

贝塞尔飞秒光束光学整流效应的研究

梁晓晶 栗岩锋 徐帅帅 曹 辉 胡明列 柴 路 王清月

天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

摘要 光学整流效应是产生宽带太赫兹波最有效的手段之一, 基于光学整流效应产生太赫兹波的方法主要依靠抽运光与非线性晶体之间的相互作用。分别以 5 mm 的磷化镓(GaP)块状晶体和 6 mm 的 GaP 波导结构作为太赫兹波发射晶体, 对具有相同功率的贝塞尔光束中心光斑和高斯光束的光学整流效率进行了对比研究。实验结果表明, 在 GaP 块状晶体中, 贝塞尔光束的光学整流效率是高斯光束的 2.04 倍; 波导的特殊结构可以使抽运光和太赫兹波之间实现严格的相位匹配, 贝塞尔光束的相对效率增加为 3.46 倍。两种抽运光产生的太赫兹波场均具有高斯分布特性, 且贝塞尔光束产生的太赫兹波频谱具有明显的红移特征。贝塞尔光束能够提高光学整流效率, 有助于实现高功率、紧凑型的太赫兹源, 对推广太赫兹波的应用有显著意义。

关键词 物理光学; 太赫兹波; 光学整流; 贝塞尔光束; 磷化镓

中图分类号 O437 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1026010

Optical Rectification Using Bessel Femtosecond Beam

Liang Xiaojing Li Yanfeng Xu Shuaishuai Cao Hui

Hu Minglie Chai Lu Wang Qingyue

Ministry of Education Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology, Ultrafast Laser Laboratory, School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract Optical rectification (OR) is one of the most effective methods to generate broadband terahertz (THz) wave. The process of THz wave generation based on OR mainly depends on the interaction between the pump beam and the nonlinear crystal. The OR efficiencies in a 5 mm gallium phosphide (GaP) bulk crystal and a 6 mm GaP waveguide are compared between the central spot of a Bessel beam and a Gaussian beam with the same power. The experimental results show that the OR efficiency of the Bessel beam is 2.04 times larger than that of the Gaussian beam in the GaP bulk crystal, whereas the relative efficiency of the Bessel beam is increased to 3.46 times in the GaP waveguide due to perfect phase matching between the pump beam and the THz wave. The THz wave fields generated by both pumps have a Gaussian distribution, and the THz spectra generated by the Bessel beam have obvious red shifts. The fact that the Bessel beam could improve the OR efficiency will be helpful for achieving high-power and compact THz sources, which is valuable for various THz applications.

Key words physical optics; terahertz wave; optical rectification; Bessel beam; gallium phosphide

OCIS codes 260.7120; 320.7110; 190.7110; 140.7090; 160.4330

1 引 言

太赫兹波在光谱中的独特位置赋予了它众多的优良性质, 使其在光谱学、成像、生物医学、通信、天文研究、无损检测及安检等诸多领域具有广泛的应用前景^[1-6]。目前, 限制太赫兹波进一步应用的因素之一是高功率、紧凑型的太赫兹源的缺乏, 太赫兹波的产生方法主要有光学方法和电子学方法, 光学方法中基于

收稿日期: 2016-05-28; **收到修改稿日期:** 2016-06-16

基金项目: 国家自然科学基金(61377047, 61377041, 61535009, 61427814, 61322502, 61077083, 61027013)、国家 973 计划(2014CB339800)、教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT13033)

作者简介: 梁晓晶(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事太赫兹波技术方面的研究。E-mail: lxj123456789886@gmail.com

导师简介: 栗岩锋(1977—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事太赫兹光子学和微纳结构器件等方面的研究。

E-mail: yanfengli@tju.edu.cn(通信联系人)

飞秒激光产生宽带太赫兹波的方法因与时域光谱和成像这两种最关键的太赫兹波技术密切相关,一直是太赫兹波研究的主要方向之一,其中应用最为广泛的方法包括光电导天线、光学整流和空气等离子体等^[7-9]。

光学整流的基本原理是^[7-9]:单个激光脉冲的频谱由不同频率成分构成,在非线性介质中,这些频率分量会激发和频或差频等非线性振荡效应;当入射脉冲强度足够高时,其中的差频振荡效应会激发形成一个稳定的极化电场从而辐射太赫兹波,称为光学整流效应。该方法的优点是装置简单,无需额外电子元件,但相位匹配是限制该方法中光-太赫兹波转换效率的最重要因素之一。碲化锌(ZnTe)和磷化镓(GaP)晶体分别能在 800 nm 和 1040 nm 波段实现较好的共线相位匹配,因此是光学整流中常用的晶体^[10-11]。波面倾斜是一种特别有效的光学整流技术,为了利用铌酸锂(LiNbO₃)晶体的高有效非线性系数以提高太赫兹波脉冲能量,Hebling 等^[12-13]基于 Cherenkov 辐射理论提出用倾斜抽运激光脉冲波面实现非共线相位匹配的方法,获得高达 0.4 mJ 的太赫兹波脉冲能量^[14]。然而,该项技术通常需采用较为庞大复杂的飞秒激光放大系统。光纤飞秒激光器成本较低、体积小、结构紧凑,有助于实现高平均功率、小型化的太赫兹波系统^[11,15-16]。目前,采用啁啾优化的飞秒脉冲作为抽运源,在 21 W 抽运功率下已实现 0.3 mW 的太赫兹波输出^[17]。相对于块状晶体,GaP 波导由于满足相位匹配等特点可以实现更高的功率输出^[18],而且通过合理的设计可以实现太赫兹波频率连续可调^[19]。

对基于光学整流效应产生太赫兹波的方法,当相位匹配条件满足时,理想情况下太赫兹波的产生效率与晶体长度的平方及抽运光的强度成正比^[13]。由于激光器输出多为高斯分布,晶体越长,高斯光束在晶体中的横向展宽越严重。通过使用具有无衍射传输特性的贝塞尔(Bessel)光束作为激发光源,可以很好地解决这一问题。贝塞尔光束具有自恢复特性和无衍射传输特性,目前,它已经成功应用于光学捕获、显微成像、粒子操纵等领域^[20]。在太赫兹波领域,已经有报道利用贝塞尔光束增强等离子体效应产生太赫兹波^[21-23]和差频效应产生太赫兹波^[24]。本文利用具有相同功率的贝塞尔光束中心光斑和高斯光束分别抽运厚度为 5 mm 的 GaP 块状晶体和 6 mm 的 GaP 波导,实验结果表明贝塞尔光束的太赫兹波产生效率要明显高于高斯光束,在波导中尤为明显,这一结果为进一步提升太赫兹波的功率提供了依据。同时,研究光学整流过程对于进一步探索特殊光束与物质的相互作用有重要的参考意义。

2 贝塞尔飞秒光束与 GaP 波导型太赫兹波发射器

2.1 贝塞尔光束的产生

贝塞尔光束最早是由 Durnin^[25]通过理论分析发现的,他通过求解自由空间的亥姆霍兹方程得到了一种无衍射的特解,可以用第一类零阶贝塞尔函数表示,并通过实验证实^[26]。后来实验发现了贝塞尔光束的自恢复性^[27-28],即光场受到扰动甚至被部分遮挡时,能够在一段距离后重新恢复初始的贝塞尔分布。

无衍射零阶贝塞尔光束的光场可表示为^[25]

$$E(\rho, z, t) = A \exp[i(\beta z - \omega t)] J_0(\alpha \rho), \quad (1)$$

式中 A 为光场振幅, ρ 为柱坐标下的径向分量,满足 $\rho^2 = x^2 + y^2$, α, β 分别是波矢 \mathbf{k} 的横向和纵向分量,且满足 $\alpha^2 + \beta^2 = k^2$, J_0 为第一类零阶贝塞尔函数。

根据贝塞尔函数的定义

$$J_0(\alpha \rho) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp[i\alpha \rho \cos \phi] d\phi, \quad (2)$$

式中 ϕ 为柱坐标下的角向分量,贝塞尔光束可以看作是一组平面波的叠加,这些平面波的波矢位于一个共同的圆锥面上。由平面波得到的贝塞尔光束平方不可积,即能量无穷大,这在实际情况中是不可能实现的。在实际应用中,只能得到近似无衍射的光场分布,又称为准贝塞尔(Quasi-Bessel)光束^[20],它在一定传输范围内可以和贝塞尔光束吻合得较好。

Durnin 等^[26]最早利用环缝-透镜方法产生贝塞尔光束,效率很低。随着对贝塞尔光束研究的不断深入,新的产生贝塞尔光束的方法陆续出现。通过轴棱锥可以直接将平面波或高斯光束转换为贝塞尔光束^[29-31],

该方法结构简单、转换效率高、损伤阈值高,是目前应用最广泛的贝塞尔光束产生方法之一。这里获得贝塞尔光束的方法是采用轴棱锥将高斯光束转换成贝塞尔光束,高斯光束由高功率光子晶体光纤(PCF)飞秒激光系统直接输出^[32]。

实验中使用的轴棱锥材质是BK7玻璃,在1040 nm波段折射率为1.5070,边沿厚度为4 mm,底角为 $0.5^\circ \pm 0.17^\circ$,镀900~1200 nm增透膜。利用光束质量分析仪测量光束特性,经轴棱锥变换形成的贝塞尔光束的无衍射传输范围在轴棱锥后6~15 cm,它的无衍射传输距离在9 cm左右,在该范围内的光束能够满足无衍射传输特性,中心光斑的大小(半峰全宽,FWHM)基本保持为65 μm 。在实验中利用不同焦距的透镜对入射高斯光束聚焦,通过对比发现,焦距为85 mm的透镜的焦点处的光斑大小和贝塞尔光束中心光斑大小十分接近,约为63 μm 。为了尽可能地排除其他干扰因素,采用轴棱锥和焦距 $f=85$ mm的透镜分别聚焦高斯光束,在相同功率和近似相同光斑大小的条件下,对比研究贝塞尔光束中心光斑和高斯光束的光学整流效率。

贝塞尔光束在传播过程中其中心光斑的能量分布不均匀^[29],为了充分利用贝塞尔光束中心光斑的能量,在实验中将太赫兹波发射晶体放置在轴棱锥后6 cm处,该处的能量密度最高。在高斯光束抽运时,将其放置在透镜焦点处。图1(a)为在轴棱锥后6 cm处贝塞尔光斑的图样,图1(b)为贝塞尔光束和高斯光束的强度分布图。由图1(b)可以看出,贝塞尔光束的强度分布和高斯光束的强度分布十分接近,这一特性将直接影响太赫兹波的场分布。分别测量贝塞尔光束和高斯光束的光谱以及脉宽,结果如图2所示,实验结果表明,高斯光束经过轴棱锥后其光谱特性几乎不变,贝塞尔光束和高斯光束的带宽和中心波长基本相同,而且脉宽也基本相等。

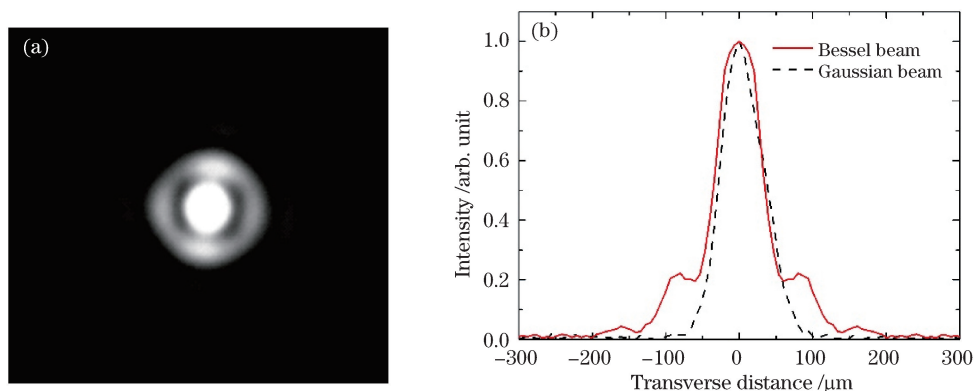


图1 (a) 轴棱锥后6 cm处贝塞尔光束光斑;(b) 贝塞尔光束和高斯光束强度分布

Fig. 1 (a) Photo of the generated Bessel beam spot at $z=6$ cm from the axicon; (b) intensity profiles of the Bessel (solid line) and Gaussian (dashed line) beams

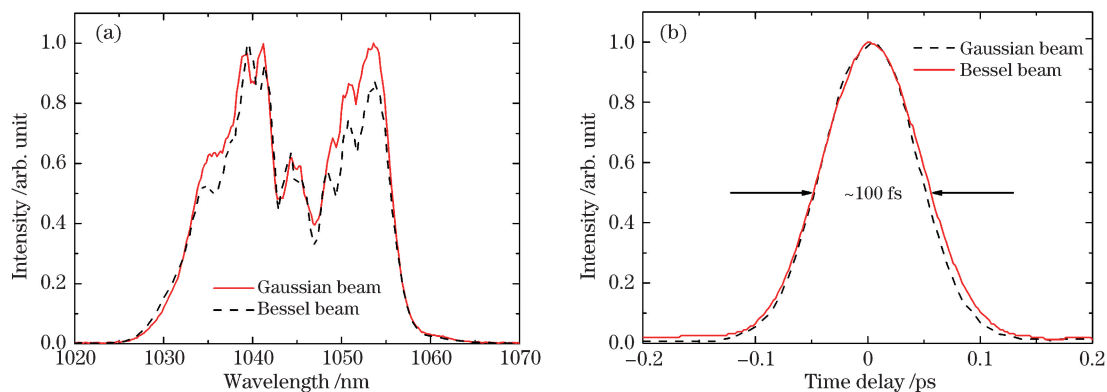


图2 高斯光束和贝塞尔光束的(a)光谱和(b)自相关曲线

Fig. 2 (a) Spectra and (b) autocorrelation traces of the Bessel and Gaussian beams

2.2 GaP 波导型太赫兹波发射器

相对于块状 GaP 晶体,波导型 GaP 晶体的优势是可以将产生的太赫兹波约束在晶体中,通过改变太赫兹波的相折射率可以实现抽运光和太赫兹波之间严格的相位匹配^[18]。在矩形波导中,太赫兹波的折射率被近似修正为^[33]

$$n_{\text{THz}} = \frac{c}{\Omega} \sqrt{\left(\frac{\Omega}{c} n_{\text{THz}}\right)^2 - \left(\frac{\pi m}{a}\right)^2 - \left(\frac{\pi n}{b}\right)^2}, \quad (3)$$

式中 c 为真空中的光速, Ω 为太赫兹波的角频率, n_{THz} 为材料的太赫兹波折射率, m, n 为太赫兹波传导模式的阶数, a, b 为波导的横截面边长,实验中 a, b 分别为 1.0 mm 和 0.7 mm。根据理论分析^[18],导波中基模能量占发射总能量的 95% 以上,故仅考虑太赫兹波基模,即取 $m = n = 1$ 。

根据 Sellmeier 公式计算得到 1040 nm 处的抽运光的群折射率($n_g = 3.327$)以及太赫兹波在块状晶体中的折射率,利用(3)式可以得到太赫兹波在波导中的折射率,结果如图 3 所示。可以看出,在 GaP 波导中抽运光和太赫兹波之间可以实现严格的相位匹配,进而能有效提高太赫兹波的输出功率。

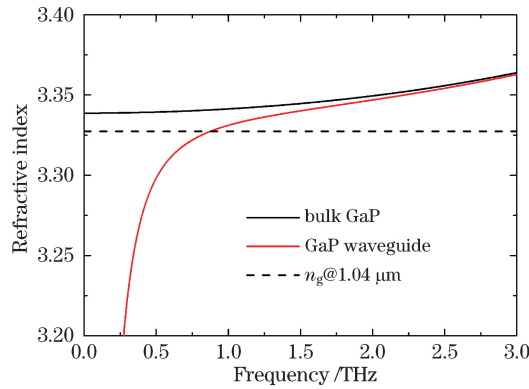


图 3 块状 GaP 晶体和 GaP 波导中的太赫兹波折射率以及 1040 nm 处的抽运光群折射率曲线

Fig. 3 Refractive index of THz wave for bulk GaP, GaP waveguide and group refractive index of pump light at 1040 nm

3 实验结果和分析

使用如图 4 所示的实验装置(上部框线部分)对比测量贝塞尔光束和高斯光束分别抽运块状 GaP 晶体和 GaP 波导时的太赫兹波空间分布。入射抽运光功率为 5 W,块状晶体入射面规格为 10 mm×10 mm,波导入射面为 0.7 mm×1.0 mm。在太赫兹波发射晶体后加硅片滤除剩余抽运光,太赫兹波功率探测计 Golay cell 放置在三维调整架上,分别测量硅片后 1, 9, 19 mm(Golay cell 探头和硅片后表面之间的距离)处的太赫兹波场分布,具体测量结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出,在贝塞尔光束和高斯光束分别抽运时,无论是块状 GaP 晶体还是 GaP 波导产生的太赫兹波空间场均与高斯分布吻合,结合图 1(b)中的抽运光强度分布,可以认为只有贝塞尔光束中心部分强度较高的光参与到了光学整流效应中,外环部分由于能量密度较低产生的太赫兹波较弱。

对图 1(b)中所示的贝塞尔光束的强度分布进行积分,计算得到贝塞尔光束中心部分能量约占总能量的 33%,与实验中观察到的 3 个环状结构基本一致。为了对比具有相同能量的贝塞尔中心光束和高斯光束的光学整流效率,利用图 4 所示装置(下部框线部分)测量太赫兹波的输出功率。通过调节轴棱锥前入射功率的大小确保贝塞尔光束的中心光斑和聚焦高斯光束的中心光斑具有相同的功率,比较在中心光斑功率相同情况下高斯光束和贝塞尔中心光束的太赫兹波产生功率,具体测量结果如图 6 所示。利用二次曲线对实验数据进行拟合,从图中可以发现,实验数据和理论拟合吻合得很好,说明在实验中太赫兹波的输出功率和入射功率的平方成正比,与理论预期吻合^[13]。

从图 6 可以看出,对于 6 mm 的 GaP 波导,在贝塞尔中心光束和聚焦高斯光束的功率相等时,它产生的太赫兹波功率要明显高于高斯光束,平均效率为 3.46 倍。在 5 mm 的块状 GaP 晶体中,贝塞尔光束产生的太赫兹波输出功率比高斯光束平均高出 2.04 倍,因此在较长的波导中贝塞尔光束相对高斯光束的优势更加

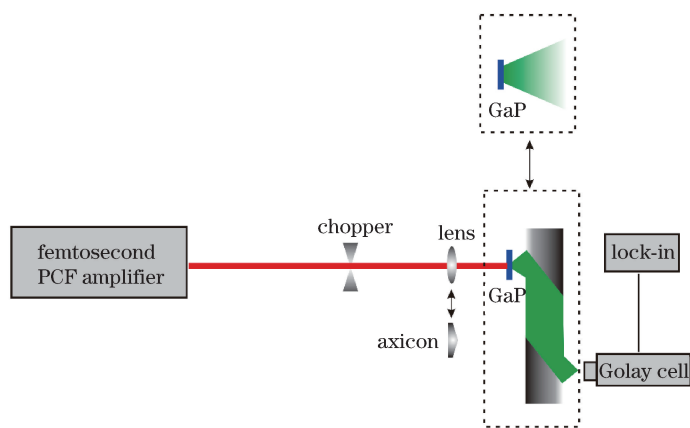


图 4 利用高斯(透镜)或贝塞尔(轴棱锥)飞秒激光在 GaP 发射器中产生太赫兹波的实验装置图

Fig. 4 Experimental setup for THz wave generated from GaP emitters by a femtosecond Gaussian (with a lens) beam or a Bessel (with an axicon) beam

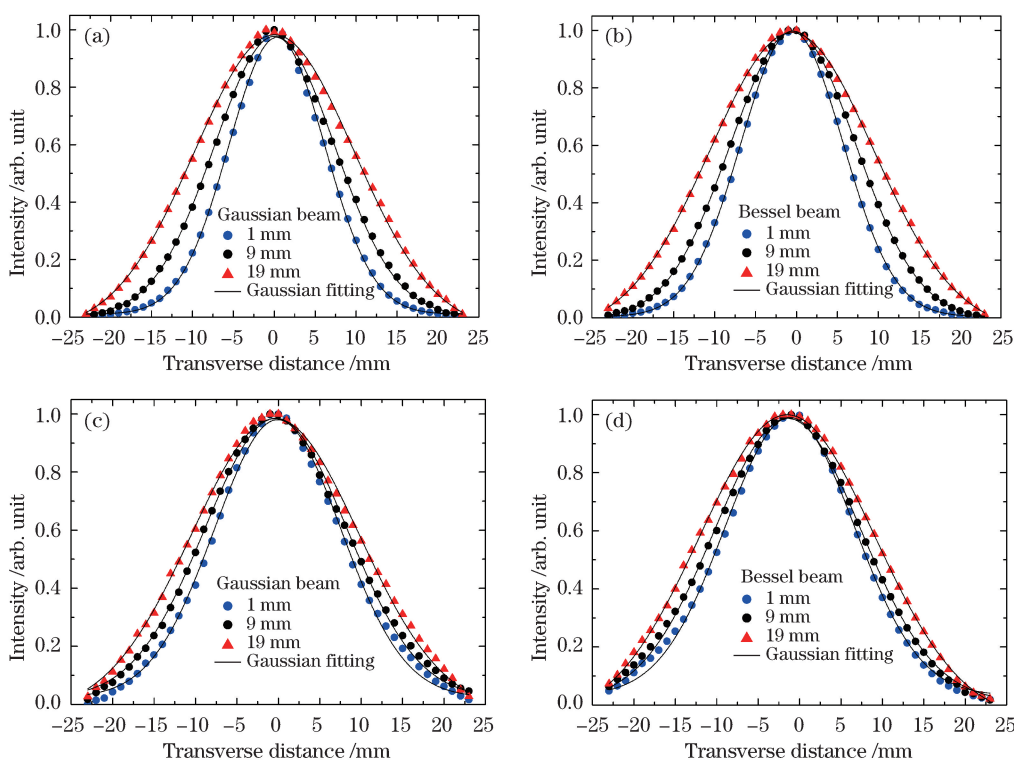


图 5 高斯光束和贝塞尔光束分别抽运(a)(b)块状 GaP 晶体以及(c)(d) GaP 波导时太赫兹波的空间分布

Fig. 5 THz wave spatial profiles measured after (a)(b) GaP bulk crystal and (c)(d) GaP waveguide for Gaussian and Bessel pump beams

明显。另外,根据实验结果,在相同的人射抽运条件下,GaP 波导的太赫兹波输出功率是 GaP 块状晶体输出的几倍,这是由于在 GaP 波导中抽运光束和太赫兹波能实现严格的相位匹配,从而提升了波导(6 mm)相对块状晶体(5 mm)的非线性相互作用。

通过太赫兹波时域光谱技术测量贝塞尔光束和高斯光束分别抽运 5 mm 的块状 GaP 晶体和 6 mm 的 GaP 波导时的太赫兹波时域信号和频谱,结果如图 7 所示。由图 7(a)可以看出,在块状 GaP 晶体中,贝塞尔光束和高斯光束分别抽运时得到的太赫兹波时域信号和频谱基本相同,带宽达到 2.5 THz,结合图 2 中这两种抽运光的时域和频谱特征,得到的实验结果符合理论预期。在 GaP 波导中,贝塞尔光束抽运得到的太赫兹波频谱相比高斯光束抽运时的中心频率更低,初步分析是由于贝塞尔光束波矢的锥形分布在波导结构中对相位匹配条件的影响更大所致,详细的原因还需要利用严格的理论模型做进一步分析。

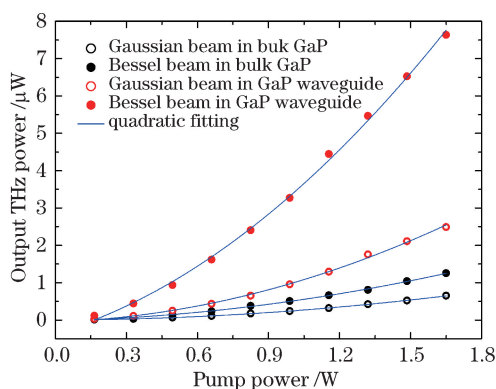


图 6 块状 GaP 晶体和 GaP 波导中贝塞尔中心光束和高斯光束产生的太赫兹波功率随抽运功率的变化
Fig. 6 Output THz power from GaP bulk crystal and GaP waveguide using Bessel and Gaussian pump beams as a function of pump power

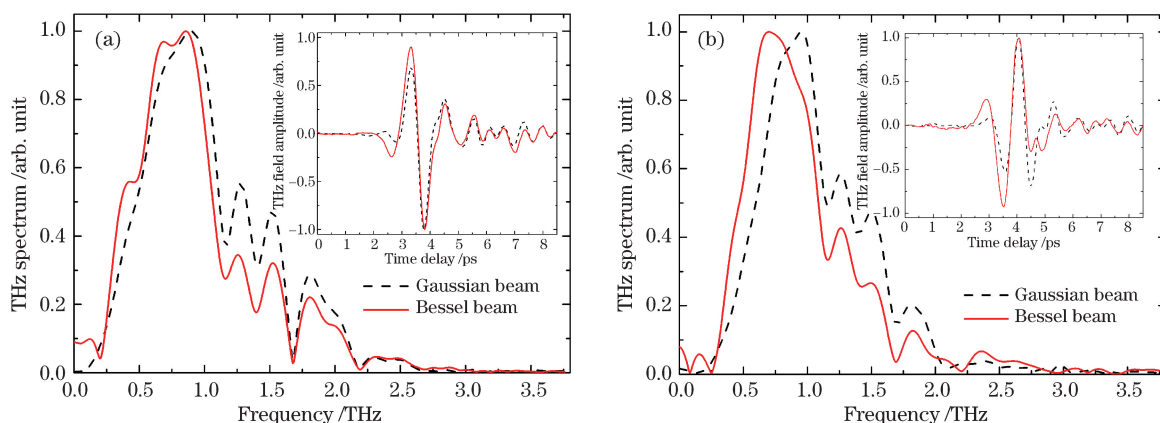


图 7 贝塞尔光束和高斯光束分别抽运 (a) 块状 GaP 晶体和 (b) GaP 波导时的太赫兹波频谱和时域信号 (插图)
Fig. 7 Spectra and time-domain traces (insets) of the THz wave generated from (a) GaP bulk crystal and (b) GaP waveguide by Bessel and Gaussian pump beams

4 结 论

实验证实具有无衍射特性的贝塞尔光束的中心光斑和高斯光束功率相同、光斑大小相当时,在 5 mm 的 GaP 块状晶体中,贝塞尔光束的光学整流效率是高斯光束的 2.04 倍,考虑到相位匹配的影响,GaP 波导结构比块状晶体具有更加明显的优势,平均效率提高为 3.46 倍。抽运光束的强度分布特性直接影响到太赫兹波的场分布,贝塞尔中心光束的高斯分布特性使其和高斯光束具有可比性,因而产生的太赫兹波具有高斯分布特征。相对高斯光束,贝塞尔光束抽运 GaP 波导产生的太赫兹波频谱出现明显的红移现象,而在 GaP 块状晶体中两种抽运光产生的太赫兹波频谱类似。

参 考 文 献

- 1 Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology[J]. Nature Materials, 2002, 1(1): 26-33.
- 2 Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 97-105.
- 3 Pickwell E, Wallace V P. Biomedical applications of terahertz technology[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(17): R301-R310.
- 4 Yao Jianquan, Chi Nan, Yang Pengfei, *et al.* Study and outlook of terahertz communication technology[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(9): 2213-2233.
- 5 Stacey G J. THz low resolution spectroscopy for astronomy[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2009, 36(9): 2213-2233.

- 2011, 1(1): 241-255.
- 6 Federici J F, Schulkin B, Huang F, *et al.* THz imaging and sensing for security applications: explosives, weapons and drugs[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2005, 20(7): S266-S280.
 - 7 Sun Bo, Yao Jianquan. Generation of terahertz wave based on optical methods[J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(10): 1349-1359.
孙 博, 姚建铨. 基于光学方法的太赫兹辐射源[J]. *中国激光*, 2006, 33(10): 1349-1359.
 - 8 Kitaeva G Kh. Terahertz generation by means of optical lasers[J]. *Laser Physics Letters*, 2008, 5(8): 559-576.
 - 9 Hoffmann M C, Fülöp J A. Intense ultrashort terahertz pulses: generation and applications[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011, 44(8): 083001.
 - 10 Rice A, Jin Y, Ma X F, *et al.* Terahertz optical rectification from $\langle 110 \rangle$ zinc-blende crystals[J]. *Applied Physics Letters*, 1994, 64(11): 1324-1326.
 - 11 Chang G Q, Divin C J, Liu C H, *et al.* Power scalable compact THz system based on an ultrafast Yb-doped fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2006, 14(17): 7909-7913.
 - 12 Hebling J, Almási G, Kozma I Z, *et al.* Velocity matching by pulse front tilting for large-area THz-pulse generation[J]. *Optics Express*, 2002, 10(21): 1161-1166.
 - 13 Hebling J, Yeh K L, Hoffmann M C, *et al.* Generation of high-power terahertz pulses by tilted-pulse-front excitation and their application possibilities[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2008, 25(7): B6-B19.
 - 14 Fülöp J A, Ollmann Z, Lombosi C, *et al.* Efficient generation of THz pulses with 0.4 mJ energy[J]. *Optics Express*, 2014, 22(17): 20155-20163.
 - 15 Hoffmann M C, Yeh K L, Hwang Y H, *et al.* Fiber laser pumped high average power single-cycle terahertz pulse source [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(14): 141107.
 - 16 Liu F, Song Y J, Xing Q R, *et al.* Broadband terahertz pulses generated by a compact femtosecond photonic crystal fiber amplifier[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(11): 814-816.
 - 17 Li J, Chai L, Shi J K, *et al.* Generation of 0.3 mW high-power broadband terahertz pulses from GaP crystal pumped by negatively chirped femtosecond laser pulses[J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(12): 125404.
 - 18 Chang G Q, Divin C J, Yang J, *et al.* GaP waveguide emitters for high power broadband THz generation pumped by Yb-doped fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2007, 15(25): 16308-16315.
 - 19 Liu Feng, Li Yi, Shi Junkai, *et al.* Frequency tunable terahertz pulses generated from GaP waveguide emitter[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(3): 034210.
刘 丰, 李 毅, 石俊凯, 等. GaP 波导型发射器产生频率可调谐太赫兹脉冲[J]. *物理学报*, 2012, 61(3): 034210.
 - 20 McGloin D, Dholakia K. Bessel beams: Diffraction in a new light[J]. *Contemporary Physics*, 2005, 46(1): 15-28.
 - 21 Chau K J, Dechant A L, Elezzabi A Y. High-bandwidth terahertz radiation from ponderomotively accelerated carriers using Bessel-Gauss femtosecond pulses[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(6): 064106.
 - 22 Gildenburg V B, Vvedenskii N V. Optical-to-THz wave conversion via excitation of plasma oscillations in the tunneling-ionization process[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98(24): 245002.
 - 23 Kostin V A, Vvedenskii N V. Ionization-induced conversion of ultrashort Bessel beam to terahertz pulse[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(2): 247-249.
 - 24 Liu P X, Shi W, Xu D G, *et al.* Efficient phase-matching for difference frequency generation with pump of Bessel laser beams[J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 901-906.
 - 25 Durnin J. Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1987, 4(4): 651-654.
 - 26 Durnin J, Miceli J J, Jr, Eberly J H. Diffraction-free beams[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(15): 1499-1501.
 - 27 MacDonald R P, Boothroyd S A, Okamoto T, *et al.* Interboard optical data distribution by Bessel beam shadowing[J]. *Optics Communications*, 1996, 122(4-6): 169-177.
 - 28 Bouchal Z, Wagner J, Chlup M. Self-reconstruction of a distorted nondiffracting beam [J]. *Optics Communications*, 1998, 151(4-6): 207-211.
 - 29 Brzobohatý O, Čížmár T, Zemánek P. High quality quasi-Bessel beam generated by round-tip axicon[J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 12688-12700.

- 30 Wu Fengtie, Lu Wenhe, Ma Baotian. The beam propagation and transformation in axicon-lens system[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(9): 2557-2560.
吴逢铁, 卢文和, 马宝田. 轴棱锥——透镜系统的光束传输与变换[J]. 光学学报, 2009, 29(9): 2557-2560.
- 31 Lu Wenhe, Wu Fengtie, Zheng Weitao. Generation of non-diffraction Bessel-liked beam using a lens axicon[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1618-1621.
卢文和, 吴逢铁, 郑维涛. 透镜轴棱锥产生近似无衍射贝塞尔光束[J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1618-1621.
- 32 Chai Lu, Hu Minglie, Fang Xiaohui, *et al.* Advances in femtosecond laser technologies with photonic crystal fibers[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0101001.
柴 路, 胡明列, 方晓惠, 等. 光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0101001.
- 33 Zhang K Q, Li D J. Electromagnetic theory for microwaves and optoelectronics[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2007: 346-349.