

## 飞秒激光的等离子体吸收太赫兹特性研究

赵 骥<sup>1</sup>, 赵晓凡<sup>1\*</sup>, 张亮亮<sup>2</sup>, 张存林<sup>2</sup>

(1. 中国北方车辆研究所, 北京 100072; 2. 首都师范大学 物理系, 北京 100048)

**摘要:** 在利用飞秒激光器产生太赫兹波的过程中, 等离子体本身会对太赫兹波能量进行吸收, 其吸收特性在太赫兹波雷达探测、等离子体隐身、电磁干扰研究等方面有着广泛的应用前景。结合理论分析设计了一种等离子体吸收太赫兹波的测量系统, 提出等离子体粒子间相互碰撞吸收是导致等离子体吸收太赫兹波的主要原因, 并在实验测量研究中发现等离子体密度大小、光学透镜焦距长短以及入射飞秒激光与倍频晶体晶轴角度是影响吸收程度的主要因素, 这些研究为等离子体吸收应用提供了更加全面的理论支撑, 有助于推动太赫兹波技术在军事及民用领域的快速发展。

**关键词:** 太赫兹辐射源; 等离子体; 碰撞吸收; 太赫兹产生

**中图分类号:** TN241 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1025001

## Study on characteristic of terahertz absorption of femtosecond laser plasma

Zhao Ji<sup>1</sup>, Zhao Xiaofan<sup>1\*</sup>, Zhang Liangliang<sup>2</sup>, Zhang Cunlin<sup>2</sup>

(1. China North Vehicle Institute, Beijing 100072, China;

2. Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** In the process of generating terahertz (THz) waves using femtosecond lasers, the plasma absorbs the THz wave energy, and the absorption characteristics have a great application prospects in the THz wave radar detection, plasma stealth, electromagnetic interference research. A measurement system of THz absorption via plasma was designed combining the theoretical analysis, and it was proposed that the interaction between plasma particles was the main reason for the plasma absorption of terahertz waves. The results show that the plasma density, the focal length of the optical lens and the angle of the incident femtosecond laser and the multiplier crystal are the main factors that affect the absorption degree, which provides a more comprehensive theoretical support for the plasma absorption application, it will be helpful to promote the THz wave technology in the military and civilian areas with rapid development.

**Key words:** terahertz radiation source; plasma; collision absorption; terahertz emission

收稿日期: 2018-05-07; 修订日期: 2018-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(11374007)

作者简介: 赵骥(1989-), 男, 博士, 主要从事微波电磁波方面的研究。Email: zhaoji544@163.com

通讯简介: 赵晓凡(1963-), 女, 研究员, 主要从事电磁波方面的研究。Email: zhaoxiaofan201@126.com

## 0 引言

太赫兹波是一种介于微波和红外波之间的未被完全开发的波段。作为一个新兴前沿的交叉研究波段,太赫兹波有着自身独特的优势,例如,由于太赫兹频段特殊性,太赫兹通信在单兵和坦克间的短距离通信中有很好的抗电磁辐射干扰能力,在军事应用领域发挥着重要的作用。产生宽带可调的太赫兹波已成为 21 世纪太赫兹技术研究领域科技工作者追求的目标之一,以及太赫兹波技术进行应用所迫切需要解决的实际问题<sup>[1-3]</sup>。太赫兹波的产生方法有很多种,其中光学方法产生太赫兹波已成为越来越多研究机构探索的方向<sup>[4-5]</sup>。在光学方法产生太赫兹波的过程中,由空气激发等离子体通过四波混频产生太赫兹波具有高度非线性和相位灵敏性,在非线形电场中电子获得了非零的速度漂移,所以太赫兹波的产生过程涉及复杂的等离子体过程,而等离子体本身也会对太赫兹波进行吸收<sup>[6-8]</sup>。当太赫兹波通过等离子体时,它的电场使得等离子体内的电子状态发生改变,其一部分能量传递给电子,使电子与其他粒子碰撞得更加激烈,将能量传递出去,而自身的能量则得到衰减。等离子体对太赫兹波的吸收特性在太赫兹波雷达探测、等离子体隐身等方面有着广泛的应用前景<sup>[9-11]</sup>,研究等离子体对太赫兹波的吸收规律有助于对应用进行理论指导。

文中利用飞秒激光器设计了一套测量等离子体对太赫兹波进行吸收的系统,对等离子体吸收太赫兹波的原因进行了分析,提出等离子体粒子间相互碰撞会吸收太赫兹波进而引起太赫兹波信号降低,并针对太赫兹吸收进行了更加深入的研究,发现了等离子体密度、光学透镜焦距以及飞秒激光与倍频晶体晶轴角度是影响太赫兹波吸收程度的主要因素,通过调节以上相关因素可以控制等离子体对太赫兹波的吸收程度。

## 1 等离子体吸收太赫兹波测量系统

为了研究等离子体对太赫兹波的吸收,笔者设计了一套实验测量系统,如图 1 所示,利用钛蓝宝石飞秒激光器 Spitfire-pro (Spectra-Physics Hurricane)

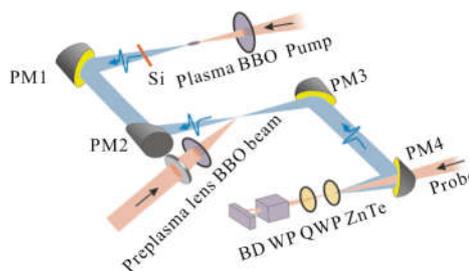


图 1 等离子体吸收太赫兹波的测量系统

Fig.1 Experimental setup of plasma absorbing terahertz wave

产生中心波长为 800 nm、重复频率为 1 000 Hz、脉宽为 50 fs 的入射激光。图 1 中,PM1、PM2、PM3、PM4 分别表示不同的抛物面镜;倍频晶体为 BBO;QWP 表示四分之一波片;WP 表示沃拉斯通棱镜;BD 表示差分探测器。系统使用一个分光镜将飞秒激光分为两束,一束通过透镜和 BBO 晶体,用于产生太赫兹波,并放置高阻硅片,用于滤除杂散双色光,透过太赫兹波;另一束光被放置在一个直线平移台(M-ILS100PP)上,通过其等离子体丝相位,使太赫兹波和等离子体在聚焦点时域同步。实验中发现,当太赫兹波相位和 Preplasma 光路产生的等离子体时域同步时,等离子体开始吸收太赫兹波。在这个过程中太赫兹波信号有一个明显的降低过程,结果如图 2 所示。

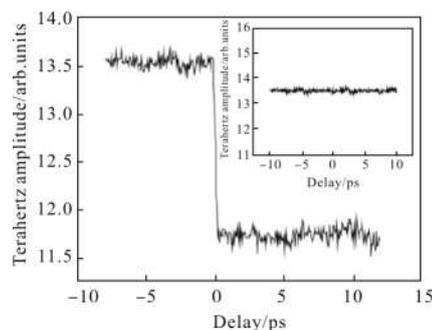


图 2 等离子体吸收太赫兹波(右上角为太赫兹波未与等离子体重合时测量得到的太赫兹波辐射强度)

Fig.2 Plasma absorbs the terahertz wave (the upper right corner is the terahertz wave radiation intensity measured when the terahertz wave does not coincide with the plasma)

为了避免 Preplasma 光路聚焦空气形成的等离子体产生的太赫兹波影响测量结果,实验中使等离子体的传播方向和太赫兹波的传播方向成一定的角度。当等离子体相位和太赫兹波时域同步时,即相位

差为 0 时,等离子体对太赫兹波进行吸收,太赫兹波辐射强度的降低幅度为 14.4%,吸收过程的时间在 1 ps 以内;当等离子体和太赫兹波的相位不重合时,太赫兹波辐射强度不变,如图 2 的右上角结果所示。

## 2 等离子体吸收太赫兹波的机理分析

在飞秒激光聚焦产生的等离子体通过太赫兹波且其相位和太赫兹波时域同步时,等离子体会形成非均匀场。电子在有质动力的作用下进行加速运动,有质动力使带电粒子由强场区向弱场区运动,将这种模型称为有质动力势模型(Ponderomotive Potential Model, PPM),其有质动力势为:

$$V_{\text{pond}}(\vec{r}, t) = m_{\text{eff}} c^2 - m_e c^2 = \left( \sqrt{1 + \frac{a(\vec{r}, t)^2}{2}} - 1 \right) m_e c^2 \quad (1)$$

式中:  $a$  为描述场强的无量纲参数。

$$a = e\sqrt{2} E_{\text{rms}} / m_e \omega c = e\sqrt{2\langle A_\mu A^\mu \rangle} / m_e \omega c \quad (2)$$

式中:  $-e$ 、 $m_e$  分别为电子的电量和质量;  $\omega$  为激光的圆频率;  $E_{\text{rms}}$  为激光场中一点的电场强度均方根;  $A_\mu$  为四维矢势;  $\langle \cdot \rangle$  表示对时间的平均。

在有质动力作用下,等离子体中的带电粒子进行无规则的运动,互相发生无规则碰撞,而这种等离子体间的粒子碰撞会吸收太赫兹波进而引起太赫兹波信号的降低。在等离子体和太赫兹波进行相互作用中,将等离子体看作一个高通滤波,当太赫兹波频率小于等离子体频率时,太赫兹波的变化速度低于等离子体的响应速度,此时电子被激励,形成了对太赫兹波的反作用力,在这种作用下,太赫兹波被反射或散射,无法通过等离子体。反之,当太赫兹波频率大于等离子体频率时,电子没有被激励,太赫兹波几乎不会被等离子体反射或散射。在等离子体吸收太赫兹波测量系统中,当泵浦光功率在 650 mW 左右时,等离子体频率为 32.5 GHz。此时,等离子体频率小于太赫兹波频率 (0.1~10 THz),等离子体中电子的变化速度不能够跟得上太赫兹波变化的速度,等离子体对太赫兹波的阻碍作用变小,太赫兹波可以通过等离子体。但在通过等离子体时,等离子体粒子间相互碰撞形成不规则的简谐运动,使得部分粒子从低能级状态跃迁到高能级状态,此时,为了向跃迁能级提供所需要的能量,等离子体对太赫兹波进行吸收,使

得太赫兹波辐射强度降低。在能级跃迁中,能级跃迁几率( $A_{i-f}$ )决定着等离子体对太赫兹波吸收的幅度大小:

$$A_{i-f} = \frac{2\pi}{2j_i + 1} \sum_{M_i} \sum_{M_f} (M_{fi})^2 \quad (3)$$

式中:  $j_i$  为激发态能量;  $M_{fi}$  为激发态( $i$ )向高能级态( $f$ )跃迁所需要的能量。等离子体碰撞是导致太赫兹波被等离子体吸收的主要因素,此时等离子体对太赫兹波的反射和散射作用十分微弱,可以忽略不计。

## 3 影响太赫兹波吸收因素的特性

### (1) 等离子体密度大小对太赫兹波吸收的影响

在等离子体碰撞中,等离子体的密度影响等离子体吸收太赫兹波的强度。利用等离子体吸收太赫兹波的测量系统,改变等离子体路的泵浦光的功率(700~2500 mW),进而改变等离子体密度,研究等离子体密度大小对等离子体吸收太赫兹波的影响。

从图 3 的结果可以看出,当 Preplasma 光路中的功率从 700 mW 增加到 1 500 mW 时,测量得到的 Preplasma 光路等离子体对太赫兹波吸收能量随着功率的增加呈线性增长,这表明在低功率(小于 1 500 mW)下,功率增加导致等离子体密度增加,进而使等离子体间的相互碰撞越发剧烈;当 Preplasma 光路中的功率大于 1 500 mW 时,测量得到的太赫兹波吸收几乎未发生改变,这可能是由于随着功率的增大,飞秒激光击穿空气形成的等离子体已经被完全电离,其等离子体密度不会再随着功率增加,此时等离子体对太赫兹波的吸收不变。

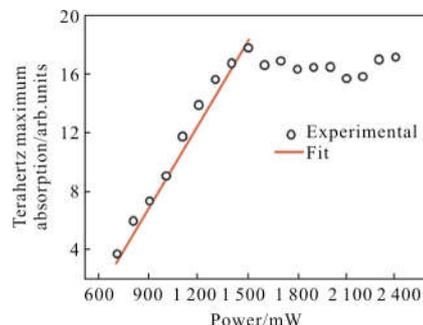


图 3 太赫兹波吸收强度随等离子体光路中功率大小变化的测量结果

Fig.3 Measurement results of the terahertz wave absorption intensity with the change of the power size in the plasma

(2) 光学透镜焦距对等离子体吸收太赫兹波的影响

由于等离子是由飞秒激光通过透镜聚焦空气产生的,那么光学透镜焦距的大小就可以改变等离子体对太赫兹波的吸收状态。当改变 Preplasma 光路中透镜的焦距时,实验发现,不同的透镜焦距产生的等离子体对太赫兹波的吸收程度不同。利用焦距不同的三个透镜( $f=50\text{ mm}$ 、 $100\text{ mm}$ 、 $150\text{ mm}$ )聚焦击穿空气形成等离子体丝,其对太赫兹波的吸收结果如图 4(b)~(d)所示。从结果可以发现,等离子体丝的聚焦状态不同,对太赫兹波的吸收结果也不同。为了进一步研究该现象,选取了更多焦距的透镜,如图 5 所示。图 5(a)为不同透镜下太赫兹波辐射强度降低幅值,图 5(b)为等离子体对太赫兹波的吸收率。当透镜焦距为  $50\text{ mm}$  时,飞秒激光聚焦产生的等离子体对太赫兹波的吸收幅度为  $11.76\%$ ; 当透镜焦距为  $100\text{ mm}$  时,吸收幅度为  $12.55\%$ ; 当透镜焦距为  $150\text{ mm}$  时,吸收幅度为  $12.67\%$ 。由此可以

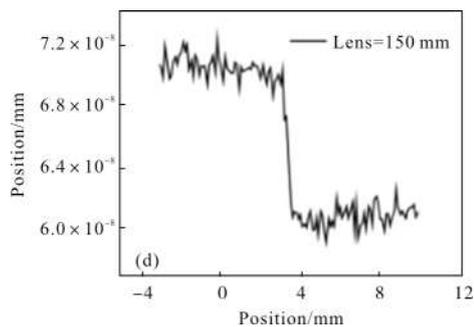
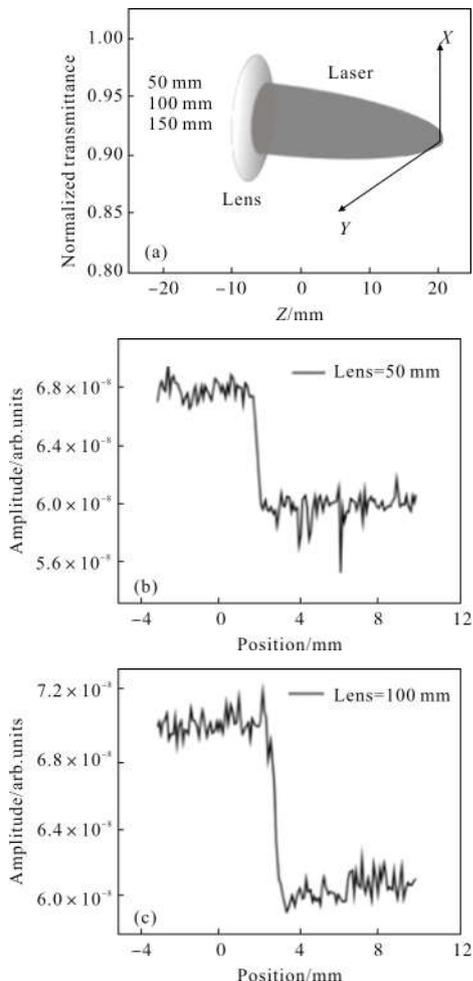


图 4 (a) 透镜焦距为  $50\text{ mm}$ 、 $100\text{ mm}$ 、 $150\text{ mm}$  时产生的等离子体对太赫兹波的吸收, (b)、(c)、(d) 透镜焦距为  $50\text{ mm}$ 、 $100\text{ mm}$ 、 $150\text{ mm}$  时的实验结果

Fig.4 (a) Absorption of terahertz waves by plasmas generated at lens focal lengths of  $50\text{ mm}$ ,  $100\text{ mm}$ ,  $150\text{ mm}$ ; (b),(c), (d) lens focal length of  $50\text{ mm}$ ,  $100\text{ mm}$ ,  $150\text{ mm}$

得出结论:随着透镜焦距的增加,等离子体对太赫兹波的吸收逐渐增强。

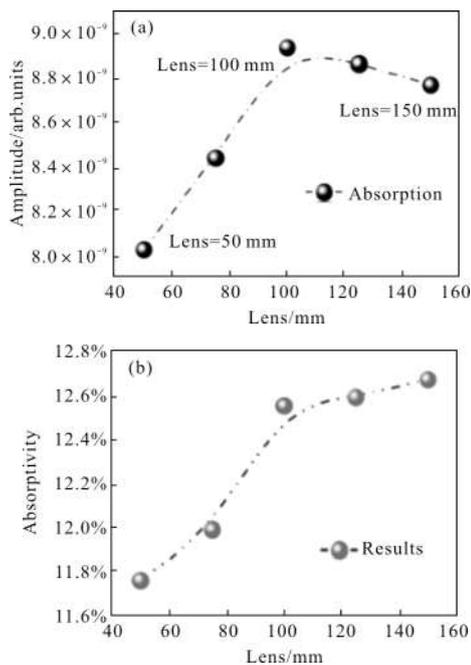


图 5 (a) 实验测量得到太赫兹波降低强度, (b) 等离子体对太赫兹波的吸收率

Fig.5 (a) Experimental measurement of terahertz wave reduction strength, (b) plasma terahertz wave absorption rate

(3) 倍频晶体晶轴方向对太赫兹波吸收的影响

在四波混频产生太赫兹波中,在双色场下产生太赫兹波,此时的太赫兹波辐射强度受到基频光 ( $800\text{ nm}$ ) 和倍频光 ( $400\text{ nm}$ ) 比例的影响:

$$E_{\text{det}}^{\text{THz}} \propto \chi^{(3)} E_{\omega}^2 E_{2\omega} \sin(\varphi) \quad (4)$$

$$\varphi = \omega / c(2n_{2\omega} - n_{\omega})d \quad (5)$$

式中： $n$  为折射率； $d$  为基频波和倍频波的距离。当转动 BBO 晶体改变晶轴角度时，基频波和倍频波比例发生变化，导致太赫兹波辐射强度发生改变。图 6(a) 为旋转 BBO 晶体，其使得 BBO 晶轴和飞秒激光的夹角从  $0^\circ$  变化到  $360^\circ$ ，经过四波混频测量得到太赫兹波辐射强度。结果表明，基频波和倍频波比例在半个周期内发生明显改变。将 BBO 晶体置于 Preplasma 光路，此时等离子体是  $400\text{ nm}+800\text{ nm}$  的混合态，当其沿 BBO 晶体中心轴旋转  $360^\circ$  以此改变  $400\text{ nm}$  和  $800\text{ nm}$  波长的比例时，得到的太赫兹波辐射吸收变化如图 6(b)、(c) 所示。结果表明，在单色光下(此时  $400\text{ nm}$  光被带通滤波片滤掉)，当倍频晶体转动角在  $60^\circ(240^\circ)$  时，倍频信号最弱，此时通过 BBO 晶体得到的  $800\text{ nm}$  波长的飞秒激光能量最强，聚焦击穿空气得到的等离子体最大，测量到的太赫兹波辐射吸收强度最明显，当 BBO 晶体转动角度在  $150^\circ(330^\circ)$  时，通过 BBO 得到的  $800\text{ nm}$  波长的飞秒激光能量最弱，聚焦击穿空气得到的等离子体最小，测量到的太赫兹波辐射吸收强度最不明显；同理，在双色光下得到的太赫兹波吸收趋势也几乎相同。

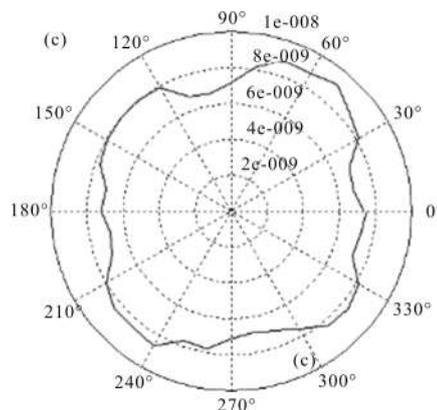
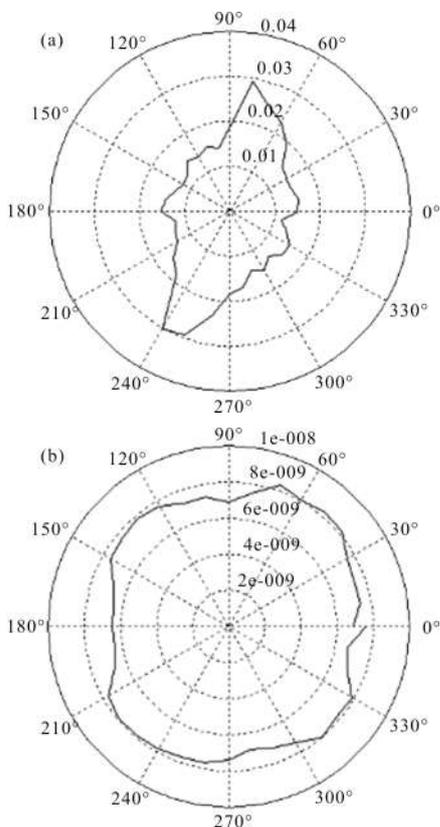


图 6 (a) 太赫兹波辐射强度随 BBO 晶体角度的变化，  
(b)  $400\text{ nm}+800\text{ nm}$  波长下等离子体对太赫兹波的吸收，  
(c) 滤掉倍频波长  $400\text{ nm}$  后，等离子体对太赫兹波的吸收

Fig.6 (a) Terahertz wave radiation intensity with the BBO crystal angle changes, (b)  $400\text{ nm}+800\text{ nm}$  wavelength plasma terahertz wave absorption, (c) take the frequency doubling wavelength of  $400\text{ nm}$ , the plasma terahertz wave absorption

### 4 结 论

文中通过设计构建等离子体吸收太赫兹波测试系统，理论分析了等离子体间相互碰撞是导致太赫兹波吸收的主要原因，并进一步分析了影响等离子体吸收太赫兹波的三个主要因素：其一，太赫兹波吸收能量随着飞秒激光功率的增加呈线性增长，但当飞秒激光功率达到一定阈值时，其等离子体密度不会再随着功率增加，此时等离子体对太赫兹波的吸收不变；其二，光学透镜焦距对等离子体吸收太赫兹波的影响，随着透镜焦距的增加，等离子体对太赫兹波的吸收逐渐增强；其三，倍频晶体晶轴方向对太赫兹波吸收也会产生影响，随着 BBO 晶体的转动，测量得到的等离子体对太赫兹波辐射的吸收发生了改变。等离子体吸收太赫兹波的研究为太赫兹波雷达探测、等离子体隐身等技术提供了技术及理论支持，有助于推动太赫兹波技术在军事及民用领域的发展。

### 参考文献：

[1] Fu Peng, Hu Song, Xiang Jun, et al. FTIR study of pyrolysis products evolving from typical agricultural residues [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2010, 88

- (2): 117–123.
- [2] Cui Shanshan, Li Qi. De-noising research on terahertz digital holography based on wavelet transform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1836–1840. (in Chinese)
- [3] Xie Qi, Yang Hongru, Li Hongguang, et al. Explosive identification based on terahertz time-domain spectral system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(10): 2392–2399. (in Chinese)
- [4] Zhang Dainan, Jin Lichuan, Wen Tianlong, et al. Manufacturing and terahertz wave modulation properties of graphene/ $Y_3Fe_5O_{12}$ /Si hybrid nanostructures [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 111: 10–16.
- [5] Ito H, Ishibashi T. Photonic terahertz-wave generation using slot-antenna-integrated uni-traveling-carrier photodiodes[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(4): 1–7.
- [6] E Yiwen, Huang Yuanyuan, Xu Xinlong, et al. Polarization sensitive terahertz measurements and applications[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 98–113. (in Chinese)
- [7] Li Yihan, Zhang Mile, Cui Hailin, et al. Terahertz absorbing properties of different metal split-ring resonators[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1225002. (in Chinese)
- [8] Wang Y, Tang L, Xu D, et al. Energy scaling and extended tunability of terahertz wave parametric oscillator with MgO-doped near-stoichiometric  $LiNbO_3$  crystal[J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 8926–8936.
- [9] Li Hui, Fan Wenhui, Liu Jia. Investigation on terahertz generation by controlling the laser spot size on photoconductive antenna [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 528–533. (in Chinese)
- [10] Guo Lihan, Wang Xinke, Zhang Yan. Terahertz digital holographic imaging of biological tissues [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(3): 611–615. (in Chinese)
- [11] Li Jing, Zhang Wen, Miao Wei, et al. Development of ultra high sensitivity superconducting THz detectors [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 122–130. (in Chinese)