

基于光子混频的可调谐连续太赫兹波辐射系统

史同璐 刘建军 洪 治

(中国计量学院太赫兹技术与应用研究所, 浙江 杭州 310018)

摘要 基于光子混频原理及相干探测技术,利用外腔半导体激光器及一种蝶形交指结构低温砷化镓光电导天线,搭建了一个可调谐连续太赫兹波辐射探测系统。在室温条件下,实现了连续太赫兹波的产生及探测,其连续太赫兹波输出的线宽优于 1 MHz。在频率小于 0.70 THz 时,实验获得的系统信噪比均在 50 dB 以上。在频率为 0.50 THz 处,系统信噪比为 64 dB。另外,还实验研究了辐射太赫兹波电场强度与光电导天线偏置电场的关系,讨论了外腔半导体激光器模式对连续太赫兹波辐射的影响。

关键词 光谱学;连续太赫兹波辐射;光子混频;光电导天线;成像

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.0411001

Tunable Continuous-Wave Terahertz Radiation System Based on Photomixing

Shi Tonglu Liu Jianjun Hong Zhi

(Centre for THz Research, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract A room-temperature-operation tunable continuous-wave terahertz (THz) radiation and detection system, which consists of two external cavity semiconductor lasers and an interdigitated finger bow-tie antenna on low temperature GaAs substrate, is established based on photomixing and coherent detection technology. The generation and detection of continuous-wave THz wave are realized, and the spectral purity of system is better than 1 MHz. The signal-to-noise ratio (SNR) of the system is better than 50 dB with frequency below 0.70 THz, and the maximum SNR of 64 dB is achieved at 0.50 THz. In addition, the relation between the electric field intensity of the radiated terahertz wave and the biased electrical field for the photoconductive antenna is experimentally given, and the impact of multi-longitudinal mode operation of the external cavity semiconductor laser on continuous-wave THz radiation is discussed.

Key words spectroscopy; continuous-wave terahertz radiation; photomixing; photoconductive antenna; imaging

OCIS codes 300.6495; 120.4820; 040.5150; 110.6795

1 引 言

太赫兹波(THz)具有许多优良特性,如良好的穿透性、较低的光子能量以及丰富的光谱信息等,已逐渐应用于安检、生物组织的检测、材料的无损探伤以及环境监控等方面^[1-3]。低成本、高效的连续可调谐太赫兹波辐射源是影响太赫兹技术发展的一个重要因素,备受国内外研究者的关注,特别是对窄带光谱研究应用而言,具有重要应用价值。

连续(CW)太赫兹波辐射源主要有返波振荡器

(BWO)、量子级联激光器(QCL)和光子混频光电导天线等。返波振荡器受电子束直径的限制,只能产生低频段的太赫兹波辐射,而且寿命较短。2002年,Kohler等^[4]首次实现太赫兹波段的量子级联激光输出,但需要在低温环境下工作。到目前为止,其可实现的最高工作温度为 186 K,且主要工作在高频段(大于 1.5 THz)^[5]。利用光子混频光电导天线作为辐射源可以在常温下实现连续可调谐太赫兹波的输出,采用相干探测技术,还可以同时获得相

收稿日期: 2013-10-25; 收到修改稿日期: 2013-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(60576042,61377108)

作者简介: 史同璐(1989—),女,硕士研究生,主要从事太赫兹波辐射源方面的研究。E-mail: stl640208@163.com

导师简介: 洪 治(1964—),男,博士,研究员,主要从事太赫兹技术方面的研究。

E-mail: hongzhi@cjl.u.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

位信息和强度信息,且频谱分辨率高。2002年, Siebert等^[6]利用光电导天线搭建了连续太赫兹波辐射探测系统,并用于生物样品透射成像实验,信噪比(SNR, R_{SN})达到了100:1。2005年, Gregory等^[7]实现了一个信噪比为60 dB、辐射频率为0.53 THz的连续太赫兹波成像系统。

然而,利用光电导天线产生连续太赫兹波辐射存在的主要问题有:辐射强度不高,能量转化效率较低,以及如何提高频谱分辨率等。提高能量转化效率的方法主要是降低混频器衬底材料的载流子寿命、优化传统交指电极的尺寸和天线结构^[8-11]。2012年, Tanoto等^[12]采用分子束外延(MBE)生长的低温砷化镓(LT-GaAs)和一种新的纳米电极结构光电导天线,使输出的太赫兹波功率提高了两个数量级,并有望将这种新的纳米电极应用于探测光电导天线。频谱分辨率取决于光子混频源的激光单模质量。早期研究中,多选掺钛蓝宝石激光器^[13]。由于外腔半导体激光器(ECDL)具有成本低、易小型化的优势,逐渐取代了掺钛蓝宝石激光器^[11]。近年来,随着分布反馈(DFB)激光器的商业化,加之其易调谐的优势,现已成为主要的光子混频源^[14]。2008年, Anselm等^[13]利用干涉仪反馈控制DFB激光器实现了频率的调谐。另外,利用光纤使装置小型化,并改进了延时线的装置,进一步提高了系统的稳定性^[15]。由于光子混频太赫兹辐射系统与光电导材料、天线结构及参数、激励源等有关,不同的方案选择会得到不同的结果,且结果各有优缺点。目前,国际上一般选用DFB激光器及对数螺旋光电导天线将基于光子混频原理的连续太赫兹波辐射探测系统产品化,可调谐频率达1.8 THz,输出线宽约为10~20 MHz,系统信噪比大于60 dB^[16-17]。但目前这些产品极其昂贵,其应用受到了很大限制。

本文基于光子混频原理以及相干探测技术,利用外腔半导体激光器及一种蝶形交指结构低温砷化镓光电导天线,搭建了一个可调谐的连续太赫兹波辐射探测系统。获得的太赫兹波输出线宽优于1 MHz,系统信噪比大于60 dB。并研究了发射光电导天线偏置电场、半导体激光模式对连续太赫兹波辐射的影响。

2 可调谐连续太赫兹波辐射探测系统

采用两个光电导天线分别作为连续太赫兹波的发射源和探测器,两个独立的外腔半导体激光器作为激励源,构建了一个连续太赫兹波辐射探测系统,

如图1所示。

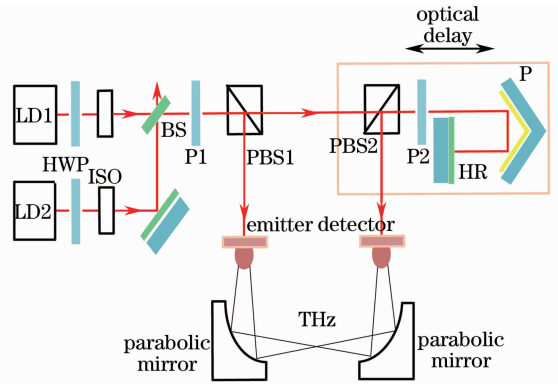


图1 连续太赫兹辐射系统示意图

Fig. 1 Schematic of CW THz radiation system

图1中,从两个独立外腔半导体激光器LD1和LD2输出的两束频差在太赫兹波频率范围内的激光分别经1/2波片(HWP)、光学隔离器(ISO)、分光棱镜(BS)合成后,由偏振片(P1)和偏振分光棱镜(PBS1)将其按一定的功率比例(一般为1:1)分成两束,其中抽运光直接辐照在发射光电导天线上,探测光经光学延时线后辐照在探测光电导天线上。光学延时线由偏振分光棱镜(PBS2)、偏振片(P2)、角锥棱镜(P)和高反射镜(HR)组成。另外,通过函数信号发生器为发射光电导天线提供频率为 f 的方波偏置电压,并作为系统的电子斩波器。探测光电导天线将连续太赫兹电场信号转化为电流信号,利用锁相放大器进行信号放大,并结合光学延时线进行太赫兹波的取样采集。太赫兹光学系统由两个抛物镜组成,聚焦后进行待测样品的高分辨光谱分析或成像应用等。

LD1和LD2都是利特罗结构的外腔半导体激光器,工作波长为780~789 nm范围内可调谐,线

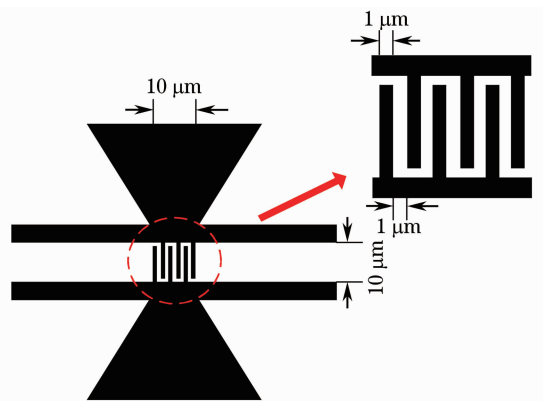


图2 光电导天线及其交指电极的结构尺寸

Fig. 2 Structure sizes of photoconductive antenna and its interdigitated electrode

宽优于 1 MHz,最大输出功率为 120 mW。激光器通过电流控制输出功率,通过利特罗结构的光栅角度选择波长,通过微调利特罗结构的外腔腔长实现单频输出。光学延时线通过步进电机控制角锥棱镜的移动来实现探测光程变化,其最大行程为 100 mm,对应的光程变化量为 4×100 mm。

发射光电导天线和探测光电导天线都是具有交指电极结构的蝶形天线,其衬底材料是低温 GaAs。

$$I(t) = E_1^2 \cos^2(\omega_1 t) + E_2^2 \cos^2(\omega_2 t + \varphi) + 2E_1 E_2 \cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t + \varphi) = \frac{E_1^2}{2} + \frac{E_2^2}{2} + \frac{E_1^2}{2} \cos(2\omega_1 t) + \frac{E_2^2}{2} \cos(2\omega_2 t + 2\varphi) + E_1 E_2 \cos[(\omega_1 + \omega_2)t + \varphi] + E_1 E_2 \cos[(\omega_2 - \omega_1)t + \varphi], \quad (1)$$

式中 E_1 、 E_2 为两束激光的电场强度幅值, φ 为两束激光的相位差, t 为时间。

对光子混频实现太赫兹辐射的过程来说,由于光电导天线的响应受衬底材料(低温 GaAs)的载流子寿命限制,无法对(1)式中的光波的和频及倍频成分作出响应,因此,光电导天线辐射出的有效瞬时光强 $I_v(t)$ 为

$$I_v(t) = \eta_1 \left(\frac{E_1^2}{2} + \frac{E_2^2}{2} \right) + \eta_2 \frac{V_b^2}{g^2} E_1 E_2 \cos(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

式中 $\omega = \omega_2 - \omega_1$ 是系统辐射的太赫兹波频率, V_b 是光电导天线上的偏置电压, g 是光电导天线的电极间距, η_1 、 η_2 分别为与光电导天线光整流产生直流和光子拍频产生太赫兹波有关的系数。

连续太赫兹波的辐射功率受到光电导天线的激励激光功率、发射光电导天线的偏置电场等因素影响。从(2)式可看出,在激励光功率受限的条件下,只有当参与光子混频的两个不同频率的激光功率相等时,辐射的太赫兹功率最大。这对探测过程也同样成立。另外,太赫兹波的辐射功率与光电导天线的偏置电压成正比。

光电导天线太赫兹探测过程是辐射过程的逆过程。探测光电导天线上得到的电流信号 I_{ph} 与入射太赫兹波的电场强度成正比,可表示为^[12]

$$I_{ph} \propto E_{THz} \cos \Delta\varphi = E_{THz} \cos(\omega \Delta L / c), \quad (3)$$

式中 $E_{THz} = \frac{V_b}{g} \sqrt{\eta_2 E_1 E_2}$ 表示太赫兹电场振幅, $\Delta\varphi$ 为探测光与太赫兹波之间的相对相位差, ΔL 是由延时线移动产生的光程变化量。因此,与其他抽运-探测过程一样,通过控制延时线对探测光相位进行扫

天线及电极尺寸如图 2 所示,电极的有效面积是 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$,电极宽度(t)和电极间距(g)都是 $1 \mu\text{m}$ 。

3 光子混频实现太赫兹辐射过程

两束角频率分别为 ω_1 、 ω_2 的单色连续激光其合光强 $I(t)$ 可以表示为^[18]

描,即可得到太赫兹波电场的时域信号,实现太赫兹波的相干探测。

4 实验结果及分析

4.1 可调谐连续太赫兹波辐射探测

对于太赫兹波辐射探测系统而言,系统的信噪比是最重要的技术指标。信噪比表示的是太赫兹波信号与噪声的相对比值,定义为

$$R_{SN} = 20 \lg(E_{THz} / E_{noi}), \quad (4)$$

式中 E_{noi} 表示噪声电场振幅。

实验中,选择 LD1 和 LD2 的输出波长分别为 783.86、783.18 nm,频差约为 0.33 THz;发射和探测光电导天线的激励功率都是 15 mW;发射光电导天线的偏置电压为方波信号, $V_b = 5$ V,频率为 20 kHz;锁相放大器积分时间常数为 30 ms,采样频率为 16 Hz,结合延时线扫描速度 0.2 mm/s,相应的太赫兹波时域信号的采样频率为 6 THz。实验获得的探测光电导天线输出的时域电流信号 I_{ph} (其中

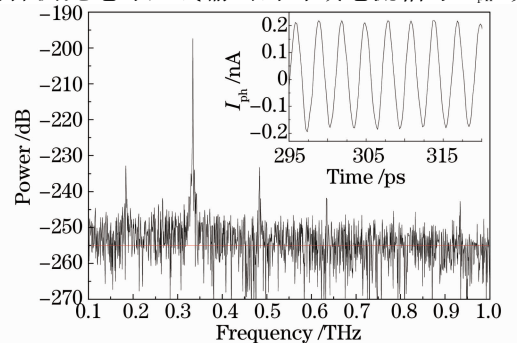


图 3 连续太赫兹波频谱图(插图为输出电流随时间变化)
Fig. 3 Spectrum of the CW THz waveform
(The inset shows output current as a function of time)

的 25 ps 片段)如图 3 中的插图所示,电流 I_{ph} 的幅值约为 0.2 nA。选取时域采样窗口为 1000 ps(对应延时线扫描行程约 75 mm),经傅里叶变换后的信号功率谱如图 3 所示,其频谱分辨率为 1 GHz。图中红线代表的是没有太赫兹波辐照时探测光电导天线采集到的平均噪声。

从图 3 中可看出,实验中探测到的太赫兹波的中心频率约为 0.332 THz,与两个半导体激光器输出频差一致,信噪比约为 57 dB。另外,在频率约为 0.032、0.182、0.482、0.632、0.782、0.932 THz 的 6 个位置,存在明显的干扰信号,但与主频信号功率相比,要小 30 dB 以上。值得注意的是,这 6 个信号频率加上主频信号,它们的频率间隔均为 150 GHz,表明在光电导天线内部存在频率约为 150 GHz 的驻波。

由于两个激光器的输出线宽均优于 1 MHz,因此,光子混频后的太赫兹输出线宽也与此相当或更小。如果选择线宽为 100 kHz 的商用外腔半导体激光器,则太赫兹波输出线宽又可提高一个数量级。由于时域信号采集窗口长度的限制,频谱图并不能反映其实际线宽。

通过固定 LD1 的输出波长,调节 LD2 的输出波长,可实现可调谐连续太赫兹波辐射。实验获得的太赫兹波不同频率处的系统信噪比及拟合曲线如图 4 所示,实验条件与图 3 相同。系统信噪比在频率小于 0.70 THz 时均在 50 dB 以上,其中,0.50 THz 处信噪比达到最大,为 64 dB。而频率在 0.9 THz 附近时急剧下降到 35~20 dB。系统的调谐范围主要受光电导天线响应频率范围的限制^[19]。蝶形天线是一种偶极子天线,利用三角金属板代替两支棒,呈蝴蝶状,尺寸如图 2 所示。一般来说,蝶形结构天线的响应频率范围较偶极或螺旋结构天线窄,根据干涉谐振原理,具有中心响应频率。交指电极的引入,可以提高太赫兹辐射功率,但也会大大降

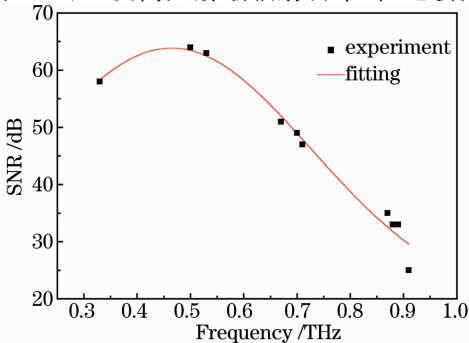


图 4 系统信噪比与频率的关系

Fig. 4 System SNR versus frequency

低光电导天线在高频段的辐射效率,这与实验结果相符^[10,19]。针对这一点,纳米结构电极提供了一种新的途径^[12]。

一般地,增大锁相放大器的积分时间常数,并降低延时线扫描速度及数据采集频率,可以进一步减小系统噪声,进而大大提高系统信噪比,但相应的系统工作速度将大大降低^[7,16-17]。另外,还可通过增大偏置电场、激励功率等,进一步提高系统信噪比。

4.2 偏置电场对太赫兹辐射的影响

发射光电导天线上的偏置电场是影响太赫兹辐射的重要因素之一^[20]。在安全工作范围内,辐射太赫兹波电场强度与偏置电压 V_b 基本成线性关系。实验中,在频率为 0.33 THz 时,不同偏置电压下获得的光电导天线输出电流信号振幅如图 5 所示,实线是线性拟合的结果。很明显,当偏置电压(电场)很小时,辐射太赫兹电场输出出现一死区。然后,随着偏置电压的增加,辐射太赫兹电场强度与偏置电压呈线性关系。目前,实验中选用的最大偏置电压为 5 V,偏置电场为 50 kV/cm,其辐射太赫兹波并未出现饱和。对普通低温 GaAs 光电导天线来说,当偏置电场超过 80 kV/cm 时,会出现饱和现象,直至光电导天线被击穿^[21]。若通过分子束外延生长(MBE)技术提高其阻抗,则可承受的偏置电场将会大大提高,相应的辐射功率也会大幅度提高^[12]。

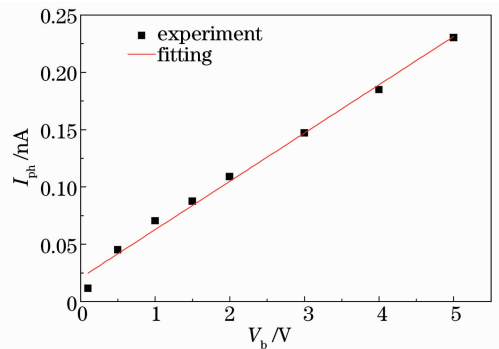


图 5 太赫兹波辐射电场强度与偏置电压的关系

Fig. 5 Radiated electrical field intensity of THz wave versus bias voltage

4.3 激光器模式对太赫兹辐射的影响

若外腔半导体激光器工作在多纵模模式(外腔纵模间隔约为 9 GHz),经光子混频后会辐射出多个频率的太赫兹波。且纵模的数量、强度及相位等均会对光子混频太赫兹辐射产生很大影响。其结果是不仅使系统的频谱宽度大大增加,而且系统的信噪比也会明显下降。图 6 为 LD1 输出单模,LD2 输出两个纵模且强度接近时的系统信噪比频谱实验结果

(红线)及与两个激光器输出都为单模时(黑线)的对比,蓝线代表的是没有太赫兹波辐照时探测光电导天线采集到的平均噪声,显然,激光器单模输出时,系统的频谱宽度较窄且信噪比也较高。由于影响因素比较复杂,不在此展开讨论。实际应用中,保证两个激光器单模输出是十分必要的。

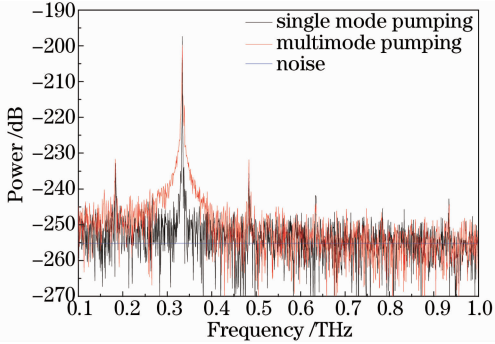


图 6 多模 LD 激励下的太赫兹输出频谱

Fig. 6 Output spectrum of THz under multimode pumping of LD

5 成像应用

基于连续太赫兹波辐射探测系统,用 X-Y 二维电动平移台放置样品,搭建了一个太赫兹波成像系统。选用放置于一张普通 A4 纸后面的普通双面刀片作为演示样品,样品尺寸为 22 mm×22 mm。采用连续扫描的方法进行成像,像素间距为 0.3 mm。在工作频率为 0.33 THz 时,初步的成像结果如图 7 所示,像素尺寸为 75 pixel×75 pixel。从图中看出目前的成像效果还不够理想,主要原因有平移台精度及重复性不够好。另外,成像实验时为了简化系统选用了塑料透镜代替金属抛物镜也影响了图像质量。如何提高太赫兹波成像系统的空间分辨率,也是下一步要开展的工作。



图 7 刀片的连续太赫兹成像

Fig. 7 CW THz imaging of a razor blade

6 结论

基于光子混频原理及抽运-探测技术,利用外腔

半导体激光器及一种蝶形交指结构低温砷化镓光电导天线,实现了一个可调谐连续太赫兹波辐射探测系统,其连续太赫兹波输出的线宽优于 1 MHz。在频率为 0.50 THz 处,实验获得的系统信噪比为 64 dB。在频率小于 0.70 THz 时,系统信噪比均在 50 dB 以上。另外,还实验验证了太赫兹波辐射电场强度与光电导天线偏置电场成线性关系,以及外腔半导体激光器的单模输出可以有效提高系统信噪比及频谱纯度。

参 考 文 献

- Xu Jingzhou, Zhang Xicheng. Terahertz Science and Technology and Application[M]. Beijing: Peking University Press, 2007.
- 许景周, 张希成. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007.
- Barbieri S, Alton J, Baker C, *et al.*. Imaging with THz quantum cascade lasers using a Schottky diode mixer[J]. Opt Express, 2005, 13(7): 6497–6503.
- Ding Shenghui, Li Qi, Li Yunda, *et al.*. Experimental research on resolution measurement of a continuous-wave terahertz reflection-mode scanning system[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(10): 1011001.
- 丁胜晖, 李琦, 李云达, 等. 连续太赫兹反射扫描成像分辨率测量实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(10): 1011001.
- Kohler R, Tredicucci A, Beltram F, *et al.*. Terahertz semiconductor-heterostructure laser [J]. Nature, 2002, 417(6885): 156–159.
- Kumar S, Hu Q, John L R. 186 K operation of terahertz quantum-cascade lasers based on a diagonal design[J]. Appl Phys Lett, 2009, 94(13): 131105.
- Siebert K J, Löffler T, Quast H, *et al.*. All-optoelectronic continuous wave THz imaging for biomedical applications[J]. Physics in Medicine and Biology, 2002, 47(2): 3743–3748.
- Gregory I S, Tribe W R, Baker C, *et al.*. Continuous-wave terahertz system with a 60 dB dynamic range[J]. Appl Phys Lett, 2005, 86(20): 204104.
- Brown E R, Smith F W, McIntosh K A. Coherent millimeter-wave generation by heterodyne conversion in low-temperature-grown GaAs photoconductors[J]. J Appl Phys, 1993, 73(3): 1480–1484.
- Brown E R, McIntosh K A, Nichols K B, *et al.*. Photomixing up to 3.8-THz in low-temperature-grown GaAs [J]. Appl Phys Lett, 1995, 66(3): 285–287.
- Gregory I S, Baker C, Tribe W R, *et al.*. Optimization of photomixers and antennas for continuous-wave terahertz emission [J]. IEEE J Quantum Electron, 2005, 41(5): 717–728.
- Rajind Mendis, Cezary Sydló, Jochen Sigmund, *et al.*. Tunable cw-THz system with a log-periodic photoconductive emitter[J]. Solid-State Electronics, 2004, 48(10): 2041–2045.
- Tanoto H, Teng J H, Wu Q Y, *et al.*. Greatly enhanced continuous-wave terahertz emission by nano-electrodes in a photoconductive photomixer[J]. Nature Photonics, 2012, 6(2): 121–126.
- Anselm J D, Thorsten G, Daniel S, *et al.*. Precisely tunable continuous-wave terahertz source with interferometric frequency control[J]. Rev Sci Instrum, 2008, 79(4): 044702.
- Roggenbuck A, Schmitz H, Deninger A, *et al.*. Coherent broadband continuous-wave terahertz spectroscopy on solid-state samples[J]. New J Phys, 2010, 12(4): 043017.
- Axel R, Komalavalli T, Holger S. Using a fiber stretcher as a fast phase modulator in a continuous wave terahertz spectrometer

- [J]. J Opt Soc Am B, 2012, 29(4): 614–620.
- 16 CW THz packages: laser and photomixers for frequency-domain THz spectroscopy [EB/OL]. [2014-01-15]. http://www.toptica.com/products/terahertz_generation/lasers_and_photomixers_for_cw_terahertz_generation.html.
- 17 PB7200 portable frequency domain terahertz (THz) spectrometer [EB/OL]. [2014-01-15]. <http://www.emcore.com/terahertz-thz-frequency-domain-spectrometer/>.
- 18 M Tani, O Morikawa, S Matsuura, *et al.*. Generation of terahertz radiation by photomixing with dual-and multiple-mode lasers[J]. Semicond Sci Tech, 2005, 20(7): S151–S163.
- 19 Xu Ying, Chen Haibin, Hong Zhi. Modeling of the radiation impedance characteristics for photoconductive antenna[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(2): 233–237.
- 徐英, 陈海滨, 洪治. 光电导天线辐射阻抗特性模拟分析[J]. 光子学报, 2010, 39(2): 233–237.
- 20 Sun Jinhai, Zhao Guozhong, Zhang Liangliang, *et al.*. Effect of applied electrical and magnetic field on THz radiation[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(2): 192–195.
- 孙金海, 赵国忠, 张亮亮, 等. 外加电场和磁场对太赫兹辐射产生的影响[J]. 中国激光, 2005, 32(2): 192–195.
- 21 Vieweg N, Mikulics M, Scheller M, *et al.*. Impact of the contact metallization on the performance of photoconductive THz antennas[J]. Opt Express, 2008, 16(24): 19695–19705.

栏目编辑:史敏