栅镜由具有不同折射率的 Nb_2O_5 与 SiO_2 的亚波长锯齿状层交替堆栈而成。图 5(b)是光子晶体光栅镜的俯视图,偏振选择光栅每层都为同心圆环锯齿形光栅,且光栅在横向和纵向的周期均为亚波长,可以形成对径向(或方位)偏振的特性选择。

图 6 为实验装置图,采用 808 nm 光纤耦合端面抽运,将偏振选择光子晶体光栅镜作为激光谐振腔的输出耦合镜,在吸收抽运功率为 3.7 W 时,获得了 610 mW 的 1064 nm 径向偏振光输出,其消光比为 61:1,斜效率高达 68.2%。

另外,上海光机所的林迪等^[16]利用光子晶体光栅作为偏振选择元件以及激光器的输出耦合镜,端面抽运抽运 Nd:YAG 键合晶体,在晶体吸收 2 W 抽运光时,获得了 264 mW 的连续径向偏振激光,偏振纯度为 96.5%,斜效率为 58.1%,激光中心波长为 1065.1 nm,半峰全宽(FWHM)为 0.86 nm。

采用光子晶体光栅镜也可以产生脉冲的径向偏振光。Li 等^[17]通过在端面抽运的 Nd:YAG 微片激光器腔内放置饱和吸收晶体 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$,运用光子晶体光栅镜作为腔内起偏器件,成功获得了径向偏振光束的被动调 Q 输出。在未对激光腔进行优化的情况下,获得了脉宽为 86 ns、峰值功率为 759 W 和重复频率为 6.7 kHz 的脉冲,激光器斜效率为 30.2%,最大平均输出功率为 450 mW,径向偏振光的偏振纯度达到 97.4%。

2.4 在腔内使用衍射光栅反射镜生成径向偏振光

衍射光栅一般分为两种,即吸收型衍射光栅(AMM)和泄漏型衍射光栅(LMM),其光栅微结构如图 7 所示。

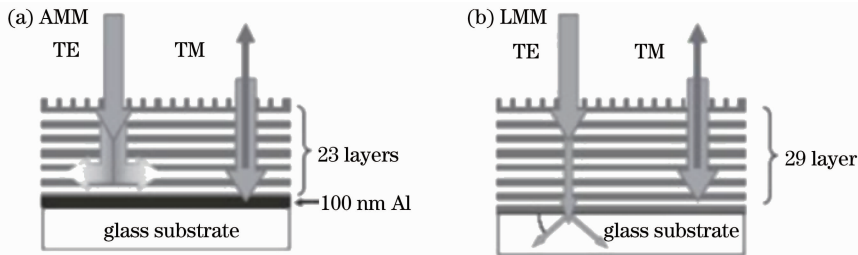


图 7 衍射光栅器件的微结构^[18]

Fig. 7 Micro-structure of diffraction grating^[18]

根据电磁波在光栅中传播时满足的电磁场耦合理论,TE 波的电场方向平行于光栅线方向,TM 波的电场矢量的方向垂直于光栅线。

在图 7 中,图 7(a)为吸收型光栅,图 7(b)为泄漏型。对比两图的 TE 波和 TM 波光线入射情况,可以看出它们的基本原理近乎一致,即将 TE 波和 TM 波进行分离,从中提取 TM 波形成径向偏振光。两者的不同之处在于,吸收型衍射光栅的底层镀有 100 nm 厚的铝层,用来吸收 TE 波,使 TE 波的反射率降到最低,而对于 TM 波尽可能全部反射;而泄漏型衍射光栅是将 TE 波的泄漏到玻璃介质中去,对于 TM 波也是尽可能全部反射。由于 TE 波和 TM 波在衍射光栅中存在反射率之差,当达到一定的反射次数时,只有 TM 波能够振荡,TE 波不能振荡。当衍射光栅加工成圆环结构时,根据前面的分析,TE 波被光栅耦合掉,仅剩下的 TM 波振荡输出,TM 波的电场矢量垂直于光栅线,即为圆环结构光栅的径向方向,就能获得径向偏振光的输出。同理,如果合理设计光栅参数,使 TM 波被光栅耦合掉,剩下 TE 波振荡输出时,在圆环结构的光栅器件中,就能获得角向偏振光的输出。

Ahmed^[19]在 2007 年发表了一篇文章介绍了如何使用腔内光栅衍射元件实现径向偏振光。设计的光栅如图 8 所示,光栅周期为 920 nm,深度为 15 nm,最上层为 Ta_2O_5 ,接着为 SiO_2 , Ta_2O_5 和 SiO_2 结构重复

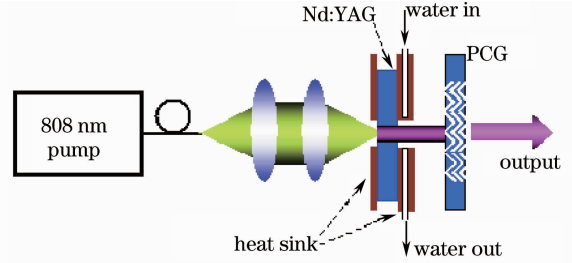


图 6 端面抽运 Nd:YAG,用光子晶体光栅作为输出耦合镜产生径向偏振激光的实验装置图^[15]

Fig. 6 Experimental setup of an end-pumped Nd:YAG microchip laser with a photonic crystal grating as the output to generate radially polarized laser coupler^[15]

29次。整个装置主要是利用了TE波和TM波的反射率的不同,在抑制TE波反射率的同时增强TM波的反射率。图9为TE波和TM波在不同波长的反射率对比图。从图中可以看出,在1010 nm和1030 nm附近,TE波和TM波存在一定的反射率之差。

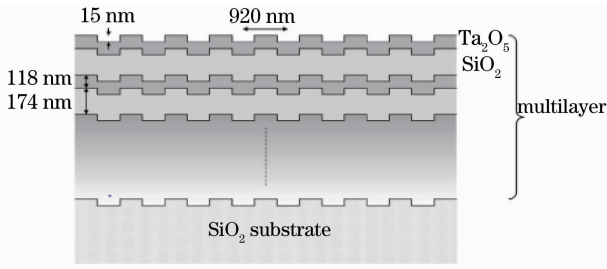


图8 光栅截面图^[16]

Fig. 8 Section view of grating^[16]

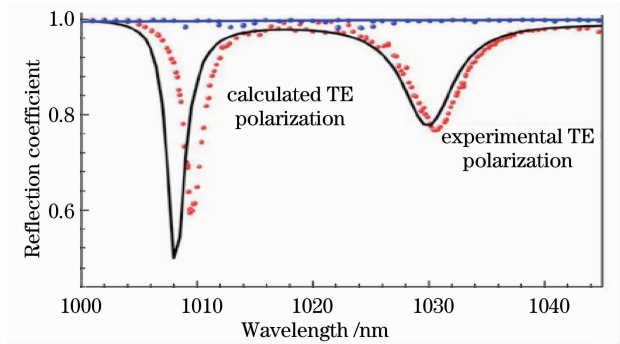


图9 TE和TM波反射率对比图^[19]

Fig. 9 Reflection diagram of the TE and TM polarization^[18]

图10为激光装置的示意图,光栅被放置在Z型腔的后反射镜上,当激光振荡以后,径向偏振光就会从输出镜一侧输出。

图11为CCD相机拍摄的10 W的径向偏振输出光以及其经过不同偏振方向的偏振片后的图样。从结果来看,是比较完美的径向偏振光。

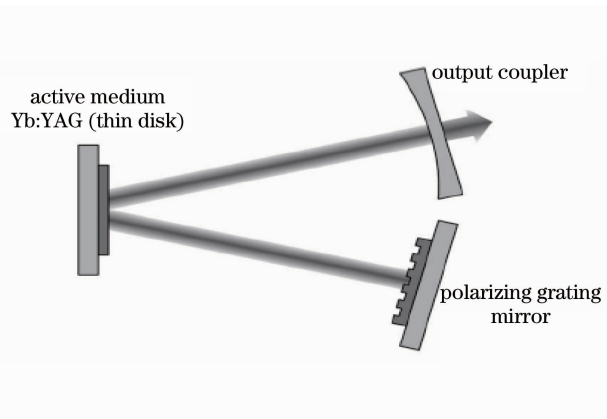


图10 激光谐振腔示意图^[18]

Fig. 10 Setup of laser resonant cavity^[18]

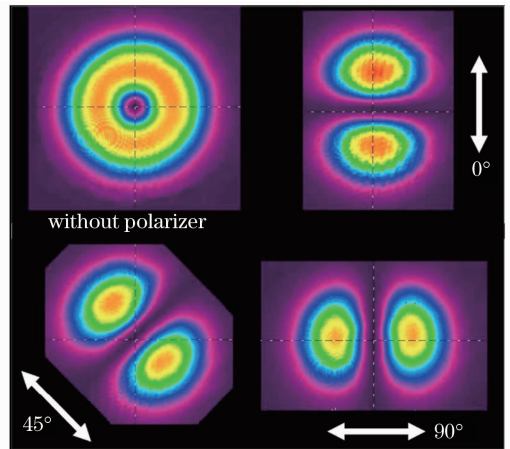


图11 CCD相机测到的分布图样^[19]

Fig. 11 Intensity distribution by applying CCD^[19]

同时,采用衍射光栅反射镜作为激光谐振腔的后腔镜,还能获得高光束质量的径向偏振激光。2004年, Moser等^[20]采用如图12所示的实验装置,当使用AMM型衍射光栅反射镜时,在腔长为17 cm的条件下,得到的输出功率为2 W,光束质量因子为 $M_x^2 \approx 2$ 和 $M_y^2 \approx 2$;而当使用LMM型衍射光栅反射镜作为后腔镜时,在腔长为11 cm的条件下,得到的输出功率为4 W,光束质量因子为 $M^2 \approx 2$ 。同时他们还证明,当输出功率提高到30 W时,LMM型衍射光栅反射镜并无明显的温度变化。

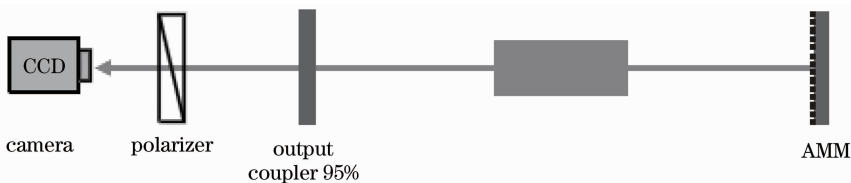


图12 吸收型衍射光栅反射镜的实验装置图^[20]

Fig. 12 Experimental setup of absorbing-mode-mirror^[20]

2011年, Ahmed等^[21]在V型腔中使用碟片Yb:YAG作为激光晶体,采用衍射光栅反射镜作为后腔镜,获得了275 W, $M^2=2.3$,效率为52.5%的径向偏振光,其偏振度为98.5%。

也可以将这种衍射光栅反射镜的方法应用到CO₂激光器中,可得到3 kW的连续输出径向偏振光,在连续输出几个小时后,其功率仍能保持在2.7 kW以上^[22]。

可以看出,采用衍射光栅反射镜生成径向偏振光的方法有着输出功率高、光束质量好、输出稳定性好等优势,具有极大的发展空间和应用潜能,是产生高质量和高功率径向偏振激光的一个重要发展方向。

以上4种方法为腔内法,下面介绍3种常见的腔外法。

2.5 在腔外利用八块扇形半波片构成的空间变换延迟器产生径向偏振光

以色列的Machavariani等^[23]将外腔法应用于碟片激光器,得到了1 kW的径向偏振光输出,其基本原理是将输入的线偏振光转化成径向偏振光。其实验的装置如图13所示。

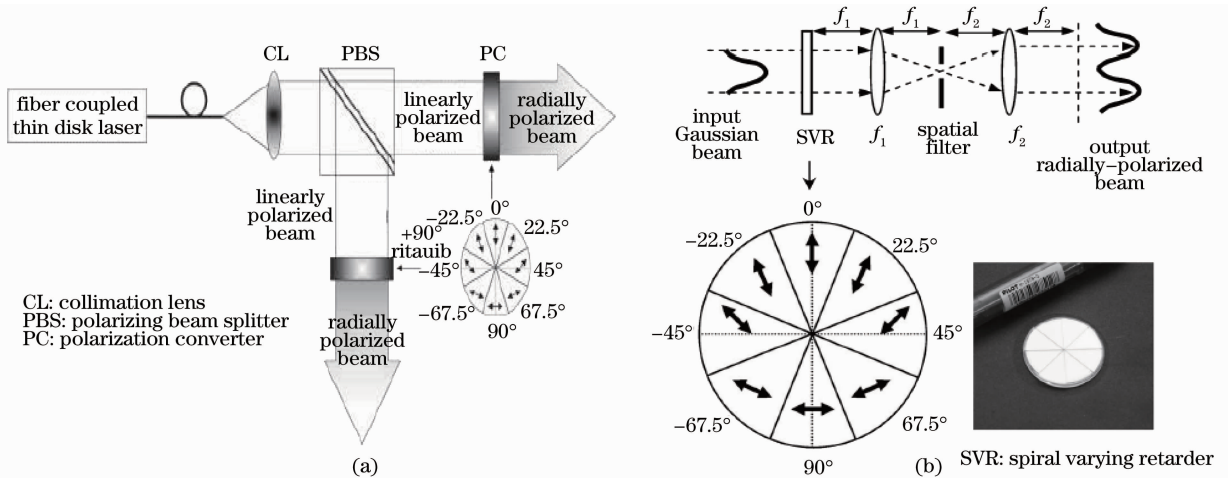


图13 (a)实验装置及(b)偏振转换器组成图^[23]

Fig. 13 (a) Experimental configuration and (b) polarization converter^[23]

图13(a)为实验装置,图13(b)为偏振转换器。偏振转换器是由延迟器(SVR)、一个光阑和两个透镜构成,其中SVR又由8片半波长的延迟片组成。每一个半波长延迟片其角度都互不相同,而且与双折射晶体的慢轴(在图中用双向箭头表示)之间有不同的夹角。

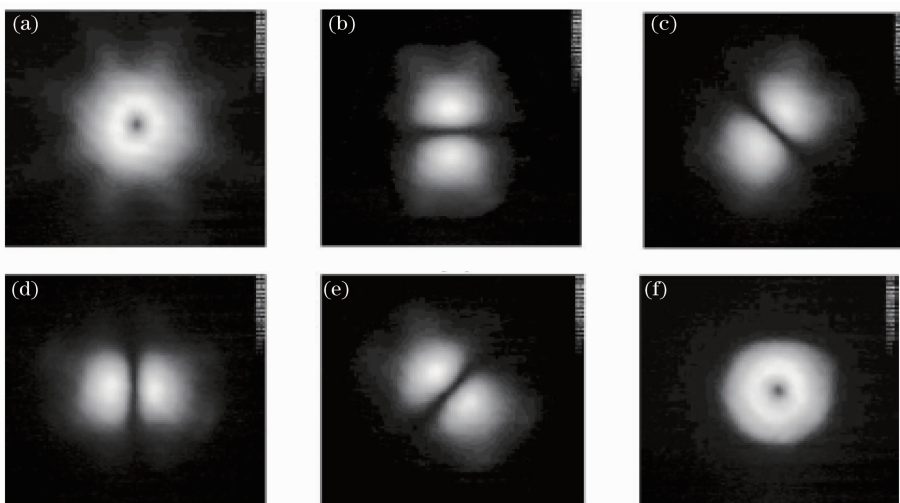


图14 (a)远场处光斑的光强分布;(b)经过角度为0°;(c)45°;(d)90°和(e)-45°的偏振器后的远场光强分布;(f)经过空间滤波器后的光强分布^[23]

Fig. 14 (a) Experimental far-field intensity distribution; far-field intensity distributions after passing through the (b) 0°, (c) 45°, (d) 90° and (e) -45° polarizers; (f) far-field intensity distribution obtained after the spatial filter^[23]

当线偏振光经过偏振控制装置时,就能够形成径向偏振光。实验同时还用 CCD 对径向偏振光的光束质量进行了测量,以检验是否为径向偏振光,如图 14 所示。

实验结果显示,一方面,获得了 1 kW 的稳定的径向偏振光;另一方面,线偏振光转化为径向偏振光的效率较高,用 $M^2 = 1.3$ 的线偏振光可以得到 $M^2 = 2.5$ 的径向偏振光。

2.6 腔外采用极化整形的方法产生径向偏振光

极化整形的方法都是对线偏振光进行相位补偿,通过滤波等操作得到径向偏振光。常见的极化整形则利用多个特殊组合的半波片,其快轴方向都经过特殊组合,从而能够由线偏振光转化成为类径向偏振光,实验装置如图 15 所示。一般说来,有 4 片、8 片和液晶这几种^[24]。

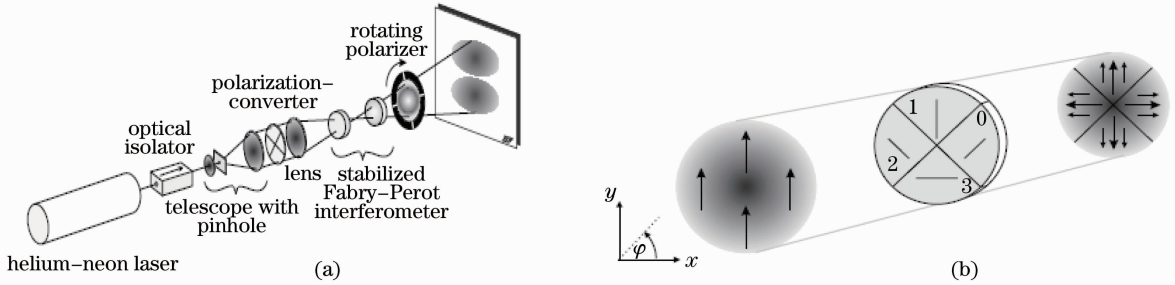


图 15 实验装置图及极化整形过程^[24]

Fig. 15 Experimental configuration and polarization reshaping^[24]

在 Quabis 等^[24]的文章中,还列出一个计算出的整形片数和类径向极化程度(ω_0 代表基础光, ω_R 代表类径向极化光)的关系,如图 16 所示。可以看出,随着整形片数量的增加,类极化程度也不断提高,但是从 8 片以后,提高程度不是很大。

2.7 在腔外使用线性双折射晶体模拟旋光产生径向偏振光

对于腔外法产生径向偏振光而言,除了上面所提及的极化整形法以外,还有一类就是寻找“外部光学元素”^[25],用来将线偏振光直接转换成径向偏振光,但只能获得低功率的径向偏振光输出。2007 年, Hua 等^[25]提出用线性双折射晶体模拟旋光性产生径向偏振光的方法解决了此类缺陷,它能产生高功率输出的径向偏振光。其机制是将一个 SVR 放在两个互相垂直的 1/4 波片之间,对于 SVR,其厚度与角度有关,它能将入射光的偏振旋转一定的角度,当 SVR 被置于两个 1/4 波片构成的体系中时,就能将入射的线偏振光转换成径向偏振光,由于晶体的切割具有一定的局限性,所以在体系前加了一个半波片。其结构及原理如图 17 所示。

通常选用透明的线性双折射晶体。Hua 等^[25]用 y 切向的透明石英来验证此方法,输入的线偏振光波长为 532 nm,对应的线性双折射率为 0.0092,其实验结果如图 18 所示。图 18(a)为实验产生的径向偏振光,图 18(b)~(d)分别是径向偏振光通过 0° 、 -45° 、 45° 的偏振器后的光强分布。

3 径向偏振光的应用

3.1 捕捉和操控粒子

粒子的捕捉与操控一直都是粒子物理领域的难题,以前人们通常认为金属粒子由于具有很强的散射和吸收作用而很难被捕捉到,而径向偏振光的出现弥补了这个领域的空缺。用径向偏振光做光源可以实现粒子的操控和二维的光陷阱,将粒子捕捉在光陷阱之中。

图 19 分别展示了 TEM₀₀ 模光操控粒子和二维光陷阱的示意图^[2]。

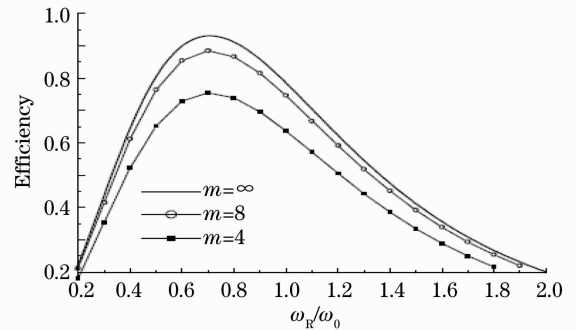


图 16 计算出的片数与类极化程度图^[24]

Fig. 16 Relation between number of half-wave plate and polarization degree^[24]

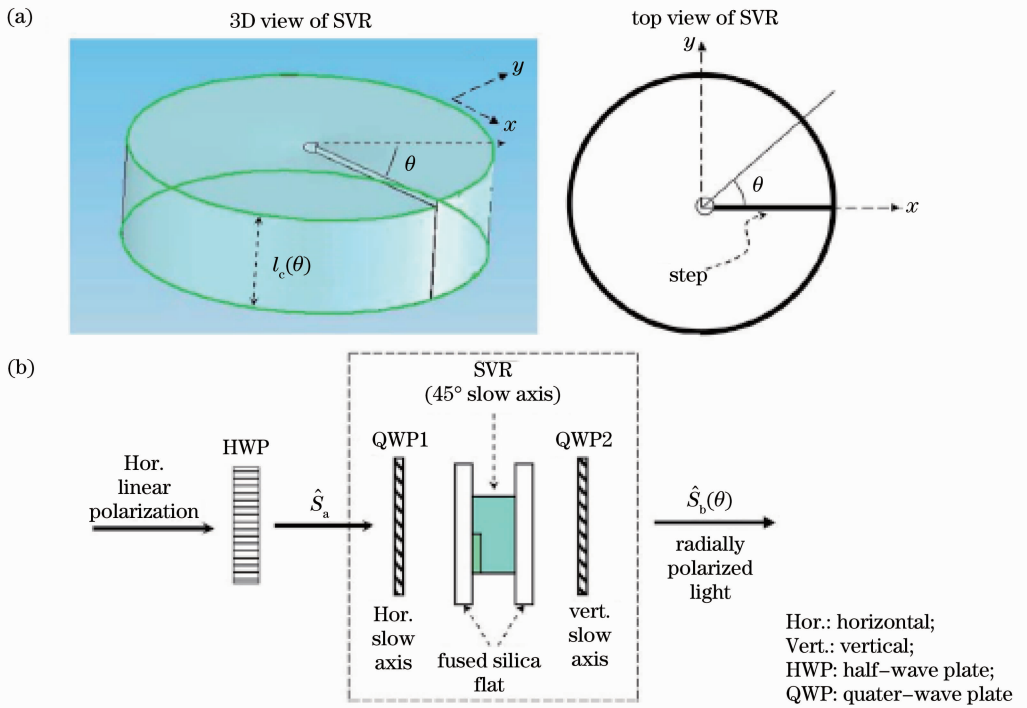


图 17 (a) SVR 结构; (b) 线偏振光转化为径向偏振光装置图^[25]

Fig. 17 (a) SVR structure and (b) setup for converting linearly polarized light to radially polarized light^[25]

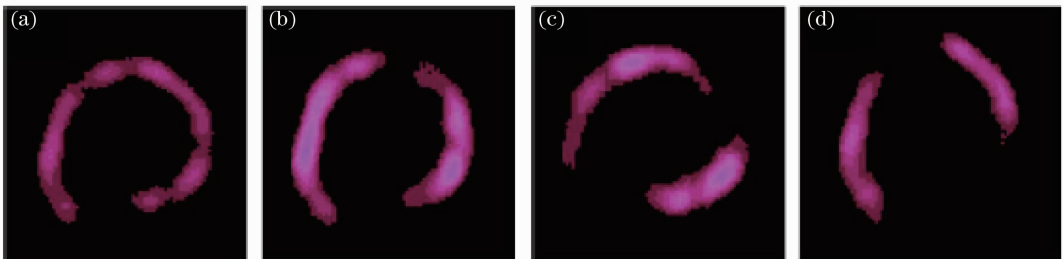


图 18 (a) 未加偏振器时实验观测到的光斑图以及分别经过角度为 (b) 0°, (c) -45° 和 (d) 45° 的偏振器后的光斑分布^[25]

Fig. 18 Laser beam profile observed in the far field (a) without the polarizer and with the polarizer's transmitting axis at (b) 0°, (c) -45° and (d) 45°^[22]

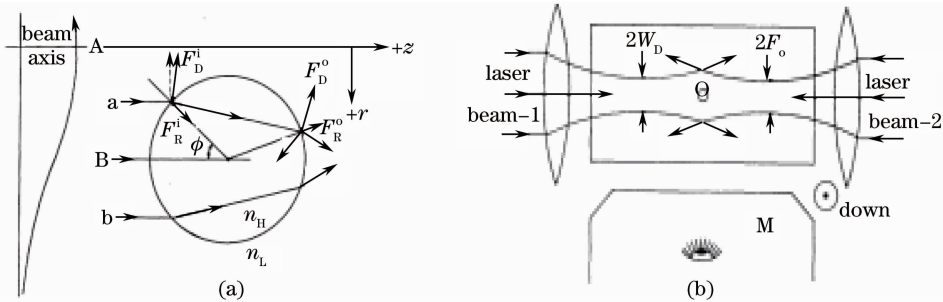


图 19 (a) 操控粒子; (b) 二维光陷阱示意图^[2]

Fig. 19 (a) Controlling particle; (b) 2D light trap^[2]

图 19(a) 给出了粒子在光波作用下所受的 4 个力 F_R^i, F_R^o 和 F_D^i, F_D^o , 这 4 个力的大小与入射的光强和入射角有密切的关系。根据对称性, 可以了解到 F_R^i, F_R^o 的合力与 F_D^i, F_D^o 的合力大小之比只和二者的光强相关。由于 a 光比 b 光的光强大, 所以整个光束使粒子沿着 $+z$ 和 $-r$ 方向运动, 即有使粒子回到光束中心的趋势。在此基础上, 可以制作一个二维的光陷阱来囚禁粒子, 如图 19(b) 所示, 2 个对称的高斯光束即可以形

成一个光陷阱。

3.2 金属切割

自从 20 世纪 60 年代第一台激光器诞生以后,激光在金属切割领域中扮演着重要的角色,工业领域的不断发展,对激光金属切割的需求越来越大,然而用传统的线偏振光或圆偏振光进行切割时,不可避免地遇到切割厚度和切割效率的问题。径向偏振光由于其自身的轴对称性等特性,在切割金属时要比线偏振光和圆偏振光的切割效率高 1.5~2.0 倍^[2~5]。径向偏振光应用与激光加工中的切割工艺,可以极大地增强激光加工的效果,如图 20 所示^[2]。

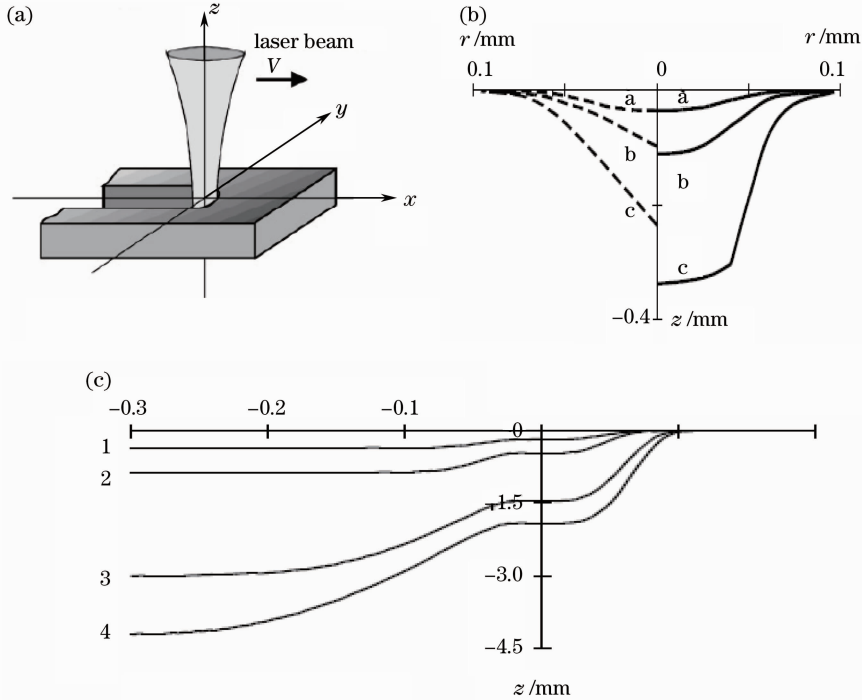


图 20 (a)为激光切割所建立的系统坐标图;(b) z 轴向的穿透深度,左为角向偏振光,右为径向偏振光,曲线 a, b, c 对应不同的时间且递增;(c) $x-z$ 平面轮廓,其中 1,3 为角向偏振光,2,4 为径向偏振光^[1]

Fig. 20 (a) Laser beam positions in coordinate system for laser cutting; (b) laser beam hole punching with azimuthal (left) and radial (right) polarized laser beams, the curves a, b, c correspond to increasing time; (c) profile in the $x-z$ plane with 1,3 for azimuthal polarized laser and 2,4 for radial polarized laser^[1]

在图 20(b)中,a, b, c 分别对应依次增加的 3 个不同的加工时间。从中我们可以看到,角向和径向偏振光在 z 方向上的钻深随着时间的增加逐渐有了较大的差异,径向偏振光的优势越来越明显。图 20(c)显示的是 $x-z$ 平面($y=0$)的加工轮廓。3,4 两条线对应的光强是 1,2 的 10 倍。从中可以看出,在相同的条件下,径向偏振光的加工轮廓更大,即效率更高。

3.3 提高纵向分辨率

在高数值孔径透镜聚焦下,径向偏振光可以聚焦到突破衍射极限的 $0.16\lambda^2$ 大小的尺寸,这比用线偏振光和圆偏振光聚焦的最小尺寸 $0.26\lambda^2$ 要小^[26]。另外中国科学技术大学的阎杰等^[27]通过数值计算的方法得到,径向偏振光经过聚焦后的光斑质量与折射光线和光轴之间的夹角有关。利用这些特性,可以在金属表面激发等离激元。图 21 是表面等离激元局域化激发装置示意图^[28],平面波从底部入射到油浸目镜上,然后被会聚到金属目镜上。经过理论推算,表面等离激元的局域化的大小与 z 方向的电场 E_z 的情况密切相关。

图 22 为线偏振光和径向偏振光在几何焦点处的电场形成示意图。在其几何焦点处电场矢量进行合成,径向偏振光的 E_z 会增强,而线偏振光的 E_z 会相互抵消。

对于径向偏振光的研究开始于 20 世纪 90 年代,虽然发展时间不是很长,但是由于其诸多的优点,使得径向偏振光在粒子捕获与操控、提高显微镜分辨率以及金属加工等领域展现出了重大的潜在应用价值。相

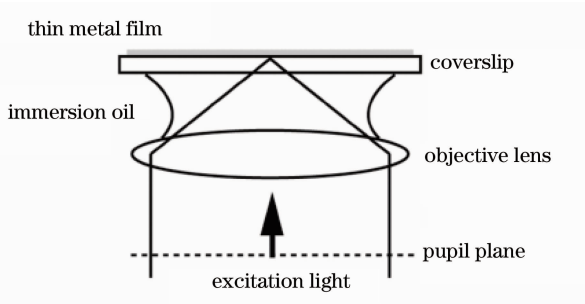
图 21 表面等离子元局域化激发装置示意图^[28]

Fig. 21 Optical setup to excite the localized surface plasmon^[28]

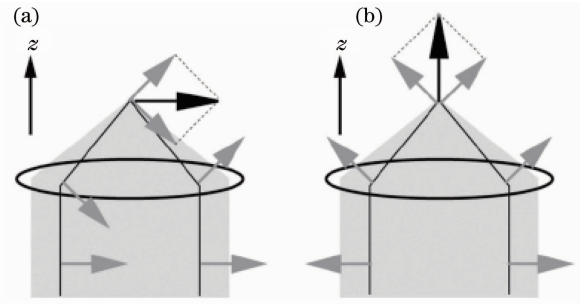
图 22 几何焦点处的电场形成示意图。(a)线偏振光；(b)径向偏振光^[28]

Fig. 22 Electric-field formation by the plane wave components at the geometric focus, (a) Linearly polarized light; (b) radially polarized light^[28]

信通过对其更为深入的研究,径向偏振光将具有更加广阔的应用前景。

4 结束语

通过对近些年来国内外学者对径向偏振光的研究现状进行分析,简要介绍了径向偏振光的电场特性、生成方法以及最新应用等方面的研究情况。通过分析总结,认为采用衍射光栅反射镜是产生高功率和高质量径向偏振激光新的发展趋势之一。

参 考 文 献

- 1 A. Ashkin. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1970, **24**(4): 156~159
- 2 Qiwen Zhan. Trapping metallic Rayleigh particles with radial polarization [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(15): 3377~3382
- 3 V. Niziev, A. Nesterov. Influence of beam polarization on laser cutting efficiency [J]. *J. Phys. D*, 1999, **32**(13): 1455~1461
- 4 M. Meier, V. Romano, T. Feurer. Material processing with pulsed radially and azimuthally polarized laser radiation [J]. *Appl. Phys. A*, 2007, **86**(3): 329~334
- 5 H. Kano, S. Mizuguchi, S. Kawata. Excitation of surface-plasmon polaritons by a focused laser beam [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1998, **15**(4): 1381~1386
- 6 Kouyou Watanabe. Optimized measurement probe of the localized surface plasmon microscope by using radially polarized illumination [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(22): 4985~4990
- 7 Wan-Chin Kim, No-Cheol Park. Investigation of near-field imaging characteristics of radial polarization for application to optical data storage [J]. *Opt. Rev.*, 2007, **14**(4): 236~242
- 8 Gilad M. Lerman, Uriel Levy. Radial polarization interferometer [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(25): 23234~23246
- 9 K. J. Moh, X.-C. Yuan, J. Bu *et al.*. Generating radial or azimuthal polarization by axial sampling of circularly polarized vortex beams [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(30): 7544~7557
- 10 Mushiaki, Y. Matsumura, K. Nakajima *et al.*. Generation of radially polarized optical beam mode by laser oscillation[J]. *Proc. IEEE*, 1972, **60**(9): 1107~1109
- 11 Kazuhiro Yonezawa. Generation of a radially polarized laser beam by use of the birefringence of a c-cut Nd:YVO₄ crystal [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(14): 2151~2153
- 12 I. Moshe. Production of radially or azimuthally polarized beams in solid-state lasers and the elimination of thermally induced birefringence effects[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(10): 807~809
- 13 Y. Lumer. Use of phase corrector plates to increase the power of radially polarized oscillators[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, **27**(7): 1337~1342
- 14 Yuichi Kozawa, Shunichi Sato. Generation of a radially polarized laser beam by use of a conical Brewster prism[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(22): 3062~3065
- 15 Jian-lang Li, Ken-ichi Ueda, Mitsuru Musha *et al.*. Efficient excitation of radially and azimuthally polarized Nd³⁺:YAG ceramic microchip laser by use of subwavelength multilayer concentric gratings composed of Nb₂O₅/SiO₂ [J]. *Opt. Express*,

- 2008, **16**(14): 10841~10848
- 16 Lin Di, Li Jianlang, Xia Kegui. Radially polarized laser with end-pumped and bonded Nd:YAG crystal[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(7): 071405
林 迪, 李建郎, 夏克贵. 端面抽运 Nd:YAG 键合晶体径向偏振激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(7): 071405
- 17 J. L. Li, K. I. Ueda, M. 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
- 18 T. Moser, H. Glur, V. Romano. Polarization-selective grating mirrors used in the generation of radial polarization[J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **80**(6): 707~713
- 19 Marwan Abdou Ahmed. Multilayer polarizing grating mirror used for the generation of radial polarization in Yb:YAG thin-disk lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(22): 3272~3274
- 20 T. Moser, M. A. Ahmed, F. Pigeon. Generation of radially polarized beams in Nd:YAG lasers with polarization selective mirrors[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2004, **1**(5): 234~236
- 21 Marwan Abdou Ahmed, Matthias Haefner, Moritz Vogel. High-power radially polarized Yb:YAG thin-disk laser with high efficiency[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(6): 5093~5104
- 22 Marwan Abdou Ahmed, Joachim Schulz, Andreas Voss. Radially polarized 3-kW beam from a CO₂ laser with an intracavity resonant grating mirror[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(13): 1824~1826
- 23 G. Machavariani, Y. Lumer. Efficient extracavity generation of radially and azimuthally polarized beams[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(11): 1468~1470
- 24 S. Quabis. Generation of a radially polarized doughnut mode of high quality[J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **81**(5): 597~600
- 25 P. B. Hua, W. J. Lai, Yuan Liang Lim. Mimicking optical activity for generating radially polarized light[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(4): 376~378
- 26 R. Dorn, S. Quabis, G. Leuchs. Sharper focus for a radially polarized light beam[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**(23): 233901
- 27 Yan Jie, Lu Yonghua, Wang Pei *et al.*. Study of focal spot of radially polarized beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3597~3603
阎 杰, 鲁拥华, 王 沛 等. 径向偏振光聚焦光斑研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(12): 3597~3603
- 28 H. Kano, S. Mizuguchi, S. Kawata. Excitation of surface-plasmon polaritons by a focused laser beam[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1998, **15**: 1381~1386