

# 基于光纤阵列的太赫兹辐射增强方法

鲁丹, 苏强, 齐鹏飞, 徐强, 张楠, 林列, 刘伟伟\*

南开大学现代光学研究所, 天津 300071

**摘要** 基于飞秒激光光纤阵列, 从实验上实现了太赫兹 (THz) 辐射的增强。结果表明, 使用阶跃型相位板产生光纤阵列, 在相同飞秒脉冲能量下, 相比于单光纤情况, 光纤阵列辐射 THz 信号强度被增强, 且 THz 信号强度与光纤数目成正比。当入射能量为 5.8 mJ 时, 8 根光纤时辐射的 THz 能量为 31.73 nJ, 辐射效率为  $5.47 \times 10^{-6}$ 。所提方法有望解决飞秒激光辐射 THz 过程中的能量饱和问题。

**关键词** 超快非线性光学; 激光成丝; 等离子体; 太赫兹

**中图分类号** O436

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201946.0614021

## Method for Terahertz Radiation Enhancement Using Filament Array

Lu Dan, Su Qiang, Qi Pengfei, Xu Qiang, Zhang Nan, Lin Lie, Liu Weiwei\*

*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China*

**Abstract** In this study, we experimentally demonstrated the enhancement of a terahertz (THz) signal generated by a femtosecond laser-filament array in air using a simple experimental setup in which a step phase plate is used to generate multiple parallel filaments. The results show that at a given incident-femtosecond-pulse energy, compared with the case of single filament, the proposed method enhances the THz radiation intensity, and the THz radiation intensity is proportional to the number of filaments. Further, at an incident energy of 5.8 mJ, the THz energy generated by eight filaments is 31.73 nJ and the radiation efficiency is  $5.47 \times 10^{-6}$ . This simple method can be used to solve the energy saturation problem in the generation of THz radiation through femtosecond laser filamentation in air.

**Key words** ultrafast nonlinear optics; laser filamentation; plasma; terahertz

**OCIS codes** 190.7110; 300.6495; 320.7110

## 1 引 言

太赫兹 (THz) 辐射由于其低光子能量、高带宽及高穿透性等优良特性, 在材料科学、安全检查、光通信、生物医疗等众多领域应用广泛, 近 20 余年来引起了研究者的巨大兴趣。飞秒激光成丝是产生 THz 波的重要方法之一, 这种新型的 THz 源因其特有远程传输、高峰值场强及空间强束缚等优势而受到广泛关注<sup>[1-10]</sup>。众所周知, THz 波在自由空间中传播会受到衍射、水蒸气的强烈吸收等影响, 这限制了 THz 波在大气中的传输。飞秒激光成丝方法将 THz 波束缚在光纤内, 克服传播衍射, 同时通过控制光纤实现 THz 源的远程传输。飞秒激光成丝

辐射 THz 的另一个重要优势是它的高峰值电场强度, 目前报道的由双色场抽运辐射的 THz 波的最大电场强度可高达  $8 \text{ MV/cm}$ <sup>[11]</sup>。

为进一步增强单色场飞秒激光成丝辐射出的 THz 波, 科研人员提出了不同的实验方案。一种方案是在光纤两侧施加横向静电场<sup>[12-13]</sup>, 即制造一个直流偏压光纤。据文献报道, 此方案可以实现 THz 能量的 3 个数量级的增强<sup>[14-15]</sup>。由于其所加电压需高达几千伏, 显然这种方法在安全性和实用性等方面具有很大局限性, 例如在 THz 远程遥感应用上, 侧向施加千伏电压并不是一个切实可行的方案。另一种方案是产生双光纤。通过共线传输两个有相对时间延迟的激光脉冲, 使得产

**收稿日期:** 2019-02-14; **修回日期:** 2019-03-12; **录用日期:** 2019-03-13

**基金项目:** 国家重点研发计划(2018YFB0504400)、国家自然科学基金(11574160)、111 计划(B16027)、强场激光物理国家重点实验室开放课题

\* **E-mail:** liuweiwei@nankai.edu.cn

生的双光丝在空间上重合,在时间上分离<sup>[16-17]</sup>;或者通过传输两束方向一致、且相互平行的飞秒激光,使双光丝在空间上分离,但在时间上同步<sup>[18-19]</sup>。上述两种飞秒激光双光丝增强 THz 辐射的方法,与单光丝情况相比,可以产生 2 倍左右的 THz 振幅增强。然而,这种方案要求非常精密的实验系统调节,即在时间与空间上双光丝的精确光学对准,对光路系统稳定性要求过高,这将极大限制飞秒激光成丝辐射 THz 在自然条件下的应用,大大削弱了其在远程探测中的技术优势。

基于此,本文提出了一种简单的方案用于增强飞秒激光成丝辐射 THz。在常规的双色飞秒激光成丝辐射 THz 的实验装置基础上,仅在激光光束中插入一片阶跃型相位板,即可在透镜的焦点附近产生平行的光丝阵列<sup>[20]</sup>。与上述增强成丝辐射 THz

的方案相比,该方法极大地简化了系统,在 THz 远程探测等实际应用领域具有极大潜力。

## 2 实验结果与讨论

实验装置如图 1 所示,一束中心波长为 800 nm、重复频率为 1 kHz、脉冲宽度为 30.52 fs 的飞秒激光经过平凸透镜(焦距  $f=150$  mm)在空气中聚焦。在被透镜聚焦后的飞秒激光中,插入一片厚度为 0.25 mm 的 I 型 BBO 倍频晶体。此时,在双色场(400 nm 和 800 nm)的共同抽运下,在透镜的几何焦点附近产生了等离子体光丝。等离子体光丝辐射出的 THz 波,经两面相同的  $90^\circ$  镀金膜离轴抛物面镜(口径  $D=75$  mm,反射焦距  $f=150$  mm)收集至 Golaycell 中。在 Golaycell 之前插入高阻硅片 and 3 THz 低通滤波片,以消除杂波干扰。

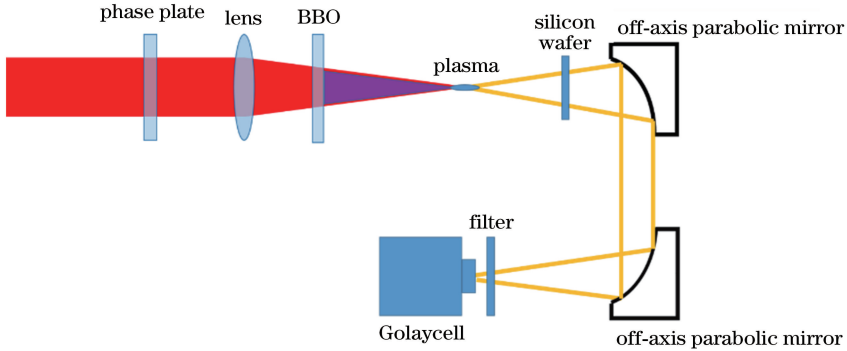


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

将一片阶跃型相位板插入激光光束中,如图 1 所示。实验中共使用 4 种阶跃型相位板(直径为 10 mm,厚度约为 1.6 mm),即二分之一相位板(semicircular phase plate, SCPP),四分之一相位板(quarter-circle phase plate, QCPP),六分之一相位板(six-octant phase plate, SOPP)和八分之一相位板(eight-octant phase plate, EOPP),分别如图 2(a)~(d)所示。 $x, y$  代表相位板的尺寸,黑白两色仅为区分相位板的区域,并不是相位板的真实颜色,色柱不具有实际的物理意义。阶跃型相位板的分区使用湿法刻蚀的方法,使扇形区域的基底材料厚度较相邻区域薄一些,相邻扇形区域厚度差满足对 800 nm 飞秒激光产生  $\pi$  的相位延迟。使用阶跃型相位板时,在透镜的几何焦点附近,会产生多根平行的等离子体光丝,即光丝阵列,且产生的光丝数目与相位板的分区数目相等,即二分之一相位板会产生双光丝,四分之一相位板会产生 4 根光丝,以此类推。

生光丝阵列的具体情况,使用电荷耦合器件(CCD)相机对光丝阵列的纵向分布侧向成像并记录,实验发现不同相位板产生光丝数目与理论预期一致,例如插入四分之一相位板时光丝阵列的纵向分布如图 2(e)所示,光丝在水平方向上平行排列。实验过程中,四分之一相位板的摆放如图 2(b)所示,即白色区域水平、黑色区域垂直,中间的两根光丝会在 CCD 图像上重合,因此产生了如图 2(e)所示的光丝分布。

接下来测量使用不同相位板在不同入射飞秒脉冲能量下成丝辐射 THz 的信号强度,结果如图 3(a)所示。为更加清晰呈现实验结果,图 3(a)中 0~3.5 mJ 部分被局部放大,如图 3(b)所示。可以看出,随着入射功率的增加,THz 信号增强。在相同入射能量条件下,THz 信号强度随着光丝数目的增加而增强。经过计算,当入射能量为 5.8 mJ 时,单光丝时的 THz 辐射能量为 26.12 nJ,辐射效率为  $4.50 \times 10^{-6}$ ; 8 根光丝时辐射的 THz 能量为 31.73 nJ,辐射效率为  $5.47 \times 10^{-6}$ 。

为从实验上验证在光路插入阶跃型相位板后产

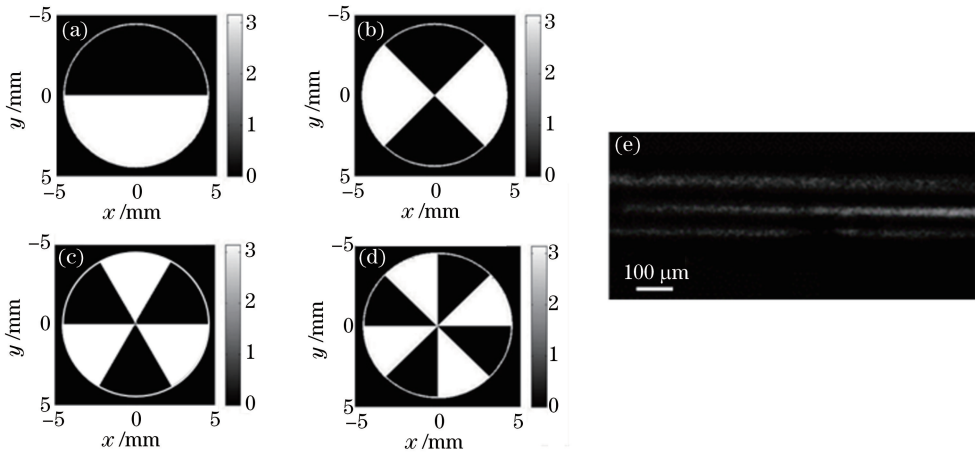


图 2 4 种阶跃型相位板及光丝阵列的纵向分布。(a)二分之一相位板(SCPP);(b)四分之一相位板(QCPP);(c)六分之一相位板(SOPP);(d)八分之一相位板(EOPP);(e)插入四分之一相位板时的光丝阵列的纵向分布

Fig. 2 Four kinds of step phase plates and longitudinal distribution of filament array. (a) Semicircular phase plate (SCPP); (b) quarter-circle phase plate (QCPP); (c) six-octant phase plate (SOPP); (d) eight-octant phase plate (EOPP); (e) longitudinal distribution of filament array when QCPP is inserted

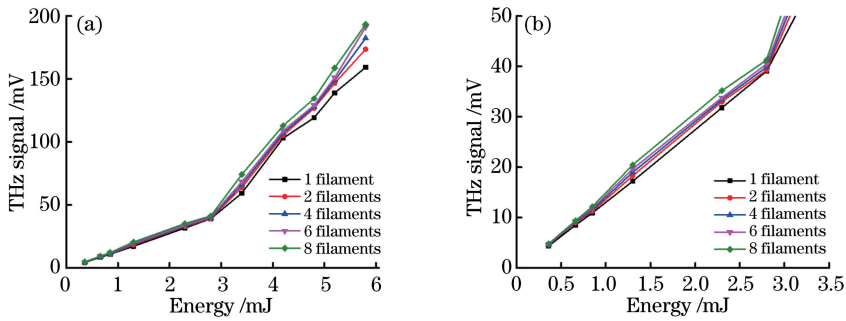


图 3 不同入射激光能量下的 THz 信号。(a) 0~6 mJ;(b)图 3(a)的局部放大图

Fig. 3 THz signals under different incident laser energies. (a) 0-6 mJ; (b) local magnification of Fig. 3(a)

接下来,用一片黑色的硬纸片遮挡相位板,如图 4(b)~(e)所示,使其仅露出一个扇区域,其目的在于保证只有一根光丝出现,测量 THz 信号,如图 4(f)所示。相同入射能量下,将相位板与遮挡相位板时的 THz 信号作对比,结果如图 4(g)所示,在相同入射能量下,8 根光丝辐射 THz 信号强度最大,相位板与遮挡相位板的比值最大,当入射能量为 5.2 mJ 时,其比值为 12。这证明是光丝阵列增强了 THz 辐射,并且 THz 辐射随着光丝数目的增加而增强。需要指出的是,图 4(f)中八分之一相位板与遮挡后的 THz 信号的比值为 4~12,波动较大,这是由于在入射激光能量小于 3 mJ 时,遮挡光斑后单光丝入射能量较低(小于 0.375 mJ),辐射的 THz 信号弱,如图 4(g)所示,在测量中引入了较大误差。

当飞秒激光束经过透镜聚焦时,光丝在几何焦点之前开始形成,并且随着入射激光能量的增加,光丝的长度向透镜的方向增大。在无外加透镜时,一

束准直高斯飞秒激光在传输过程中会发生自聚焦效应,形成所谓自聚焦透镜,相应焦距为<sup>[21]</sup>

$$z_f = \frac{0.367ka^2}{\left\{ \left[ \left( \frac{P}{P_{\text{crit}}} \right)^{1/2} - 0.852 \right]^2 - 0.0219 \right\}^{1/2}}, \quad (1)$$

式中: $k$  为波矢大小; $a$  ( $=7 \text{ mm}$ ) 为  $1/e^2$  处的光斑半径; $P$  为入射激光功率; $P_{\text{crit}}$  ( $=\frac{3.77\lambda^2}{8\pi n_0 n_2}$ ) 为自聚焦阈值功率, $\lambda$  为激光波长,折射率  $n_0$  和二阶非线性系数  $n_2$  满足依赖于入射光强  $I$  的折射率公式  $n = n_0 + n_2 I$ 。空气中,自聚焦阈值功率为  $3 \text{ GW}$ <sup>[22]</sup>。

使用焦距为  $f$  的透镜聚焦激光光束,自聚焦焦点位置为<sup>[23]</sup>

$$z'_f = \frac{z_f f}{z_f + f}. \quad (2)$$

因此,得到光丝长度为

$$L = f - z'_f. \quad (3)$$

将光丝近似为细长圆柱体,设 THz 信号强度正

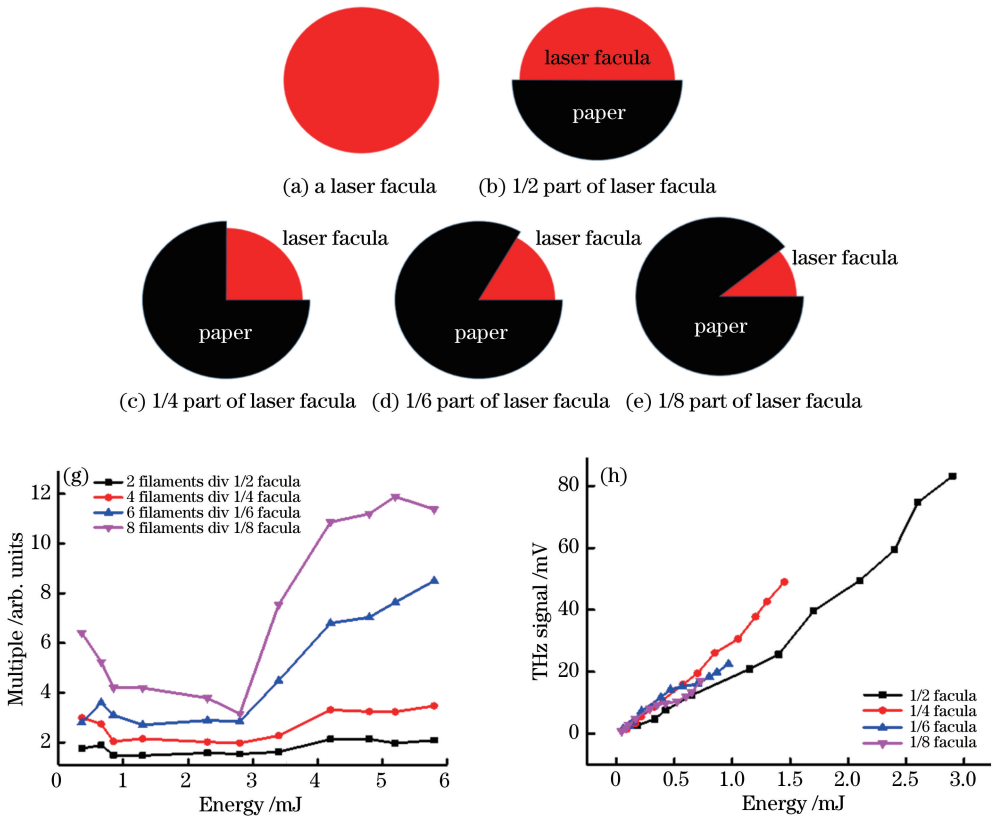


图 4 黑色硬纸片遮挡相位板的实验结果。(a)完整的激光光斑;(b)~(e)使用黑色的硬纸片遮挡相位板;  
 (f)相位板与遮挡相位板时 THz 信号的比值;(g)遮挡相位板时随入射能量变化的 THz 信号

Fig. 4 Experimental results when the phase plate is covered by a black paper. (a) Complete laser facula; (b)-(e) phase plate covered by a black paper; (f) THz signal ratio for covered and uncovered phase plates; (g) THz signal versus incident laser energy when the phase plate is covered by a black paper

比于光纤长度。根据(1)~(3)式,代入相关参数,将数据进行拟合,如图 5 实线所示,拟合曲线与实验数据相吻合。

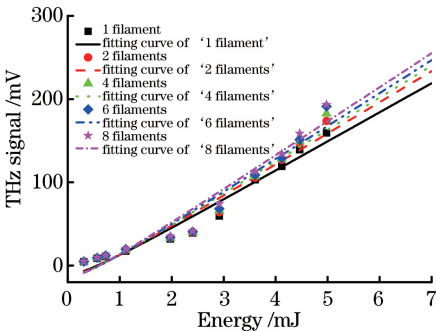


图 5 实验数据和理论拟合结果

Fig. 5 Experimental data and theoretical fitting results

除此之外,需要注意的是,THz 电场强度随着入射激光能量的增加,会出现饱和效应,如文献[24]中图 5 所示。当激光能量增加到一定数值时,光纤变长,而由色散导致的基频光与倍频光的时间走离使产生的 THz 波能量不再增加。利用相位板产生

光纤阵列,将入射激光能量再分配,可以更充分地利用入射激光能量,将达到饱和所需的入射激光能量值提高数倍。

### 3 结 论

提出了基于飞秒激光光纤阵列增强 THz 辐射的实验方案。基于光纤阵列的 THz 强度相比单丝情况下有所增强,并且 THz 强度随着光纤数目的增加而增大。当入射能量为 5.8 mJ,使用八分之一相位板,产生 8 根平行光纤阵列时,辐射的 THz 能量为 31.73 nJ,辐射效率为  $5.47 \times 10^{-6}$ 。这种利用阶跃型相位板的方法,极大简化了系统,不需要引入其他能量形式,如电能,并且充分利用入射的激光能量。可以预见,通过优化阶跃型相位板的结构设计,以产生更多光纤,本方法可以获得更高强度的 THz 辐射,因此这可能开启了一种新的方法来远程增强空气中的 THz 辐射。

致谢 本次实验由南京大学电子科学与工程学院金

颺兵教授、张彩虹副教授提供实验仪器设备与实验指导,户国梁同学协助完成实验。在此一并致以衷心的感谢!

## 参 考 文 献

- [1] Hamster H, Sullivan A, Gordon S, *et al.* Subpicosecond, electromagnetic pulses from intense laser-plasma interaction[J]. *Physical Review Letters*, 1993, 71(17): 2725-2728.
- [2] Roskos H G, Thomson M D, Kreß M, *et al.* Broadband THz emission from gas plasmas induced by femtosecond optical pulses: from fundamentals to applications[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2007, 1(4): 349-368.
- [3] D'Amico C, Houard A, Franco M, *et al.* Conical forward THz emission from femtosecond-laser-beam filamentation in air [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98(23): 235002.
- [4] Zhang Y, Chen Y, Marceau C, *et al.* Non-radially polarized THz pulse emitted from femtosecond laser filament in air[J]. *Optics Express*, 2008, 16(20): 15483-15488.
- [5] Kim K Y, Taylor A J, Glowia J H, *et al.* Coherent control of terahertz supercontinuum generation in ultrafast laser-gas interactions[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(10): 605-609.
- [6] Liu J L, Dai J M, Chin S L, *et al.* Broadband terahertz wave remote sensing using coherent manipulation of fluorescence from asymmetrically ionized gases [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(9): 627-631.
- [7] Sheng Z M, Mima K, Zhang J, *et al.* Emission of electromagnetic pulses from laser wakefields through linear mode conversion[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(9): 095003.
- [8] Bai Y, Song L W, Xu R J, *et al.* Waveform-controlled terahertz radiation from the air filament produced by few-cycle laser pulses [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(25): 255004.
- [9] Dai J M, Xie X, Zhang X C. Detection of broadband terahertz waves with a laser-induced plasma in gases [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(10): 103903.
- [10] Massauti M, Tzortzakis S. Controlling laser filamentation induced strong THz fields[J]. *Chinese Journal of Physics*, 2014, 52(1): 490-503.
- [11] Oh T I, Yoo Y J, You Y S, *et al.* Generation of strong terahertz fields exceeding 8 MV/cm at 1 kHz and real-time beam profiling [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(4): 041103.
- [12] Löffler T, Jacob F, Roskos H G. Generation of terahertz pulses by photoionization of electrically biased air[J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 77(3): 453-455.
- [13] Bhasin L, Tripathi V K. Terahertz generation from laser filaments in the presence of a static electric field in a plasma[J]. *Physics of Plasmas*, 2011, 18(12): 123106.
- [14] Houard A, Liu Y, Prade B, *et al.* Strong enhancement of terahertz radiation from laser filaments in air by a static electric field[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(25): 255006.
- [15] Chen Y P, Wang T J, Marceau C, *et al.* Characterization of terahertz emission from a DC-biased filament in air [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(10): 101101.
- [16] Liu Y, Houard A, Prade B, *et al.* Terahertz radiation source in air based on bifilamentation of femtosecond laser pulses [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(13): 135002.
- [17] Xie X, Xu J Z, Dai J M, *et al.* Enhancement of terahertz wave generation from laser induced plasma [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(14): 141104.
- [18] Tzortzakis S, Méchain G, Patalano G, *et al.* Coherent subterahertz radiation from femtosecond infrared filaments in air[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(21): 1944-1946.
- [19] Durand M, Liu Y, Houard A, *et al.* Fine control of terahertz radiation from filamentation by molecular lensing in air [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(10): 1710-1712.
- [20] Gao H, Chu W, Yu G L, *et al.* Femtosecond laser filament array generated with step phase plate in air [J]. *Optics Express*, 2013, 21(4): 4612-4622.
- [21] Marburger J H. Self-focusing: theory[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 1975, 4: 35-110.
- [22] Aközbek N, Scalora M, Bowden C M, *et al.* White-light continuum generation and filamentation during the propagation of ultra-short laser pulses in air[J]. *Optics Communications*, 2001, 191: 353-362.
- [23] Brodeur A, Chin S L. Ultrafast white-light continuum generation and self-focusing in transparent condensed media[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1999, 16(4): 637-650.
- [24] Kim K Y, Glowia J H, Taylor A J, *et al.* Terahertz emission from ultrafast ionizing air in symmetry-broken laser fields [J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 4577-4584.