

文章编号: 0258-7025(2009)04-0978-05

低温生长砷化镓光电导天线产生太赫兹波

李铁元¹ 娄采云¹ 王 黎¹ 黄 缙¹ 赵国忠² 石小溪²

(¹ 清华大学电子工程系, 信息科学与技术国家实验室, 集成光电子学国家重点联合实验室, 北京 100084)
² 首都师范大学物理系, 北京 100037

摘要 宽频太赫兹(THz)技术在国防、科研等领域有着广阔的应用前景,光电导天线是产生宽频 THz 波的重要手段。分析了低温生长和高温退火对光电导天线材料载流子寿命和电阻率的影响。在生长温度为 230 °C 和 250 °C, 退火温度为 475 °C 的低温生长砷化镓(LTG-GaAs)上制备了领结(BowTie)和偶极子(Dipole)两种电极结构的小孔径光电导天线。实验给出,在 250 °C 生长的 LTG-GaAs 上制备的光电导天线产生的太赫兹波辐射强度和频谱宽度较好,谱宽达到了 3.6 THz, BowTie 天线的辐射强度优于 Dipole 天线。两种形状的光电导天线皆可在 10 V 的偏置电压下产生太赫兹波辐射。

关键词 光谱学;太赫兹波;时域光谱测量;低温生长砷化镓;光电导天线

中图分类号 O431.1;O433.2 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093604.0978

Terahertz Wave Generation with Low-Temperature-Grown GaAs Photoconductive Antennas

Li Tieyuan¹ Lou Caiyun¹ Wang Li¹ Huang Jin¹ Zhao Guozhong² Shi Xiaoxi²

¹ Department of Electronic Engineering, National Laboratory for Information Science and Technology, State Key Joint Laboratory on Integrated Optoelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China
² Physics Department, Capital Normal University, Beijing 100037, China

Abstract Broadband terahertz (THz) technology has widespread applications in the fields of national defense, scientific research and so on, and photoconductive antenna is an essential approach to generate THz wave. The impact of growing and annealing temperatures on material carrier lifetime and resistivity was analyzed. Four small-aperture photoconductive antennas of BowTie and Dipole structures were fabricated on low-temperature-grown GaAs (LTG-GaAs) grown at 230 °C and 250 °C respectively, and annealed at 475 °C. As a result, the 250 °C grown antennas have higher THz wave output power and broader spectrum up to 3.6 THz, in contrast to the 230 °C grown one. In addition, the output power generated by BowTie antenna is stronger than Dipole antenna. Moreover, it is verified that both of the small-aperture photoconductive antennas can generate THz wave under 10 V bias voltage.

Key words spectroscopy; terahertz wave; time domain spectroscopy measurement; low-temperature-grown GaAs; photoconductive antenna

1 引言

太赫兹(THz)波在电磁波谱上位于微波和红外光波波段之间,频率约在 0.1~10 THz 之间。太赫兹频段在国防、医疗卫生、科学研究等领域有着十分广阔的应用前景^[1]。光电导天线作为产生太赫兹波

辐射的光学方法之一,能够产生宽频、较高功率的太赫兹波辐射而一直备受推崇。美国 PicoMetrix 公司演示的太赫兹波安全检查装置就是采用光电导天线太赫兹源。光电导天线的材料和天线电极结构将影响产生的太赫兹波特性,性能良好的光电导天线

收稿日期:2008-06-23;收到修改稿日期:2008-08-02

基金项目:国家自然科学基金(60736036)和清华信息科学与技术国家实验室基础研究基金资助项目。

作者简介:李铁元(1981—),男,硕士研究生,主要从事光电导天线产生太赫兹波辐射方面的研究。

E-mail: tieyuan.li@gmail.com

导师简介:娄采云(1946—),女,教授,博士生导师,主要从事高速光电子学、高速光通信和光信号处理,以及太赫兹产生和探测方面的研究。E-mail: loucy@ee.tsinghua.edu.cn

需采用载流子寿命短、迁移率大、击穿电场(电阻率)高的半绝缘半导体材料。GaAs 在低温生长条件下会在晶体内部形成缺陷,使之具有亚皮秒量级的载流子寿命,且在高温退火后具有较高的击穿场强,因而是制作光电导天线的良好材料^[2]。

为了满足太赫兹波在安全检测等领域的应用要求,必须提高太赫兹波的功率。传统方法是采用大孔径天线^[3~5]。大尺寸电极间距的光电导天线可以产生很高功率的太赫兹波辐射,但需要在天线两电极间施加近千伏的电压。这将导致天线发热,影响天线的效率和寿命。近年来开始了小间距、大面积的光电导天线(天线阵列)的研究,但其天线设计和制作技术难度均较大^[6~8]。采用小尺寸电极间距的天线,不需要施加很高的电压即可产生太赫兹波辐射,用脉宽十几飞秒的激光激发时获得的太赫兹波频谱宽度可以达到几十太赫兹^[9]。宽带的光电导天线也可以用作太赫兹波的探测,相比采用晶体的光整流方法有着宽频、不需要相位匹配等优点^[8]。我们采用低温生长砷化镓(LTG-GaAs)作为光电导天线材料,在230 ℃和250 ℃低温下分别生长了 LTG-GaAs,然后在475 ℃进行材料高温退火。设计了领结(BowTie)和偶极子(Dipole)两种结构的光电导天线,摸索了小孔径天线的制作工艺。研究了小孔径光电导天线产生太赫兹的条件和性能,以及生长温度、天线电极结构对所产生太赫兹波性能的影响。利用250 ℃生长的 LTG-GaAs 制作的 Dipole 天线获得了谱宽为3.6 THz的太赫兹波。

2 材料特性影响

GaAs 的禁带宽度为 1.43 eV。波长800 nm左右的激光入射到 LTG-GaAs 表面时,吸收入射光能量使其价带电子跃迁到导带,同时在价带形成一个空穴。产生的电子-空穴对(载流子)在外加电场作用下做加速运动,同时空穴与电子因不断复合而消亡。载流子的产生、加速运动和消亡会在 LTG-GaAs 内形成时间为亚皮秒量级的瞬态光电流,向外辐射出电磁波,其频率刚好处于太赫兹波段,即太赫兹波。

光电导天线产生的太赫兹辐射在远场条件下的电场分量与天线中表面光激发产生的瞬态电流密度的时间偏导数成正比,并与载流子的寿命、抽运激光的特性、光电导天线的形态等诸多因素有着紧密的内在联系,而载流子的寿命是一个重要的影响因素。载流子寿命越短则载流子运动辐射能量的过程也越

短,因而产生的太赫兹波辐射脉宽越窄、频谱越宽^[9]。

在低温生长过程中过剩的砷原子将在晶体中形成点缺陷,这些缺陷在半导体的导带和价带之间构成了中空能带,从而导致电子从价带到中空能带的快速捕获,这便使低温生长的 GaAs 载流子寿命随着生长温度的降低而缩短,可以低于100 fs。但过低的生长温度会产生多晶,从而恶化材料的性能^[2,10]。密歇根大学超快科学实验室研究了不同的低温生长温度下 LTG-GaAs 的载流子寿命,他们的实验给出200~260 ℃是材料载流子寿命变化的分水岭,在该温度范围内,载流子寿命由几百飞秒突变到几十皮秒^[11]。因此,LTG-GaAs 在 200~260 ℃间存在最佳的低温生长温度范围。

在 LTG-GaAs 中,电子从价带到中空能带的快速捕获使材料的电阻率降低几个数量级,降低了光电导天线的耐压能力;在中空能带的电荷积聚将导致缺陷态饱和,降低了材料的电阻率。电阻率的降低使得光电导天线所能承受的电压随之降低。光电导天线产生太赫兹波辐射的主要能量来源于天线两端施加的电压,电压越高,辐射出的太赫兹波也就越强,因此需要设法提高材料的电阻率。

通常采用高温退火的方法使 LTG-GaAs 中的砷缺陷转变为沉积。由于沉积是主要的载流子陷阱,相当于形成了一个肖特基势垒,这便大大提高了材料电阻率。沉积所处能级的态密度较大,克服了缺陷态饱和效应,也提高了材料的电阻率。高温退火可以将 LTG-GaAs 的电阻率提高 5 个数量级以上,但载流子的寿命会有所回升。因此为达到最好的效果,生长的温度和退火的温度需要折中考虑,使得电阻率显著增加的同时载流子寿命只有少许提升^[2]。

基于以上分析,选取了 230 ℃和 250 ℃作为 LTG-GaAs 的生长温度,475 ℃作为 LTG-GaAs 的退火温度。

3 太赫兹波产生实验

3.1 光电导天线的设计和制备

实验中在 650 μm 厚的 GaAs 衬底上制备了以 1 μm/h 速度生长的 LTG-GaAs,厚度为 1 μm。生长温度分别为 230 ℃和 250 ℃,生长后在 475 ℃下进行高温快速热退火 1 min。

在 LTG-GaAs 表面用电子束蒸镀一层厚约 300 nm 的钛、金材料的天线电极,形状为 Dipole 结构和 BowTie 结构。两个 Dipole 天线的电极间距

(gap)为 $40\ \mu\text{m}$,生长温度分别为 $230\ ^\circ\text{C}$ 和 $250\ ^\circ\text{C}$ 。与传统的 Dipole 天线形态有所区别,两个相对电极末端为倒立的等腰直角三角形,且不是正相对,有 $10\ \mu\text{m}$ 的偏移,目的是增强尖端附近的电场强度,提高太赫兹波辐射的产生效率^[12]。两个 BowTie 天线均为 $250\ ^\circ\text{C}$ 生长,电极间距分别为 $8\ \mu\text{m}$ 和 $40\ \mu\text{m}$ 。Dipole 天线和 BowTie 天线的电极结构如图 1 所示。

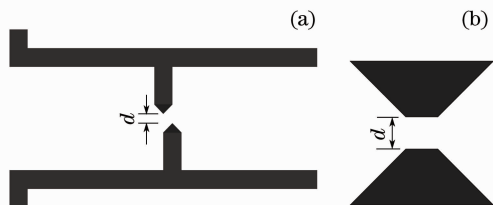


图 1 Dipole(a)和 BowTie(b)天线的电极结构
Fig. 1 Antenna structures. (a) Dipole antenna;
(b) BowTie antenna

3.2 太赫兹波的产生

抽运光由一台掺钛蓝宝石锁模激光器产生,其中心波长为 $800\ \text{nm}$,重复频率为 $82\ \text{MHz}$,脉宽为 $100\ \text{fs}$,经分束后入射到天线上的功率约为 $600\ \text{mW}$ 。天线电极两端施加的偏置电压可在 $10\sim 200\ \text{V}$ 之间变化。产生的太赫兹波辐射经过电光检测系统,获得太赫兹波的时域波形,经傅里叶变换可得到其频谱。

两个 Dipole 天线的 LTG-GaAs 的生长温度分别为 $230\ ^\circ\text{C}$ 和 $250\ ^\circ\text{C}$,它们在 $50\ \text{V}$ 偏置下产生的太赫兹波时域波形和频谱如图 2 所示。从图 2(a)可以看出, $250\ ^\circ\text{C}$ 生长的 Dipole 天线辐射的太赫兹波较强。图 2(b)给出的太赫兹波频域谱中, $230\ ^\circ\text{C}$ 的天线辐射的太赫兹波在 $2.8\ \text{THz}$ 处有一个很深的凹陷。 $250\ ^\circ\text{C}$ 的天线的波谱宽度达到了 $3.6\ \text{THz}$,且在低频区域较 $230\ ^\circ\text{C}$ 的天线的平坦度好。 $250\ ^\circ\text{C}$ 生长温度产生太赫兹波的效果比 $230\ ^\circ\text{C}$ 的好,两种天线在 $10\ \text{V}$ 偏置电压下均可产生太赫兹波,说明选择的 LTG-GaAs 生长和退火条件是合适的。

3.3 不同天线结构产生的太赫兹波

用两个 BowTie 天线和 Dipole 天线(材料均为 $250\ ^\circ\text{C}$ 生长)在 $50\ \text{V}$ 偏置下进行太赫兹波产生实验,得到的时域波形和频谱如图 3 所示。由图 3(a)可以看出,其中两个 BowTie 天线之间的差别仅为电极间距不同,分别为 $8\ \mu\text{m}$ 和 $40\ \mu\text{m}$ 。对比两个天线产生的太赫兹波时域波形和频谱图,电极间距为 $8\ \mu\text{m}$ 的天线的频谱宽些,超过了 $3\ \text{THz}$,而电极间距 $40\ \mu\text{m}$ 天线的频谱也达到了 $2.8\ \text{THz}$ 。小电极间距产

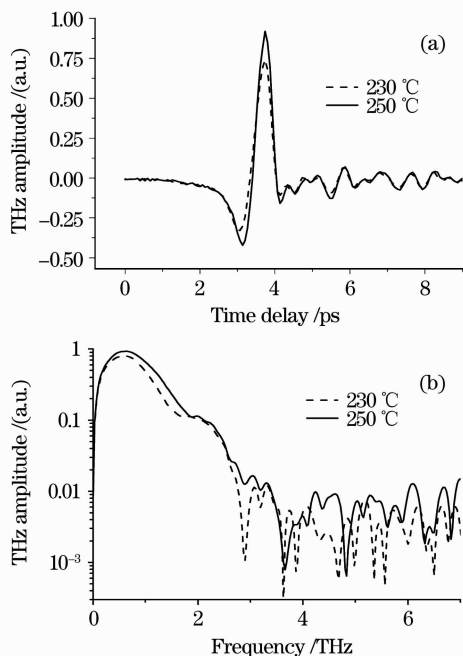


图 2 不同温度生长的 Dipole 天线辐射的太赫兹波形(a)和频域归一化波形(b)

Fig. 2 THz waveform (a) and normalized amplitude in frequency domain (b) generated by Dipole antennas with different growing temperatures

生的太赫兹波频谱稍微宽些,两者之间差距不大的原因归结为抽运脉宽较大,为 $100\ \text{fs}$ 。小孔径天线电极间距越小,制作难度越大。百飞秒脉宽的抽运,可以选择大约 $40\ \mu\text{m}$ 的电极间距来降低天线制作的难度。

由图 3(b)可看出,对比同为 $250\ ^\circ\text{C}$ 生长的 BowTie 和 Dipole 天线的太赫兹波时域波形和频谱,它们的电极间距均为 $40\ \mu\text{m}$,BowTie 天线辐射的太赫兹波峰值较大,Dipole 天线的频谱稍宽,超过了 $3\ \text{THz}$ 。由于 BowTie 天线结构简单,在制版、光刻等工艺步骤难度较小,建议多采用 BowTie 结构的光电导天线。

3.4 偏置电压的影响

改变天线电极的偏置电压,在多个电压下重复上述产生太赫兹波实验,间距为 $40\ \mu\text{m}$ 的 BowTie 天线在 $10\ \text{V}$, $50\ \text{V}$ 和 $200\ \text{V}$ 三个电压下产生太赫兹波的时域波形如图 4(a)所示。图 4(b)给出了该天线在不同偏置电压所产生太赫兹波峰值。可以看出,偏置电压影响产生太赫兹波的幅度,这是由于太赫兹波能量来源于偏置电压所提供的电场,太赫兹波的幅度会随着偏置电压的提高而增加,两者接近线性关系。图 5 给出四种光电导天线产生的太赫兹波峰值随偏置电压的变化关系。可以看出,BowTie 形天线产生的太赫兹辐射较 Dipole 要大;在 $10\ \text{V}$ 的

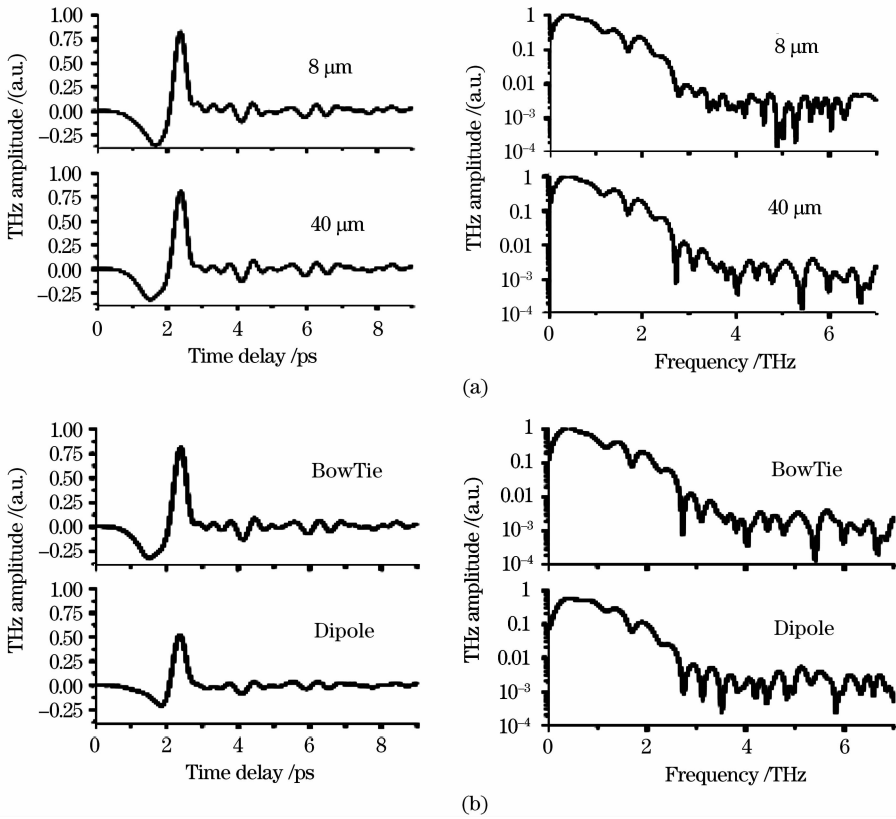


图 3 不同天线结构产生太赫兹波的时域波形和频谱。(a) 间距 $8\ \mu\text{m}$ 和 $40\ \mu\text{m}$ 的 BowTie 天线；

(b) 间距 $40\ \mu\text{m}$ 的 BowTie 和 Dipole 天线

Fig. 3 THz waveforms and spectrums generated by different antenna structures. (a) BowTie antenna with $8\ \mu\text{m}$ and $40\ \mu\text{m}$ gaps; (b) BowTie and Dipole antennas with $40\ \mu\text{m}$ gap

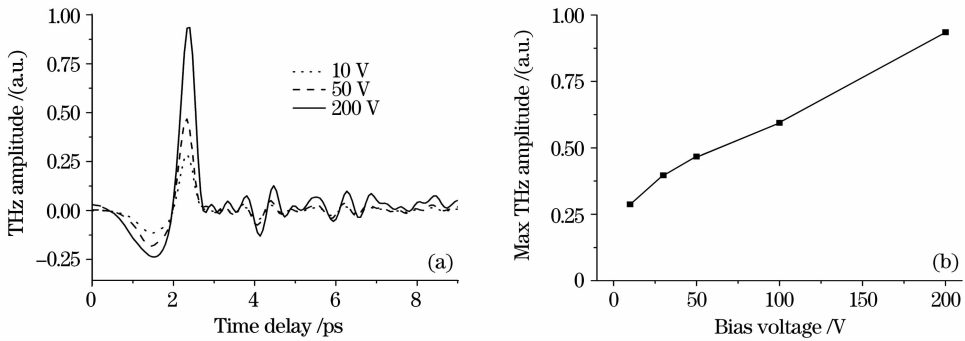


图 4 间距为 $40\ \mu\text{m}$ 的 BowTie 天线产生的太赫兹波随偏置电压的变化

(a) 三种电压下的太赫兹波波形；(b) 太赫兹波峰值随偏置电压的变化曲线

Fig. 4 THz wave generated by BowTie antenna with $40\ \mu\text{m}$ gap under different bias voltages

(a) THz waveform under three voltages; (b) max THz amplitude under different bias voltages

低电压下,小尺寸电极间距的光电导天线即可以产生太赫兹波辐射。

4 结 论

分析了低温生长和高温退火的温度对 LTG-GaAs 载流子寿命、电阻率的影响。在 $230\ ^\circ\text{C}$ 和 $250\ ^\circ\text{C}$ 两个温度生长, $475\ ^\circ\text{C}$ 退火的 LTG-GaAs 上

制作了 BowTie 和 Dipole 两种电极结构的光电导天线。实验说明, $250\ ^\circ\text{C}$ 比 $230\ ^\circ\text{C}$ 更适宜作为产生太赫兹波的 LTG-GaAs 的生长温度, LTG-GaAs 存在一个最佳的低温生长温度范围, 在保证载流子寿命足够低的前提下避免由低温生长导致晶体缺陷所带来的不利因素。LTG-GaAs 的最佳低温生长温度范围需要在 $230\ ^\circ\text{C}$ 和 $260\ ^\circ\text{C}$ 之间进一步探索。相比

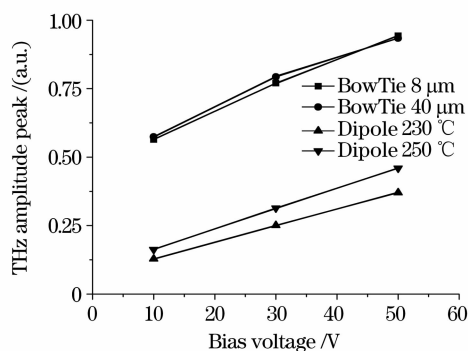


图 5 BowTie 和 Dipole 形光电导天线产生的太赫兹峰值的对比

Fig. 5 THz amplitude peak comparison generated by BowTie and Dipole antennas

BowTie and Dipole antennas

于 Dipole 天线, BowTie 天线不仅结构简单而且可以产生峰值更高的太赫兹波辐射。40 μm 电极间距的 BowTie 天线产生的太赫兹波频谱仅比 8 μm 天线的频谱略窄, 且制作工艺难度较低。此外, 小尺寸电极间距的光电导天线在 10 V 这样非常低的偏置电压下即可以产生太赫兹波。

参 考 文 献

- 1 Dwligh L. Woolard, Elliott R. Brown, Michael Pepper *et al.*. Terahertz frequency sensing and imaging: A time of reckoning future applications? [J]. *Proc. IEEE*, 2005, **93**(10):1722~1743
- 2 I. S. Gregory, C. Baker. High resistivity annealed low-temperature GaAs with 100 fs lifetimes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(20):4119~4121
- 3 Shi Xiaoxi, Zhao Guozhong, Zhang Cunlin *et al.*. Terahertz radiation properties of low-temperature-grown GaAs

- photoconductive antenna [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3):396~400
- 石小溪, 赵国忠, 张存林 等. 低温生长砷化镓光电导天线产生太赫兹波的辐射特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3):396~400
- 4 Jia Wanli, Shi Wei, Ji Weili *et al.*. Study of the dipole characteristic of terahertz wave emitted from photoconductor switches [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(7):3845~3850
- 贾婉丽, 施 卫, 纪卫莉 等. 光电导开关产生太赫兹电磁波双极特性分析[J]. *物理学报*, 2007, **56**(7):3845~3850
- 5 Zhang Xianbin, Shi Wei. THz electromagnetic radiation based on the stimulated Raman scattering of polariton [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5):1012~1016
- 张显斌, 施 卫. 基于耦合场量子受激拉曼散射的太赫兹波辐射[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5):1012~1016
- 6 J. Zhang, Y. Hong, S. L. Braunstein *et al.*. Terahertz pulse generation and detection with LT-GaAs photoconductive antenna [J]. *IEEE Proc-Optoelectron*, 2004, **151**(2):98~102
- 7 G. Zhao, R. N. Schouten, N. van der Valk *et al.*. Design and performance of a THz emission and detection setup based on a semi-insulating GaAs emitter [J]. *Reviews of Scientific Instruments*, 2002, **73**(4):1715~1719
- 8 Zheng Fanghua, Liu Huan, Li Xifu *et al.*. Simultaneous dual-wavelength quasi-continuous-wave laser-diode-end-pumped Nd:YAG laser for terahertz wave source [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2):200~205
- 郑芳华, 刘 欢, 李喜福 等. 产生太赫兹辐射源的 Nd:YAG 双波长准连续激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2):200~205
- 9 Jie Shan, Tony F. Heinz. Terahertz radiation from semiconductors [J]. *Topics Appl. Phys.*, 2004, **92**:1~59
- 10 G. Mouret, W. Chen, D. Boucher *et al.*. High-power terahertz radiation from a high-repetition-rate large-aperture photoconducting antenna [J]. *Microwave and Optical Technol. Lett.*, 1998, **17**(1):23~27
- 11 S. Gupta, M. Y. Frankel, J. A. Valdmanis *et al.*. Subpicosecond carrier lifetime in GaAs grown by molecular beam epitaxy at low temperatures [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**(25):3276~3278
- 12 Y. Cai, I. Brener, J. Lopata *et al.*. Design and performance of singular electric field terahertz photoconducting antennas [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(15):2076~2078