

偏硼酸钡晶体中彩色锥形辐射特性的研究

尹娟娟 俞侃* 包佳祺

(华中科技大学文华学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 彩色锥形辐射是超短脉冲激光在非线性质中传输时产生的一种特殊的非线性现象。实验研究了飞秒脉冲激光诱导偏硼酸钡(BBO)晶体产生的彩色锥形辐射现象,建立了彩色锥形辐射产生的物理模型,模拟了辐射角与波长的变化,分析了彩色锥形辐射的光谱特性。实验获得清晰的彩色锥形辐射图样,观测了抽运光入射角、光强度对彩色锥形辐射的影响。减小抽运光强与增大入射角,均导致锥形辐射外环产生明显的红移。实验现象与理论模拟相吻合,进一步表明彩色锥形辐射源于二次谐波的自发参量转换。

关键词 非线性光学;彩色锥形辐射;偏硼酸钡;二次谐波;参量下转换;相位匹配

中图分类号 O433.5+4 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.1102007

Investigation of Colored Conical Emission in β -Barium Borate Crystal

Yin Juanjuan Yu Kan Bao Jiaqi

(Wenhua College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Colored conical emission (CCE) is an attractive nonlinear phenomenon, which is induced during intense ultra-short pulses propagating in nonlinear medium. A detailed experimental study on the generation of CCE in type-I β -barium borate (BBO) crystal pumped by femtosecond pulses is reported. A physical model based on CCE is constructed, it numerically calculates the conical angle with different wavelengths and the spectral characteristics of CCE is analyzed. The influence of parametrics on the characteristics of CCE is discussed in details. With the pumped intensity decreasing and the pulse incident angle increasing, the central wavelength of the CCE spectrum has a red shift based on the numerically simulation. The observation shows that the CCE is originated from spontaneous parametric down conversion of second harmonic pulses.

Key words nonlinear optics; colored conical emission; β -barium borate; second harmonic pulses; parametric down conversion; phase matching

OCIS codes 140.6630; 190.4410; 270.6630

1 引 言

高峰功率的飞秒脉冲激光与非线性介质作用过程中,若同时考虑群速度色散和衍射的影响,将会呈现时间和空间上调制的不稳定性。不同频率成分在抽运光周围沿不同发散角以指数增益增长所形成的锥形辐射,称为彩色的锥形辐射(CCE)。

锥状辐射的产生是超短脉冲强激光在透明光学介质中传输时出现的一种现象。1970年,Alfano等^[1]利用倍频锁模钕玻璃皮秒激光脉冲抽运BK7

光学玻璃,首次获得了400~700 nm的超连续锥状辐射。研究表明,利用高强度激光放大系统抽运多种介质,均可获得宽带的锥形辐射谱^[2-3]。Tzortzakis等^[4]采用亚皮秒紫外激光脉冲在空气中传输时观察到连续的锥形辐射谱。Nagura等^[5]分别采用三种不同波长的入射光脉冲抽运LiF、CaF₂、熔融石英和水等光学介质,实验表明随着抽运光能量的增加,短波区域光谱展宽,抽运光的偏振方向影响锥形辐射现象的产生。采用高功率飞秒激光与非

收稿日期:2013-03-29;收到修改稿日期:2013-06-13

基金项目:国家自然科学基金(61205062)和湖北省自然科学基金(2012FFB02701)

作者简介:尹娟娟(1984—),女,硕士,讲师,主要从事非线性光学方面的研究。E-mail: juanjuanyin@yahoo.cn

*通信联系人。E-mail: onlyfish@126.com

线性介质作用时,相互作用的非线性强度较大,也会产生特殊的锥形辐射现象。Trillo等^[6]理论上预测了二阶非线性介质中时空耦合调制的不稳定性将会导致彩色锥形辐射的产生,大量的实验工作^[7-10]都验证了该理论,表明这种超连续的锥状辐射现象的产生主要源于激光脉冲在时间和空间上调制的不稳定性。随着光纤技术的迅速发展,光纤中的非线性效应增强。实验表明,光纤中也可获得宽带的锥形辐射谱,且锥形辐射谱的产生与抽运光功率以及光纤长度等参数也具有密切的关系^[11-13]。只有抽运功率大于一定的阈值功率时,才能观察到显著的谱展宽现象^[14]。曾和平等^[15]采用中心波长为800 nm的飞秒激光抽运二阶非线性介质,观察到伴随二次谐波产生的CCE现象。实验表明,基波CCE来源于基波与二次谐波的强耦合。但CCE与超连续谱的物理机制有本质的不同,故需进一步深入研究CCE光谱特性。同时,展宽的光谱可提供宽带的激光光源^[16-18],也用于可调谐振荡激光器及宽光谱遥感探测仪等研究^[19-20]。

理论与实验上研究了高功率飞秒脉冲激光诱导下产生的彩色锥形辐射现象。理论模拟抽运光入射角对彩色锥形辐射的影响,实验获得了清晰的彩色锥形辐射现象,并详细分析抽运光入射角、光强度各参数对彩色锥形辐射光谱的影响,以及CCE光谱与超连续谱的本质区别。

2 理论分析

虽然彩色锥形辐射现象过程为参量光的离轴传输,但发散角通常非常小,故可采用近轴无量纲模型描述非线性介质中参量光的产生(忽略空间走离效应)。二次谐波抽运非线性介质产生彩色锥形辐射的物理本质为三光子过程^[6],考虑群速度失配、色散及相位失配的影响,可用耦合波方程表示其非线性过程

$$\begin{aligned} i \frac{\partial \mu_1}{\partial z} + \frac{\sigma_1}{2} \nabla_{\perp}^2 \mu_1 - \frac{\beta_1}{2} \frac{\partial^2 \mu_1}{\partial t^2} + \mu_2 \mu_1^* &= 0, \\ i \frac{\partial \mu_2}{\partial z} + \frac{\sigma_2}{2} \nabla_{\perp}^2 \mu_2 + i\delta \frac{\partial \mu_2}{\partial t} - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 \mu_2}{\partial t^2} + \Delta k \mu_2 + \frac{\mu_1^2}{2} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 μ_1 、 μ_2 分别为归一化后二次谐波与参量转换光波的光强, $|\mu_2|^2 + |\mu_1|^2/2 = 1$,且拉普拉斯算符 $\nabla_{\perp}^2 = \partial_x^2 + \partial_y^2$, $\sigma_m = k_1/k_m$, $m = 1, 2$, β 为群速度色散(GVD)因子, $\beta_m = k''_m/k''_1$, $k_m = d^2k/d\omega^2|_{\omega_0}$, δ 为群速度失配(GVM)因子, $\delta = 1/v_g(\omega_2) - 1/v_g(\omega_1)$,

$v_g = d\omega/dk$, Δk 则表征二次谐波与转换光波的相位失配因子。根据非线性光学耦合波通解的形式,可令稳态解为

$$\begin{aligned} \mu_m(r, t, z) &= [\mu_{m0} + a_m(r, t, z)] \exp(im\beta z), \\ m &= 1, 2 \end{aligned} \quad (2)$$

则 $a_m(r, t, z)$ 可看做锥状辐射的微扰, μ_{m0} 为入射光强。

为了观察各参量光波的增益特性,通过傅里叶-贝塞尔变换将坐标系变换到波矢-频率空间,分析参量光波在晶体的传播过程中随抽运光强、参量光波长等参数的变化。将平面波解的基本形式带入耦合波方程(2)式的稳态解,则当波数 k 与频率 Ω 满足一定的色散关系时特征解才存在。在反常色散非线性介质中,随二次谐波在晶体中不断的传输,各频率成分参量转换光将被放大,增益系数 g 为波数 k_x 、 k_y 及时间频率 Ω 的函数。

令 Ω_s 为空间频率,则 $\Omega_s = \left(\frac{k_x^2 + k_y^2}{\sqrt{\beta_0 |\beta_2|}} \right)^{1/2}$ 。增益系数 g 可变换为时间频率 Ω 与空间频率 Ω_s 的函数^[6],为

$$g(\Omega, \Omega_s) = |\beta_2| (\Omega_s^2 + \Omega^2)^{1/2} \times (\Omega_c^2 - \Omega^2 - \Omega_s^2)^{1/2}, \quad (3)$$

式中 $\Omega_c^2 = \frac{4|\gamma|}{|\beta_2|} = \frac{8\pi|n_2|I_0}{\lambda|\beta_2|}$, I_0 为抽运光光强, β_2 为二阶群速度色散, n_2 为非线性折射率。

当 $\Omega_s^2 + \Omega^2 = \Omega_c^2$ 时,增益具有最大值,为

$$g_{\max} = \frac{|\beta_2| \Omega_c^2}{2} = \frac{4\pi|n_2|I_0}{\lambda}. \quad (4)$$

由(3)式可知,参量转换光的增益为时间和空间的函数,且增益呈对称性分布,说明彩色锥形辐射呈轴对称分布。结合(4)式分析,增加抽运光强,常数 Ω_c 增加,峰值增益 g_{\max} 增强,彩色锥形辐射外环参量光的中心频率增加,即波长随抽运光强增加往短波方向移动。

沿轴向传播频率为 2ω 的倍频光子经参量下转换演化为偏离轴向传输的频率为 $\omega \pm \delta\omega$ 的光子对,满足能量与动量守恒条件^[21]。二次谐波抽运非线性BBO晶体时,相位匹配条件下自发产生参量上转换光与下转换光,如图1所示。参量下转换过程为 $e \rightarrow o + o$,则倍频光 2ω 为非常光 e 光,产生的光子对均为寻常光 o 光。随倍频光在非线性晶体中不断的传输,越来越多的倍频光经参量下转换自发转化为 $\omega \pm \delta\omega$ 的光子对,并且在时空耦合调制不稳定性的作用下获得指数增长的增益,从而形成彩色锥形辐射现象。

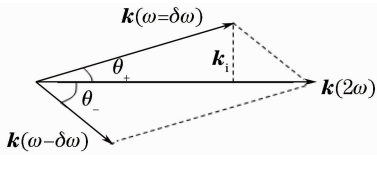


图1 参量下转换匹配图

Fig. 1 Schematic diagram of parametric down conversion

根据参量下转换满足的相位匹配条件,同一频率 $\omega \pm \delta\omega$ 成分的锥形辐射角^[22]为

$$\theta_{\pm} = \arcsin \left[\frac{k_i}{k(\omega \pm \delta\omega)} \right], \quad (5)$$

$$k_i^2 = k^2(\omega + \delta\omega) - \frac{[k^2(2\omega) + k^2(\omega + \delta\omega) - k^2(\omega - \delta\omega)]^2}{4k^2(2\omega)}. \quad (6)$$

不同频率圆锥形辐射对应的锥角大小,如图2所示。

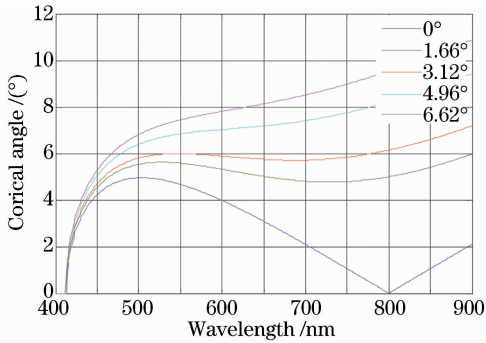


图2 不同出射波长的锥形辐射角

Fig. 2 Conical emission angle of different wavelengths

抽运光正入射时,中心波长为 500 nm 的绿色辐射环发散角最大,约为 5° ,远离 500 nm 波长辐射环锥角依次减小。随抽运光入射角增大,所有参量转换光波长的锥角随之增大。当入射角增大至 3.31° 时,500~700 nm 波长辐射环锥角基本相同,均为 6° 。当入射角继续增大,整个波长范围内锥角随波长的增大而增大。

3 实验装置

实验装置如图3所示。实验中采用的激光光源为 Spectra-Physics 公司的掺钛蓝宝石飞秒激光设备。该系统输出的激光脉冲的中心波长为 800 nm,重复频率为 1 kHz,脉冲半峰全宽(FWHM)为 50 fs。实验中,采用光阑 1 和 2 对出射激光脉冲准直定位,并调节光束尺寸。半波片用来调节线偏振光的偏振方向,与偏振棱镜结合实现对脉冲能量的连续调节。透镜 1 和 2 的焦距分别为 15、20 cm。800 nm 飞秒激光光束经焦距为 15 cm 的透镜 1,正

入射到 BBO 晶体(1 mm 厚、 29.18° 切割)。调节 BBO 晶体 1 使入射光满足 I 类相位匹配条件,获得高效率的倍频效应。透射光先后通过两个镀 800 nm 增透膜和 400 nm 增反膜的反射镜 1 和 2,获得 400 nm 的准单色光,如图 4 所示。

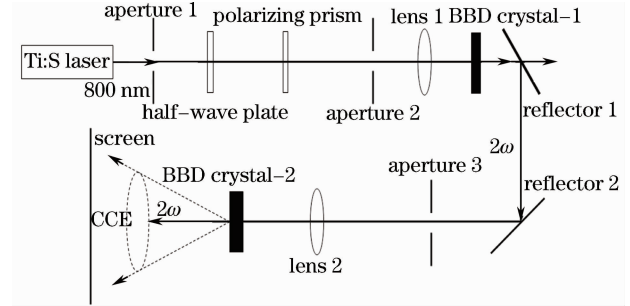


图3 飞秒脉冲抽运 II 类 BBO 晶体实验装置示意图

Fig. 3 Experimental setup II-type BBO crystal

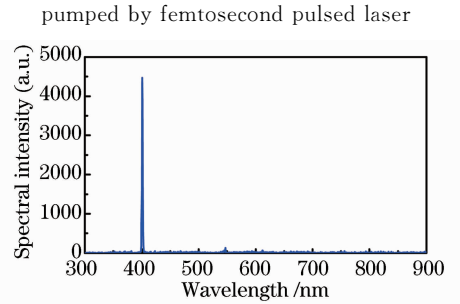


图4 400 nm 倍频光谱图

Fig. 4 Spectra of 400 nm doubled-frequency laser

400 nm 的倍频光经透镜 2 聚焦后,入射到 5 mm 厚、 29.18° 切割的 I 类相位匹配 BBO 晶体 2 上。BBO 晶体 2 放置在三维显微调节平台上,晶体与透镜焦点的距离可在 5 cm 范围内连续调节,通过精密调节可获得不同方向的入射角。适当调节入射光强度及入射角度,在观察屏上获得清晰的彩色锥形辐射图样。

4 实验结果与分析

适当调节 BBO 晶体 2 的角度与抽运光强,当晶体位于焦点约 1 cm 处,在光屏上观察到清晰的彩色锥形辐射图样,如图 5(a)所示。

采用光谱仪对彩色锥形辐射中心及边缘位置处进行光谱测试,所得光谱图像如图 5(b)、(c)所示。400 nm 的入射光产生的散射光呈均匀的圆锥状分布,并且不同频谱成份的散射光具有不同的圆锥角分布。锥形辐射从内到外环形的颜色依次为蓝色、红色、绿色。实验测得红色和绿色圆环的发散角分别约为 4.8° 和 6° ,对应中心波长分别约为 600 nm 和

519 nm。500~600 nm 之间的参量下转换光强度较

高,329.82 nm 处自发参量上转换光强度相对较低。

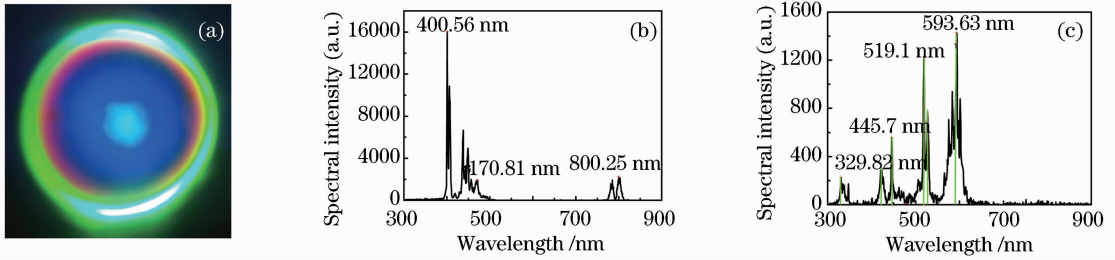


图 5 实验结果。(a) 彩色锥形辐射图像；(b) 图像中心光谱；(c) 图像边缘光谱

Fig. 5 Experimental results. (a) CCE image; (b) spectra of CCE image center; (c) spectra of CCE image edge

结合 800 nm 激光直接抽运晶体所产生的圆锥形辐射图样^[23]分析可知,其与图 5(a)中二次谐波抽运形成图样存在明显区别。随二次谐波在晶体中不断传播,沿轴向传输的倍频光子转换为偏离轴向传输的光子对。500~600 nm 之间的转换光具有较高的转换效率,故参量光呈较为均匀对称的圆锥状分布。800 nm 激光抽运晶体时,沿轴向传输的基频光,部分转变成倍频光,进而演化为偏离轴向传输的光子对,还有部分倍频光转换成基频光子并与传输的光子对结合形成新的光子对。故仅有转换效率较高的蓝绿锥形辐射具有较为清晰的对称圆锥辐射。以上两种情况进一步表明二次谐波自发参量转换效率是产生各频率锥形辐射的主要因素,不仅与抽运光波长有关,而且仅在满足一定相位匹配条件下才可能产生锥形辐射现象。

二次谐波抽运非线性晶体所产生的彩色锥状辐射主要为自发参量下转换过程。为验证各参数对彩色锥形辐射的影响,分别改变抽运光强、抽运光入射角观察彩色锥形辐射的变化。

4.1 抽运光入射角对彩色锥形辐射的影响

实验中,通过调节微调旋钮改变光束入射角。在正入射的基础上,缓慢调节微调旋钮,依次增大入射角,对应彩色锥形辐射图样如图 6 所示。

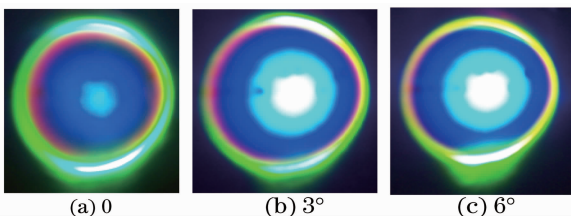


图 6 不同入射角度下 CCE 图像

Fig. 6 CCE images with different incident angles

从彩色锥形辐射图像可以看出,随入射角的增大,各颜色的锥形环均存在,且锥形圆环的直径均随之增大,但各频率的彩色圆环直径增大的速度不同。

正入射时,短波长绿色环锥角最大,约为 6°。当入射角约为 3°时,绿色与红色圆环直径均增大,但此时两环重叠,锥角约为 7°。随着入射角继续增大,约为 6°时,红色圆环甚至移至绿色环外围。随抽运光入射角增加,彩色锥形环中红色环逐渐从绿色环内部移至外部,即锥形辐射外环的中心波长往长波方向移动。

根据非线性介质本身的材料特性,800 nm 的基频光波经 BBO 晶体 1 后产生 400 nm 的倍频光。由二次谐波相位匹配条件 $o+o \rightarrow e$,故倍频光为 e 偏振光。400 nm 的倍频光入射至 BBO 晶体 2 时,其折射率随入射角而改变,故波矢量的大小相应改变,对应各波长的锥形辐射角将随之变化。可以看出,以上实验结果与图 4 模拟结果基本一致,解释了彩色锥形辐射随入射角变化而半径增大的原因。

4.2 抽运光强对彩色锥形辐射的影响

实验中,利用改变晶体距焦点的距离来改变入射的抽运光强。在获得清晰的 CCE 基础上,保持各参数不变,旋转显微平台中相应的控制旋钮,逐渐增加晶体距焦点的距离,分别记录相应的辐射图像,如图 7 所示。

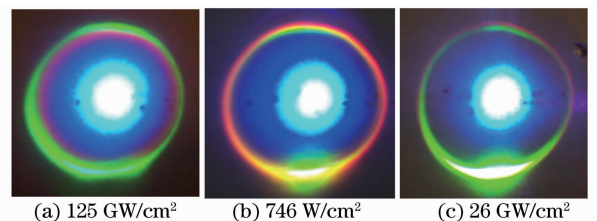


图 7 不同抽运光强下 CCE 图像

Fig. 7 CCE images with different pump intensities

根据所获得的彩色锥形辐射图像,随着晶体距焦点距离的增大,彩色锥形辐射的亮度变弱。抽运光强度越小,参量转换效率越低,辐射亮度越弱。彩色锥形辐射强度也清晰反映了与抽运光强的正比例关系。图 7 可看出,各彩色锥形辐射环锥角相应增

加,同时最外圈环形辐射的颜色产生明显的红移现象。已知随抽运光强增加,彩色锥形辐射外环参量光的中心波长往长波方向移动,即频移量正比于光强。降低抽运光强则导致频移量 $\omega + \delta\omega$ 减小,即辐射光谱朝长波方向移动。同时,也可看出,随抽运光强的减弱,红色锥形辐射环逐渐消失,而绿色辐射环依然清晰可见。由于彩色锥形辐射受群速度失配与色散的影响,波长为 500 nm 左右的光与倍频光之间的群速度失配为零^[15,24],故绿色波长辐射较易获得。结果表明绿色辐射环所需抽运光强的阈值比红色圆环的低,且辐射强度较高,而较高抽运强度下才可能获得红色锥形辐射。

5 结 论

研究了 400 nm 飞秒脉冲激光在二阶非线性偏硼酸钡晶体中的传输特性。实验获得清晰的彩色锥形辐射现象,并深入研究抽运光入射角、抽运光强对辐射现象的影响。结果表明随抽运光入射角的增加,各颜色锥形环的直径增大,且辐射外环的中心波长朝长波方向移动。随抽运光强的减小,参量转换效率降低,彩色锥形辐射亮度减弱,且锥形辐射外环的中心波长也产生明显的红移现象。二次谐波产生的各频率参量光呈均匀对称圆锥分布,而基频光抽运时,仅有转换效率较高的蓝绿锥形辐射具有清晰辐射现象。进一步表面彩色锥形辐射起源与二次谐波的参量转换,仅有满足相位匹配条件下才可能产生清晰的锥形辐射现象。

比较二次谐波产生的 CCE 与超连续锥形辐射谱,CCE 光谱频率成份相对较少,主要由红色与绿色光谱组成,而超连续光谱成份几乎可覆盖整个可见光区域。超连续锥形辐射的光谱成份从内向外波长依次递减,而 CCE 辐射环光谱成份受抽运光入射角的影响,故表明两种圆锥辐射的物理机制存在本质区别。以上分析均表明彩色锥形辐射源于二次谐波的自发参量转换,其转换效率均受群速度失配与色散的影响。

参 考 文 献

- 1 R R Alfano, S L Shapiro. Emission in the region 4000 to 7000 Å via four-photon coupling in glass[J]. Phys Rev Lett, 1970, 24(11): 584-587.
- 2 Won-Kyu Lee, Young-Chul Noh, Jin-Ho Jeon, *et al.*. Conical emission as a result of self-phase modulation in samarium vapor under the near-resonant condition[J]. J Opt Soc Am B, 2001, 18(1): 101-105.
- 3 F Theberge, M Châteauneuf, V Ross, *et al.*. Ultrabroad band

- conical emission generated from the ultraviolet up to the far-infrared during the optical filamentation in air[J]. Opt Lett, 2008, 33(21): 2515-2517.
- 4 S Tzortzakis, B Lamouroux, A Chiron, *et al.*. Nonlinear propagation of subpicosecond ultraviolet laser pulses in air[J]. Opt Lett, 2000, 25(17): 1270-1272.
- 5 C Nagura, A Suda, H Kawano, *et al.*. Generation and characterization of ultrafast white-light continuum in condensed media[J]. Appl Opt, 2002, 41(18): 3735-3742.
- 6 S Trillo, C Conti, P D Trapani, *et al.*. Colored conical emission by means of second harmonic generation[J]. Opt Lett, 2002, 27(16): 1451-1453.
- 7 A K Dharmadhikari, F A Rajgara, D Mathur. Plasma effects and the modulation of white light spectra in the propagation of ultrashort versus optical breakdown in H₂O[J]. Appl Phys B, 2006, 82(4): 575-583.
- 8 S Tzortzakis, L Berge, A Couairon, *et al.*. Breakup and fusion of self-guided femtosecond light pulses in air[J]. Phys Rev Lett, 2001, 86(24): 5470-5473.
- 9 Q Xing, K M Yoo, R R Alfano. Conical emission by four-photon parametric generation by using femtosecond laser pulses[J]. Appl Opt, 1993, 32(12): 2087-2089.
- 10 G G Luther, A C Newell, J V Moloney, *et al.*. Short pulse conical emission and spectral broadening in normally dispersive media[J]. Opt Lett, 1994, 19(11): 789-791.
- 11 Liu Chu, Eric Rees, Toni Laurila, *et al.*. Experimental research on supercontinuum generation from nanosecond pulse and conventional single mode fiber[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(7): 0705003.
刘 楚, 埃里克斯, 托尼·劳里拉, 等. 纳秒脉冲在普通单模光纤中产生超连续谱的实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0705003.
- 12 Zhang Bin, Yang Weiqiang, Hou Jing, *et al.*. 1.9~4.3 μm all-fiber mid-infrared supercontinuum source firstly realized in China[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1202001.
张 斌, 杨未强, 侯 静, 等. 国内首次实现 1.9~4.3 μm 全光纤中红外超连续谱光源[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1202001.
- 13 Zhao Wei, Hu Xiaohong, Wang Yishan, *et al.*. High power all-fiber supercontinuum technical development [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1107002.
赵 卫, 胡晓鸿, 王屹山, 等. 高功率全光纤超连续谱激光技术进展[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1107002.
- 14 M N Islam, G Sucha, I Bar-Joseph, *et al.*. Broad bandwidths from frequency-shift solitons in fibers[J]. Opt Lett, 1989, 14(7): 370-372.
- 15 Heping Zeng, Jian Wu, Han Xu, *et al.*. Colored conical emission by means of second harmonic generation in a quadratically nonlinear medium[J]. Phys Rev Lett, 2004, 92(14): 143903.
- 16 V P Kandidov, O G Kosareva, I S Golubtsov, *et al.*. Self-transformation of a powerful femtosecond laser pulse into a white-light laser pulse in bulk optical media (or super continuum generation)[J]. Appl Phys B, 77(2-3): 149-165.
- 17 L Berge, S Skupin, R Nuter, *et al.*. Ultrashort filaments of light in weakly ionized, optically transparent media[J]. Rep Prog Phys, 2007, 70(10): 1633-1713.
- 18 Zhang Juan, Liu Liren, Zhou Yu, *et al.*. Design of a new type interleaver[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(12): 1424-1428.
张 娟, 刘立人, 周 煜, 等. 一种新型光交错复用器的设计[J]. 光学学报, 2003, 23(12): 1424-1428.
- 19 A Godard, M Raybaut, Olivier Lambert, *et al.*. Cross resonant optical parametric oscillators: study of and application to difference frequency generation [J]. J Opt Soc Am B, 2005, 22(9): 1966-1978.
- 20 Li Daqi, Liu Dingquan, Zhang Fengshan. Control of polarization for the visible infrared broadband dichroic beam splitter at oblique

- incidence[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(1): 5–8.
李大琪, 刘定权, 张凤山. 可见/红外宽光谱分色片偏振调控的设计[J]. *光子学报*, 2011, 40(1): 5–8.
- 21 I Marcikic, W Tittel, *et al.*. Long-distance teleportation of cubits at telecommunication wavelengths[J]. *Nature*, 2003, 421(30): 509–513.
- 22 Wu Kun, Wu Jian, Xu Han, *et al.*. Ultrashort laser pulse up-conversion amplification based on modulation instability[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(8): 3749–3756.
吴 昆, 吴 健, 徐 晗, 等. 超短激光脉冲调制上转换放大[J]. *物理学报*, 2005, 54(8): 3749–3756.
- 23 Yin Juanjuan, Yu Kan, Bao Jiaqi. Spontaneous parametric down conversion in type-I BBO crystal pumped by femtosecond pulses [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(9): 1376–1380.
尹娟娟, 俞 侃, 包佳祺. 飞秒激光泵浦 I 类 BBO 晶体中自发参量下转换的研究[J]. *光子学报*, 2011, 40(9): 1376–1380.
- 24 Bi Jie. Investigation on the Properties of Conical Emission in BaB₂O₄ Crystal Induced by Femtosecond Laser Pulses [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. 37–38.
毕 洁. 飞秒激光诱导偏硼酸钡晶体产生圆锥辐射的特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011. 37–38.

栏目编辑: 宋梅梅