

GaP 波导型发射器产生频率可调谐太赫兹脉冲*

刘丰 李毅 石俊凯 胡晓堃 李江 栗岩锋[†]
邢岐荣 胡明列 柴路 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术教育部重点实验室, 超快激光研究室, 太赫兹波研究中心, 天津 300072)

(2011年3月15日收到; 2011年5月16日收到修改稿)

报道了利用脉宽可调的光子晶体光纤飞秒激光放大器抽运矩形波导结构的 GaP 晶体太赫兹 (THz) 发射器产生频率可调谐的超快 THz 脉冲. 非线性晶体中光整流过程产生的 THz 辐射频率随抽运光脉冲宽度而变化. GaP 波导 THz 发射器可通过波导的几何尺寸来控制色散, 以达到增加有效作用长度和提高输出功率的目的. 不同横截面尺寸的波导型发射器的 THz 辐射峰值频率随相位匹配条件的改变而改变, 加以脉宽调节技术, 可以在大频谱范围获得频谱精细可调的 THz 脉冲. 实验中在 $1\text{ mm} \times 0.7\text{ mm}$ 的波导型 THz 发射器中获得了频率可调谐的 THz 脉冲. 提出实现 THz 辐射频率大范围调谐的 GaP 波导型阵列发射器的实施方案.

关键词: 超快太赫兹波, 频率调谐, GaP 波导, 光子晶体光纤飞秒激光

PACS: 42.65.Re, 42.65.Ky, 07.57.Hm

1 引言

超快太赫兹 (THz) 波在成像、无损探伤、安检、质检、物化分析等生产和科研领域有很好的应用前景^[1-5], 特别是许多有机大分子, 尤其是生物材料和新型功能材料的分子转动、振动能级多处于 THz 频段, 利用 THz 波技术可以得到它们在这个波段丰富的信息, 从而形成了 THz 光谱学^[6-13]. 可调谐的超快 THz 辐射脉冲在这个领域格外体现出其优势, 目前有许多技术可以实现频率调谐的 THz 脉冲. 采用倾斜脉冲波面 (tilted pulse front) 激发产生 THz 辐射脉冲技术中, 利用色散元件改变抽运光脉冲波面倾斜角度实现在不同中心波长处的相位匹配, 输出中心频率可调的 THz 脉冲^[14]; 使用空间光调制器对抽运光脉冲进行整形产生可调谐 THz 脉冲^[15]; 使用两束抽运光以一定夹角入射到发射晶体中, 通过改变抽运光的夹角产生频率可调谐的 THz 波^[16]. 这些报道的方法已经

产生了清晰可调谐的 THz 波, 但是它们或使用了复杂的光路调节技术, 增加了系统的复杂性与操作难度, 或是产生的 THz 波具有较大的频谱基底, 对应用造成了一定影响. 一种操作方便、频谱边缘陡峭的超快 THz 频率调谐技术是 THz 研究领域所急需的. 本文报道一种矩形波导型 GaP 发射器, 通过改变抽运超短光脉冲的脉冲宽度, 方便地实现所产生的 THz 频率调谐的技术, 实验方法简单, 输出 THz 频谱边缘陡峭. 基于理论和实验结果设计出一种实现 THz 辐射频率大范围调谐的 GaP 波导型阵列发射器.

2 基于调节抽运光脉宽的 THz 波频率调谐

利用超快激光脉冲在非线性晶体中的光整流效应产生超快 THz 波, 是光学方法产生宽带 THz 辐射的一种重要方法, 它的本质是激光脉冲的各个

* 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划)(批准号: 2007CB310408, 2010CB327604, 2011CB808101)、国家自然科学基金 (批准号: 61077083, 61027013, 60838004, 61078028)、高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 200800560026)、全国优秀博士学位论文作者专项基金 (批准号: 2007B34)、“111” 计划 (批准号: B07014) 和教育部新世纪优秀人才支持计划 (批准号: NCET-07-0597) 资助的课题.

[†] E-mail: yanfengli@tju.edu.cn

频率成分之间进行非线性差频, 获得一个低频的振荡电场^[17], 对于飞秒激光脉冲, 其激发出的皮秒量级的低频振荡电场正位于 THz 波段. 由 Maxwell 方程在慢变包络近似下可得到的光整流过程产生的低频 THz 电场频域的表达式^[18]

$$\frac{dE(\Omega, z)}{dz} = -\frac{i\mu_0\Omega c}{2n_{\text{THz}}} P_{\text{NL}}(\Omega) \exp(i\Delta kz), \quad (1)$$

其中 Ω 为所产生的 THz 波的角频率, μ_0 为真空磁导率, n_{THz} 为 THz 波的相折射率, $P_{\text{NL}}(\Omega)$ 为频域中的非线性极化强度, $\Delta k = \frac{\Omega}{c}(n_{\text{THz}} - n_{\text{opt}}^{\text{gr}})$ 为光整流过程中的相位失配项. 理想的非线性过程满足相位匹配条件, 即抽运光的群速度 $n_{\text{opt}}^{\text{gr}}$ 等于所产生 THz 波的相速度, 失配项为零或很小, 可产生较宽频段的 THz 辐射.

对于块状晶体, 由 (1) 式可以求得高斯型飞秒激光脉冲在非线性和晶体中通过光整流原理产生超快 THz 波的频域电场表达式为

$$E_{\text{THz}}(\Omega) \propto \Omega d_{\text{eff}} \exp\left[-\left(\frac{\tau_{\text{opt}}\Omega}{4\sqrt{\ln 2}}\right)^2\right], \quad (2)$$

其中 d_{eff} 为非线性晶体的有效非线性系数, τ_{opt} 为入射的抽运光脉冲时域 FWHM 宽度. 从 (2) 式中可以清楚地看到, 光整流方法产生的 THz 辐射脉冲的频谱与抽运光脉冲宽度直接相关.

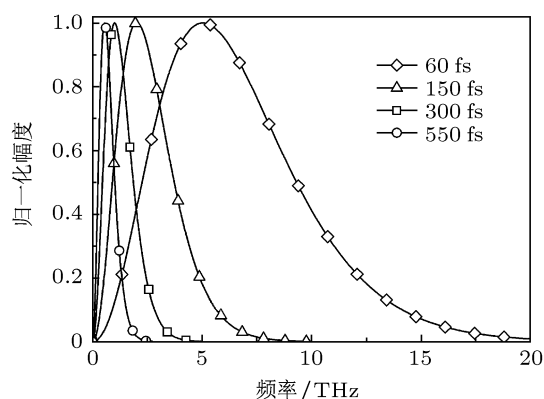


图 1 抽运光脉冲宽度的变化对块状发射器产生 THz 波频谱的影响. 模型使用的是双曲正割型抽运脉冲, 忽略发射器辐射宽度、声子共振吸收等影响

通过模拟块状 GaP 发射器在自相似光纤放大系统输出的中心波长 1040 nm 的双曲正割型脉冲抽运下, 产生的 THz 波频谱与抽运光脉冲宽度参数的关系, 如图 1 所示. 可以清晰看出, 抽运光的脉宽越窄, 产生的 THz 频谱越宽, 且其峰值向高频移动. 理论模拟中忽略了产生晶体的辐射带宽及声子共振吸收等本征限制条件, 实际晶体中产生的 THz

波带宽要远低于理论结果, 以 GaP 晶体为例, 其横向光学声子共振吸收峰位于 10.9 THz, 故实际产生的 THz 辐射低于该共振频率.

3 基于 GaP 波导的 THz 发射器

为了提高光整流方法产生 THz 波的转换效率, 需要使用窄脉宽的激光作为抽运源^[19]. 在较窄的光脉冲抽运下, 块状晶体发射器产生的 THz 频谱很宽, 但是对于光谱分析等场合, 这种宽而不锐的 THz 频谱是需要避免的, 理想的输出应为频率可在大范围内调谐的频谱, 且应具有陡峭的边缘. 如前所述, 通过调节抽运光脉冲宽度可以调谐 THz 波的中心频率. 为了获得窄而可调的频谱, 我们引入波导型发射器.

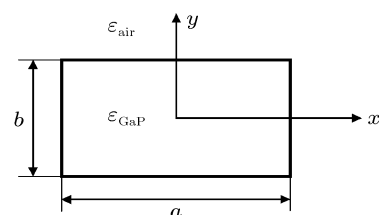


图 2 矩形 GaP 波导发射器横截面示意图

如图 2 所示, 这种 GaP 矩形波导横截面尺寸为 $a \times b$, 外围是空气, 属于高折射率差型介质波导. 当波导尺寸处于 THz 波的波长尺度时, 可有效地将产生的 THz 波约束在晶体中, 而相对于光波长几个数量级的尺度将不对抽运光起到约束作用, 仍按照块状晶体对待. 对于矩形截面波导, 基模包含水平和垂直偏振的两个不同的空间分布, a, b 取不同的值使得产生的 THz 波模场具有非对称的传输特性, 防止两种基模互相耦合造成输出的不稳定, 由于波导的约束, 所传输 THz 波的相折射率发生了改变, 块状晶体中的折射率被修正为波导中的等效相折射率^[20]

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

其中 n_{THz} 为块状晶体中 THz 波的折射率, m, n 为 THz 传导模式的阶数. 理论上讲, 导波中基模能量占发射总能量的 95% 以上, 故仅考虑 THz 基模, 取 $m = n = 1$.

由于波导中 THz 波的相折射率发生了改变, 于是相位匹配条件也发生了变化. 不同波导结构导致 THz 相折射率曲线发生弯曲, 其与抽运光群折射率的匹配点也发生了移动, 利用修正了的相位失配项

$$\Delta k = \frac{\Omega}{c}(n_{\text{THz, WG}} - n_{\text{opt}}^{\text{gr}}), \quad (4)$$

结合公式 1, 便可模拟出不同结构尺寸的波导发射器中产生的 THz 频谱.

我们设计了几种具有典型截面尺寸的波导, 在 100 fs 脉宽的双曲正割型抽运光脉冲条件下, 求出四种典型尺度矩形 GaP 波导发射器的 THz 发射频谱如图 3 所示. 可以看到, 不同的波导参数决定了所产生的 THz 脉冲的中心频谱, 且频谱边缘陡峭; 横截面尺寸越小, 产生的 THz 频率越高.

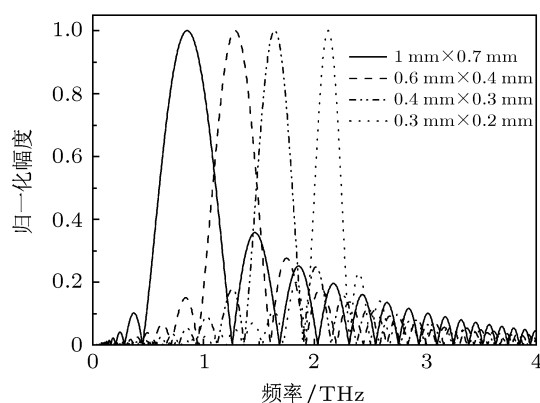


图 3 四种典型尺寸 GaP 矩形波导产生 THz 波频谱的模拟结果

采用波导发射器还具有另外的优势, 有研究表明最佳抽运光斑尺寸应该大致等于发射器中产生的 THz 峰值波长^[21], 故而在此条件下产生的 THz 波衍射效果很明显, 仅能在数个波长范围内准直传输, 对于较厚的晶体在临近出射表面处 THz 波和抽运光束交叠范围很小, 这种衍射效应阻止了 THz 波的空间相干累加而限制了厚晶体带来的功率提升潜力; 而介质波导型发射器, 将产生的发散 THz 波束缚在波导结构中, 通过减少衍射提高交叠体积提升了 THz 波的输出功率^[22].

4 实验研究

实验中使用的抽运源为实验室自制的大模场

面积光子晶体光纤飞秒激光放大系统^[23], 具有整体效率高、结构紧凑、散热特性优良、输出平均功率高等优势, 尤其是其方便的脉宽调谐方式, 使得通过调节抽运光参数调谐 THz 频率成为可能. 该系统结构如图 4(a) 所示, 使用掺镱大模面积光子晶体光纤 (LMA-PCF) 作为增益介质, 单级放大即可实现输出功率 20 W; 利用光子晶体光纤的高非线性展宽光谱, 可实现窄脉宽输出, 简化了系统结构; 通过调节放大器腔外压缩透射式光栅对间距来改变压缩色散量, 可以方便调节抽运源输出脉宽. 抽运源工作参数为输出光脉冲中心波长 1040 nm, 重复频率 52 MHz, 脉冲宽度 61 fs 至 1 ps 连续可调. THz 产生探测系统为典型 THz 时域频谱系统 (THz-TDS), 如图 4(b). 使用一块横截面为 (110) 面, 尺寸 1 mm×0.7 mm, 长度 6 mm 的本征 GaP 晶体波导发射器 (MolTech GmbH). 为了形成一个金属边界, 并尽量保持绝热条件以利于系统稳定工作, 使用一块镀金反射镜作为支撑, 托持 GaP 晶体的窄侧面, 精确调节抽运光束, 使之沿波导轴向聚焦耦合进发射晶体, 并轴向调节抽运光聚焦透镜实现最佳抽运光斑与波导口径的匹配, 实验中使用的抽运光焦斑直径约为 300 μm; 通过调节放大器压缩光栅对间距, 将抽运光脉冲从近 Fourier 变换极限的 61 fs 调节到正啁啾的 545 fs; 抽运光在 GaP 波导发射器中通过光整流过程辐射出超快 THz 脉冲, 经电光采样相干探测得到时域信号, 再由 Fourier 变换得到其频谱. 随着抽运光脉宽变窄, THz 波峰值频率从 0.46 THz 移动到 0.64 THz, 得到的频谱基底平整, 没有较大的频谱子峰, 主峰边缘陡峭, 结果如图 5 所示, 与图 3 理论模拟中相应尺寸的结果符合得很好. 输出峰值波长与抽运光脉冲宽度关系见图 5 插图.

需要指出的是, 虽然抽运源可以通过调节色散量继续将脉宽加宽, 但是我们实验中将其调节到 500 fs 后就不再继续加宽, 不使用更宽的脉冲来进行实验的原因是测量到的 THz 时域信号强度半高全宽度一般在 1—1.5 ps, 使用 500 fs 的脉冲探测光已经接近了探测极限, 使用更宽的脉冲来采样, 可能会造成信号的畸变, 另外过宽的抽运脉冲峰值功率很低, 直接导致转换效率下降, 输出 THz 波功率及信噪比降低.

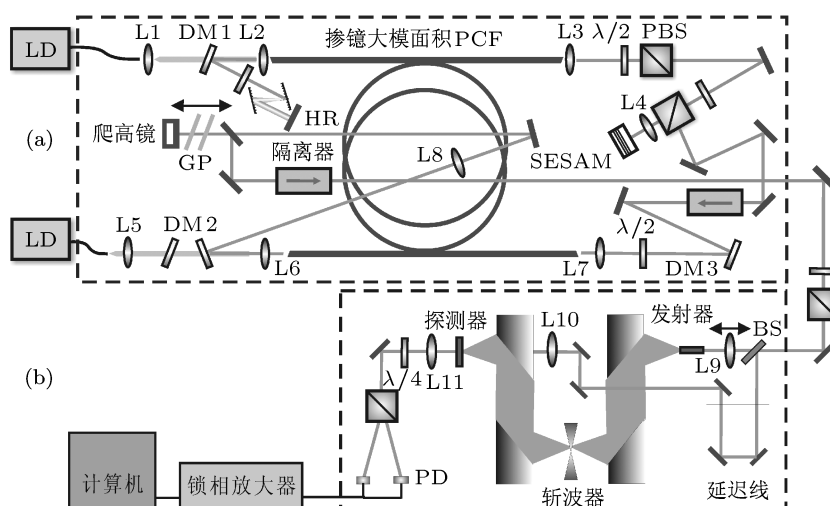


图4 实验系统结构示意图 (a) 抽运源系统; DM, 双波长反射透射镜; L, 球面透镜; PBS, 偏振分束器; GP, 透射式压缩光栅对; SESAM, 可饱和吸收体反射镜; HR, 全反射镜; (b) THz 时域频谱系统; BS, 分束器; PD, 光电二极管探测器

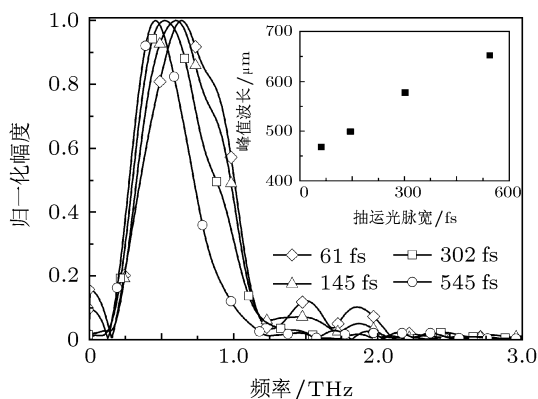


图5 波导发射器产生的 THz 波频率随抽运光脉冲宽度的改变而调谐

5 GaP 波导型发射器阵列

上述实验证明了通过调节抽运光脉冲宽度可以方便地调谐输出 THz 波频谱, 但实验结果也表明在某一特定结构的波导发射器中, 受波导结构限制, 频率调谐范围比较小, 难以满足宽频谱研究的需求. 为了拓宽调谐范围, 我们研究了不同参数的波导发射器, 通过改变抽运光与 THz 在发射器中的相位匹配条件, 设计了数个连续的匹配频带, 以满足大范围调谐的需求.

设计出一种波导阵列型发射器, 如图 6 所示. 在带有金属界面的绝热介质基底上平行安装 4 块横截面尺寸递减且长度相等的 GaP 波导发射器, 构成一个集成的发射器阵列, 该器件多维可调, 且整体安装在水平平移台上, 通过平动选择一块波导作

为发射器, 调节抽运光聚焦透镜将抽运光束以合适的焦斑耦合进一块波导, 即实现了粗调匹配频谱范围; 再通过调节抽运源压缩光栅对间距, 在该匹配频谱范围内精密调谐输出频谱, 最终即可实现在大范围内精细调节输出的 THz 频谱. 依前述理论计算及实验结果, 图 6 中发射器阵列预期调谐频段从 0.5 THz 至 2.3 THz, 调谐量达 1.8 THz.

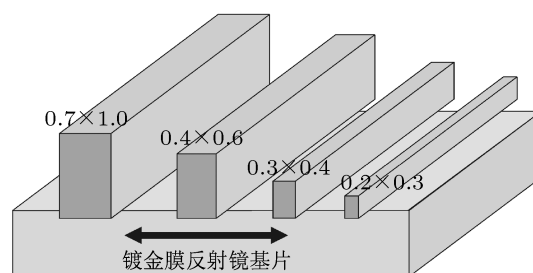


图6 GaP 波导发射器阵列 (尺寸参数单位为 mm)

6 结论

理论及实验证明了通过调节抽运光脉冲宽度来实现输出 THz 波频谱的调谐是一种简单易行的方法, 它利用传统的 THz 时域频谱系统, 无需重新调节光路, 简化了操作, 也不需要引入额外的损耗元件, 不会削弱产生效率, 且输出 THz 波频谱边沿陡峭, 具有较好的应用潜力. 设计了一种包含不同尺寸波导的阵列型 THz 波发射器件, 以实现大范围高精度的宽带 THz 频率调谐.

- [1] Tonouchi M 2007 *Nature Photon.* **1** 97
- [2] Hebling J, Yeh K L, Hoffmann M C, Nelson K A 2008 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **14** 345
- [3] Lu J Y, Chen L J, Kao T F, Chang H H, Chen H W, Liu A S, Chen Y C, Wu R B, Liu W S, Chyi J I, Sun C K 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 2254
- [4] He Y T, Jiang Y S, Zhang Y D, Fan G L 2010 *Chin. Opt. Lett.* **8** 162
- [5] Lang L Y, Xing Q R, Li S X, Mao F L, Chai L, Wang Q Y 2004 *Chin. Opt. Lett.* **2** 677
- [6] Ralph S E, Perkowitz S, Katzenellenbogen N, Grischkowsky D 1994 *J. Opt. Soc. Am. B* **11** 2528
- [7] Wang C L, Tian Z, Xing Q R, Gu J Q, Liu F, Hu M L, Chai L, Wang Q Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7857 (in Chinese) [王昌雷, 田震, 邢岐荣, 谷建强, 刘丰, 胡明列, 柴路, 王清月 2010 物理学报 **59** 7857]
- [8] Dorney T D, Baraniuk R G, Mittleman D M 2001 *J. Opt. Soc. Am. A* **18** 1562
- [9] Hou B H, Jian Y Z, Wang Y L, Zhang E P, Fu P Z, Wang L, Zhong R B 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4640 (in Chinese) [侯碧辉, 菅彦珍, 王雅丽, 张尔攀, 傅佩珍, 汪力, 钟任斌 2010 物理学报 **59** 4640]
- [10] Wang C, Gong J, Xing Q, Li Y, Liu F, Zhao X, Chai L, Wang C, Zheltikov A M 2010 *J. Biophot.* **3** 641
- [11] Ma X J, Zhao H W, Dai B, Liu G F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3429 (in Chinese) [马晓菁, 赵红卫, 代斌, 刘桂锋 2008 物理学报 **57** 3429]
- [12] Chen H, Wang L 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2785
- [13] Yang Y P, Feng S, Feng H, Pan X C, Wang Y Q, Wang W Z 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 027802 (in Chinese) [杨玉平, 冯帅, 冯辉, 潘学聪, 王义全, 王文忠 2011 物理学报 **60** 027802]
- [14] Hebling J, Stepanov A G, Almäsi G, Bartal B, Kuhl J 2004 *Appl. Phys. B* **78** 593
- [15] Ahn J, Efimov A V, Averitt R D, Taylor A J 2003 *Opt. Express* **11** 2486
- [16] Stepanov A G, Hebling J, Kuhl J 2004 *Opt. Express* **12** 4650
- [17] Bass M, Franken P A, Ward J F, Weinreich G 1962 *Phys. Rev. Lett.* **9** 446
- [18] Vodopyanov K L 2006 *Opt. Express* **14** 2263
- [19] Liu F, Song Y J, Xing Q R, Hu M L, Li Y F, Wang C L, Chai L, Zhang W L, Zheltikov A M, Wang C Y 2010 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **22** 814
- [20] Zhang K Q, Li D J 2007 *Electromagnetic Theory for Microwaves and Optoelectronics* (Berlin: Springer Verlag) pp346–349
- [21] Xu J Z, Zhang X C 2007 *Opt. Lett.* **27** 1067
- [22] Chang G Q, Divin C J, Yang J, Musheinish M A, Williamson S L, Galvanauskas A, Norris T B 2007 *Opt. Express* **15** 16308
- [23] Liu B W, Hu M L, Fang X H, Wu Y Z, Song Y J, Chai L, Wang C Y, Zheltikov A M 2009 *Laser Phys. Lett.* **6** 44

Frequency tunable terahertz pulses generated from GaP waveguide emitter*

Liu Feng Li Yi Shi Jun-Kai Hu Xiao-Kun Li Jiang Li Yan-Feng[†] Xing Qi-Rong
Hu Ming-Lie Chai Lu Wang Qing-Yue

(Ultrafast Laser Laboratory and Center for Terahertz Waves, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology (Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 15 March 2011; revised manuscript received 16 May 2011)

Abstract

We report on a frequency-tunable terahertz pulse train generated from a rectangular GaP waveguide emitter pumped by a pulse width tunable femtosecond photonic crystal fiber amplifier. The THz frequency can be tuned by varying the pump pulse duration. The dispersion of the emitter can be controlled via the geometry of the waveguide, and the coherent buildup length can be increased to scale up the output power. Waveguides with different cross sections can be used to tune the THz spectrum. Combined with the pump pulse duration tuning technique, THz pulses with a precisely tunable frequency can be obtained. In the experiment, tunable THz radiation is obtained from a GaP waveguide emitter with a cross section of 1 mm×0.7 mm. Finally, a GaP emitter array is designed to achieve a wider tuning range.

Keywords: ultrafast terahertz wave, frequency tuning, GaP waveguide, femtosecond photonic crystal fiber laser

PACS: 42.65.Re, 42.65.Ky, 07.57.Hm

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2007CB310408, 2010CB327604, 2011CB808101), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61077083, 61027013, 60838004, 61078028), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 200800560026), the FANEDD of China (Grant No. 2007B34), the 111 Project of China (Grant No. B07014), and the NCET of China (Grant No. NCET-07-0597).

[†] E-mail: yanfengli@tju.edu.cn