

砷化镓光导开关的比较研究

谢媛¹ 王娅娜¹ 刘维¹ 卢承振¹ 蓝天² 马国永² 关天帅¹ 黄鑫¹

(¹首都师范大学物理系, 北京 100048; ²北京理工大学光电工程系, 北京 100081)

摘要 砷化镓光导开关具有响应速度快、转换率较高等特点,为它应用于研究高速器件的性能等方面提供了可能。通过阐述该领域理论和实验的主要研究结果,分析比较国内外的研究现状,为以后的研究工作打下基础。

关键词 半导体; 光导开关; 砷化镓; 时间分辨力

中图分类号 TN36

OCIS 320.7080 160.5140

文献标识码 A

Comparative Study on GaAs Photoconductive Semiconductor Switches

Xie Yuan¹ Wang Ya'na¹ Liu Wei¹ Lu Chengzhen¹ Lan Tian²

Ma Guoyong² Guan Tianshuai¹ Huang Xin¹

(¹Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China

²Department of Opto-Electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract The GaAs photoconductive semiconductor switch (GaAs PCSS) plays an important role in measurement of the ultra high-speed signal, which has unique properties compared with traditional switches, such as high response speed and large transmission efficiency. These functions provide the possibilities for studying the performances of electronic and molecule devices with ultra speed. The major findings of theoretical and experimental study at present are described, analysed and compared to provide fundamental base for the future research.

Key words semiconductor; photoconductive semiconductor switch; GaAs; time resolution

1 引言

随着超短激光脉冲技术的发展,超快光导开关(PCSS)的应用日益广泛。20 世纪的 70 年代,美国马里兰州的 S. Jayaraman 等^[1]观察到当用超短激光脉冲触发光电导体时,光电导体具有皮秒量级的时间响应特性,这开创了光导开关技术发展的新时代。近年国外在光导开关方面的研究集中在作为太赫兹发射源的性质和应用研究以及利用砷化镓光导开关结合扫描隧道显微镜对物质表面进行高时空分辨力的探测方面^[2,3],而国内的研究更侧重于前者^[4~6]。相对于传统开关,光导开关具有结构简单、响应速度快(纳秒甚至皮秒量级)、无触发动抖、动态范围大、寄生电感电容低、光电隔离好、结构紧凑等优点^[7],在超高速电子学和瞬态电磁波技术领域有着良好的应用前景。本文对国内外在砷化镓光导开关作为发射元件和检测元件方面的研究现状进行了比较分析,阐述该领域理论和实验的主要研究结果。

2 砷化镓光导开关

2.1 砷化镓光导开关的结构

砷化镓光导开关的结构如图 1 所示。在半导体两端制作欧姆电极,用宽带传输线与同轴电缆接头形成开关的输入和输出端,再用绝缘介质保护封装起来。开关用脉冲激光照射芯片两电极之间的区域来控制光

收稿日期: 2009-04-17; 收到修改稿日期: 2010-02-06

基金项目: 国家自然科学基金(60772064)和北京市教委科技项目(KM200810028007)资助课题。

作者简介: 谢媛(1987—),女,本科生,主要从事光学理论与器件方面的研究。E-mail: xieyuan131@126.com

导师简介: 刘维(1965—),女,博士,副教授,主要从事应用光学方面的研究。E-mail: lwei263@263.net

导开关的通断。

光导开关的工作原理如图 2 所示。光导材料的一端通过传输线与直流高压电源或脉冲电源相连接,而另外一端的宽带传输线与负载相接。开关工作于直流或脉冲电压下,在暗态情况下,开关处于断开状态;当用一定波长的光照射两电极之间的区域时,开关导通。当光消失时,开关恢复高阻态,从而断开。如果用脉冲激光器触发光导开关,则随着光脉冲作用在开关上,开关相应地输出一个电脉冲。

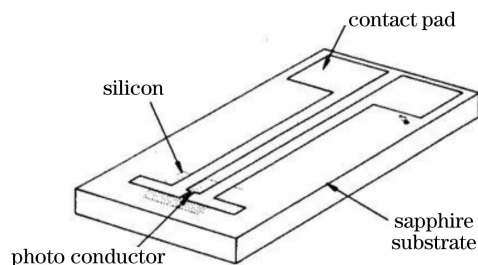


图 1 光导开关结构图

Fig. 1 Scheme of photoconductive switch

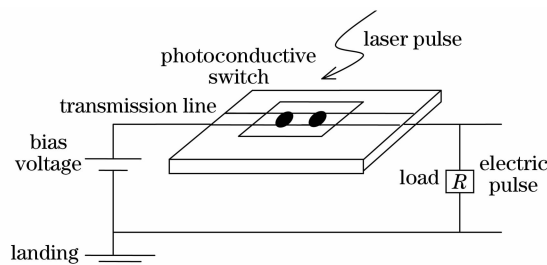


图 2 光导开关工作原理图

Fig. 2 Working principle of photoconductive switch

2.2 砷化镓光导开关作为发射源的机理和工作方式

光导开关作为发射源,主要是利用光电导的方法向外辐射太赫兹波。其基本原理^[8]是利用高能飞秒激光脉冲照射半导体材料,当光子能量高于材料的禁带宽度时,可在半导体材料表面激发出瞬态载流子(电子-空穴对)。若此时半导体表面存在电场 E_b ,则被激发的自由载流子将被电场加速,产生瞬变电流 J ,这种随时间变化的瞬变电流就会向外辐射出太赫兹波,当辐射的太赫兹波达到最大值时,其电磁场表达式为^[9]

$$E_m = -E_b \frac{\sigma_m \eta_0}{\sigma_m \eta_0 + (1 + \sqrt{\epsilon})}, \quad (1)$$

其瞬变电流表达式为

$$J = \sigma_m E_b / [1 + \sigma_m \eta_0 / (1 + \sqrt{\epsilon})], \quad (2)$$

式中 σ_m 为半导体表面电导率, η_0 为自由空间电阻率, ϵ 为半导体介电常数。当偏置电场 E_b 增大时,太赫兹电场 E_m 也随之增大,当 $\sigma_m \eta_0 / (1 + \sqrt{\epsilon}) \geq 1$ 时,辐射的太赫兹场达到饱和。

作为发射源,光导开关有 3 种工作模式:线性、非线性以及复合工作模式。

在线性工作模式下,光导开关的导通是由光生载流子决定的,即光导材料每吸收一个光子便相应地产生一个电子-空穴对,器件的电导率和输出电脉冲幅度都和光脉冲的强度呈线性关系,当光脉冲消失后,光导开关恢复到高阻状态,且没有时间延迟。

在非线性工作模式下,开关的导通与光生载流子以及载流子的雪崩增长过程有关。当光导开关导通后,即使光脉冲熄灭,开关也不会立即恢复到最初的高阻状态,并且只要外电路的偏置电压持续给开关供电,那么开关就会一直处于导通状态。即在电脉冲的输出和光脉冲的触发之间存在时间延迟,延迟时间与触发光能量、开关的偏置电压以及光导开关的材料性质有关。

复合工作模式是 1064 nm 激光触发光导开关时特有的现象^[10]。开关首先进入线性模式,然后经过大约几十纳秒的时间延迟后再进入非线性工作模式。当加到光导开关电极两端的偏置电压不变时,线性波形和非线性波形之间的时间延迟随触发光能的增大而减小,当触发光能较大时,甚至不会出现延迟现象。该模式只在光导开关外加电场处于耿氏电场临界值(对于 Si-GaAs,约为 4.0 kV/cm)附近时才发生。如果所加偏置电场值大于或小于该值,则开关或者进入线性模式,或者进入非线性模式。

2.3 砷化镓光导开关作为探测源的机理

利用光导开关检测信号的方法很多,最常用的是脉冲辐射探测和连续波信号探测。其中脉冲辐射探测主要用取样方法来实现,目前经常使用的取样方法是光电取样。

光电取样是把调制的光信号转换成电信号并将信息提取出来。利用光脉冲控制取样门,以消除一般电脉冲

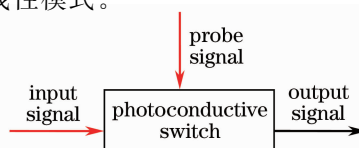


图 3 光电取样示意图

Fig. 3 Scheme of photoelectrical sampling

取样门所伴随的取样泄漏(即取样脉冲的剩余输出),从而可以对取样门的电路形式加以简化。其原理如图3所示。输入信号为太赫兹信号,探测信号为飞秒激光脉冲。根据取样定理,通过改变这两个脉冲之间的时间延迟,可以得到的输出信号 $Y(t)$ 是入射太赫兹脉冲 $O(t)$ 与探测器材料的载流子统计寿命 $L(t)$ 的卷积,

$$Y(t) \propto \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[\frac{(m-t)\Delta t^2 - 4(\ln 2)\tau t^2}{\tau\Delta t^2}\right] \theta(t-m) dm, \quad (3)$$

式中 $L(t) = \exp(-t/\tau)\theta(t)$, τ 为载流子寿命, $\theta(t)$ 为阶跃函数, $L(t)$ 表明载流子产生后便发生复合, $O(t) = \exp[-4(\ln 2)(t/\Delta t^2)]$, Δt 为脉冲的半峰全宽(FWHM)。

3 砷化镓光导开关的发展现状

3.1 光导开关作为发射源的发展现状

早在1992年,Justin T. Darrow等^[11]就对光电导天线产生太赫兹波的机制进行了实验研究,用大孔径天线获得了0.6 ps的脉冲宽度,其实验结果与理论推导相一致。在2001年,Toshiaki Hattori等^[12]研究了大孔径光导天线产生太赫兹波的时间特性,观察到太赫兹辐射场的峰值达5.7 kV/cm,还发现当增大抽运脉冲时,饱和状态下太赫兹辐射场的峰值会发生移动并且压缩了脉冲宽度。

国内也在这方面做了大量研究。2002年张显斌等^[13]报道了用光子能量低于GaAs禁带宽度的900, 1064和1530 nm红外激光脉冲触发半绝缘砷化镓光导开关,得到的电脉冲波形表明半绝缘砷化镓光电导开关可以吸收大于本征吸收限波长的红外激光脉冲。特别是当他们用1064 nm^[14]激光脉冲触发电极间隙为8 mm的半绝缘砷化镓光导开关,发现在触发光能为1.9 mJ,偏置电压为3 kV和5 kV的条件下,光导开关分别工作于线性和非线性模式下。2004年施卫等^[15]进行了用飞秒激光脉冲触发GaAs的实验,用具有条形电极结构的GaAs光电导偶极天线得到了辐射峰值位于0.5 THz左右,频谱宽度大于2 THz,脉冲宽度约为1 ps的THz电磁波。2007年戴慧莹等^[16]用1064 nm激光脉冲触发半绝缘GaAs光导开关,对线性模式输出超短电脉冲响应特性进行了测试和分析,结果表明在低偏置电压的情况下,开关导通并工作在线性模式下;影响超短电脉冲响应特性的主要原因是缺陷能级的俘获作用,共面微带传输线对超短电脉冲波形时间特性不产生明显的影响。2008年景争等^[17]通过实验研究了触发光入射位置对光导开关输出脉冲电压的影响。证明在从开关负极到正极的线扫描过程中,输出电压逐渐上升,但峰值出现在临近正极区域而不是金属电极的边缘,随后又逐渐减弱,并指出这一现象和开关体内电场的分布有密切联系。2009年刘鸿等^[18]分析了在高增益本征GaAs光导开关中的光致电离效应,讨论了光导开关的最优触发激光条件,以及流注的复合辐射在流注周围产生非平衡载流子的规律,发现了局域激光触发的能量阈值和触发区域沿电场方向的长度阈值 L_{ec} 。2009年黄振等^[19]研究了5种不同尺寸的光电导天线的太赫兹发射特性,对它们所发射的太赫兹波进行了对比,结果表明偏置电压、抽运激光的功率和天线形状都会对光电导天线发射太赫兹波的强度产生影响,通过实验可以得到理想的光电导天线工作条件。到目前为止,许多课题组已经用光生载流子的导电过程解释了光导开关的线性工作模式,但仍未找到一种明确的机制来描述非线性工作模式。

3.2 光导开关作为探测源的发展现状

20世纪90年代初,R. J. Hamers等^[20]将扫描探针显微镜(STM)用于光导开关时间分辨率的测量,测量了硅Si(111)-(7×7)表面的时间分辨率且达到了纳秒量级。随后S. Weiss等^[21]将超短脉冲信号与扫描隧道显微镜相结合,测得的时间分辨率达2 ps,空间分辨率达5.0 nm。同年Harry Heinzelmann等^[22]利用该扫描探针技术测得了单铯(Cs)原子在原子特征W(111)尖端移动的时间分辨率为2 ps。M. R. Freeman等^[23]也用该技术获得了纳秒量级的时间分辨率。1995年D. Botkin等^[24]用超快扫描隧道显微镜(USTM)对原子表面进行了单点测试并得出空间分辨率可达到原子量级的结论。Ulrich D. Keil等^[25~27]于1996年进一步改进了USTM的结构,利用共平面条形线(CPS)结构的集成探针测量了共平面波导(CPW)样品,得到的空间分辨率达10~20 nm;他们用光纤耦合的方法分别测量了在直接接触以及隧穿模式下的时间分辨率,前者为5 ps,后者为2.9 ps。

1997年R. H. M. Groeneveld等^[28]率先将光电导开关与扫描隧道显微镜相结合(PG-STM),并用该技

术探测到了皮秒量级的瞬态电信号,他们发现在高电阻隧穿模式下,交互电流的产生与扫描探针和微带传输线之间的电容耦合有关。与此同时,M. R. Freeman 等^[29]将扫描探针显微镜与超快激光技术相结合,并用单点频闪的探测方式对高速动态微观结构进行研究,他们提出的结混合扫描隧道显微镜(JM-STM)以及远程调制扫描隧道显微镜(DM-STM)的方法适合研究表面的动态过程。1998年 Ulrich D. Keil 等^[30]用 USTM 瞬态测量技术并结合电容耦合的方法测量了低温砷化镓(LT-GaAs)材料的表面性质,获得了 1.8 ps 的时间分辨率以及 10 nm 的空间分辨率。

21 世纪初,N. N. Khusnatdinov 等^[31]利用结混合扫描隧道显微镜在真空超高压条件下,对一个有钛覆图案的表面使用 20 ps 瞬变电压产生的隧道电流完成了 1 nm 空间分辨率的信号测量,通过对于 JM-STM 信号的对比观察,发现金(Au)与钛(Ti)表面的电子结构完全不同。2006年由 Yasuhiko Terada 等^[32]提出的一种方法是直接用一系列激光脉冲对照射隧穿结,通过测量平均隧穿电流随两个脉冲对之间延迟时间的变化,观测超快瞬态现象。由于系统中无需对激光强度进行调制,因此不会发生 STM 针尖的热膨胀现象。

1991年袁树忠等^[33]用 Ar⁺ 锁模同步抽运燃料激光器和 SOS 为衬底的光电导开关组成的皮秒光电导取样测量系统,测量了美国 Spectra-Physics 公司的 403B 超高速光电二极管及其他高速光电探测器的响应时间,该系统的时间分辨率可达 7 ps,灵敏度可达到 10 μ V。随后他们用皮秒光电导采样技术原理^[34]测量了自制的皮秒光电导开关^[35],获得了 5 ps 的时间分辨率。1999年吕福云等^[36]用光电导采样技术测量了宽带(18~36 GHz)低噪声三级放大器的 S 参数,其测量带宽已达到 100 GHz,金属-半导体-金属(MSM)光探测器的响应时间也已达到 0.8 ps。近年国内的研究更倾向于探测器结构的设计和传输特性方面。2009年马国永等^[37]基于半经验色散公式,研究了太赫兹高频范围的模式色散和 LT-GaAs 光导开关的辐射衰减特性,通过模拟得到的结果表明,模式色散和辐射衰减会使超短电脉冲波形发生畸变,选择小的横向尺寸比可以降低辐射衰减和模式色散的影响。

4 结 论

纵观国内外在探测方面的发展,美国和日本的科学家都在进行将扫描隧道显微镜和作为检测元件的 GaAs 光导开关相结合的研究,其目的旨在提高开关时间分辨率的同时,获得高空间分辨率。国内在探测方面的研究,更倾向于应用方面,其主要的研究对象是一些高速探测器的时间分辨率。总之,作为发射元件,国内对 GaAs 光导开关在发射机制和应用方面进行了较为深入的理论和实验研究,但在探测方面,对开关的工作机制及其应用的研究还有待进一步发展。

参 考 文 献

- 1 S. Jayaraman, C. H. Lee. Observation of switching and gating in silicon[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **26**(3): 101~103
- 2 U. D. Keil, J. R. Jensen, J. M. Hvam. Transient measurements with an ultrafast scanning tunneling microscope[J]. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Proc.*, 1998, **66**: 23~26
- 3 S. Hong, R. Reifenberger. Stability of a low-temperature grown GaAs surface layer following airexposure using tunneling microscopy[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**(16): 2258~2260
- 4 Wang Songbai. The analyzing of three surface photovoltage spectrum regions of semi-insulating GaAs[J]. *Jiangxi Science*, 2005, **23**(5): 548~551
王松柏. 半绝缘砷化镓表面光伏谱的三区分析[J]. *江西科学*, 2005, **23**(5): 548~551
- 5 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性特性分析[J]. *物理学报*, 2007, **56**(7): 3845~3850
- 6 Shi Wei, Qu Guanghui. Optimization method of design of semi-insulating GaAs photoconductive switch's Gap[J]. *High Voltage Engineering*, 2003, **29**(5): 1~2,10
施 卫,屈光辉. 半绝缘砷化镓光电导开关电极间隙的优化设计[J]. *高电压设计*, 2003, **29**(5): 1~2,10
- 7 M. S. Mazzola, R. A. Roush, D. C. Stoudt *et al.*. Evaluation of transport effects on the performance of a laser-controlled GaAs switch[C]. *IEEE International Pulse Power Conference*, San Diego, 1991. 37~40
- 8 Ch. Fattering, D. Grichkowsky. Terahertz beams[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **54**(6): 490~492
- 9 Shi Xiaoxi. Study on large-aperture photoconductive antenna and its characteristics of terahertz radiation[D]. Beijing:

- Capital Normal University, 2008. 35
- 石小溪. 大孔径光电导天线及其太赫兹辐射特性研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2008. 35
- 10 Zhang Xianbin. Some problems study on the generation of ultrafast electromagnetic pulse using photoconductive semiconductor switches[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2003. 37~38
- 张显斌. 用半绝缘 GaAs 光电导开关产生超短电磁脉冲若干问题研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2003. 37~38
- 11 Justin T. Darrow, Xicheng Zhang, David H. Auston *et al.*. Saturation properties of large aperture photoconducting antennas [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(6): 1607~1616
- 12 Toshiaki Hattori, Keiji Tukamoto, Hiroki Nakatsuka. Time resolved study of intense terahertz pulses generated by a large aperture photoconductive antenna[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, **40**(8): 4907~4912
- 13 Zhang Xianbin, Shi Wei, Li Qi *et al.*. Experimental study of semi-insulating GaAs photoconductive switch triggered by infrared laser pulse[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(6): 815~818
- 张显斌, 施卫, 李琦等. 用红外激光脉冲触发半绝缘 GaAs 光电导开关的实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(6): 815~818
- 14 Zhang Xianbin, Li Qi, Shi Wei *et al.*. Semi-insulating GaAs photoconductive switch being triggered by 1064 nm laser pulse [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(9): 1081~1085
- 张显斌, 李琦, 施卫等. 用 1064 nm 激光脉冲触发半绝缘 GaAs 光电导开关的研究[J]. *光子学报*, 2002, **31**(9): 1081~1085
- 15 Shi Wei, Tian Liqiang. Breakdown characteristics of semi-insulating GaAs photoconductive switch [J]. *Chinese J. Semiconductor*, 2004, **25**(6): 691~696
- 施卫, 田立强. 半绝缘 GaAs 光电导开关的击穿特性[J]. *半导体学报*, 2004, **25**(6): 691~696
- 16 Dai Huiying, Ma Deming, Shi Wei. Research on response property of ultra-short electrical pulse of semi-insulating GaAs photoconductive switch[J]. *J. Xi'an University of Technology*, 2007, **23**(3): 236~239
- 戴慧莹, 马德明, 施卫. GaAs 光导开关超短电脉冲响应特性的研究[J]. *西安理工大学学报*, 2007, **23**(3): 236~239
- 17 Jing Zheng, Wang Tao, Ruan Chi *et al.*. Analysis on performance of PCSS triggered by femto-second laser pulse by position [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(12): 2383~2386
- 景争, 汪韬, 阮驰等. GaAs 光导开关飞秒激光点触发实验及分析[J]. *光子学报*, 2008, **37**(12): 2383~2386
- 18 Liu Hong, Ruan Chengli. Photo-ionization effects in high gain Gallium arsenide photoconductive semiconductor switches[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 496~499
- 刘鸿, 阮成礼. 高增益砷化镓光导开关中的光致电离效应[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 496~499
- 19 Huang Zhen, Yu Bin, Zhao Guozhong *et al.*. Study on terahertz source of small-aperture bow-tie photoconductive antenna [J]. *Laser & Infrared*, 2009, **39**(2): 183~186
- 黄振, 于斌, 赵国忠等. 小孔径蝴蝶型光电导天线太赫兹辐射源的研究[J]. *激光与红外*, 2009, **39**(2): 183~186
- 20 R. J. Hamers, David G. Cahill. Ultrafast time resolution in scanned probe microscopies[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **57**(19): 2031~2033
- 21 S. Weiss, Frank D. Ogletree, D. Botkin *et al.*. Ultrafast scanning probe microscopy[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(18): 2567~2569
- 22 Harry Heinzlmann, Fumiya Watanabe, Gary M. McClelland. Observing the motion of a single adsorbed atom with picosecond and subnanometer resolution[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **70**(23): 3611~3614
- 23 M. R. Freeman, G. Nunes, Jr. Time-resolved scanning tunneling microscopy through tunnel distance modulation[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(19): 2633~2635
- 24 D. Botkin. Design consideration in an ultrafast scanning tunneling microscope[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, **66**(8): 4130~4134
- 25 Ulrich D. Keil, Jacob R. Jensen, Jorn M. Hvam. Fiber coupled ultrafast scanning tunneling microscope[J]. *Appl. Phys.*, 1997, **81**(7): 2929~2933
- 26 Ulrich D. Keil, Jacob R. Jensen, Jorn M. Hvam. Measuring voltage transients with an ultrafast scanning tunneling microscope[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(19): 2625~2627
- 27 Jacob R. Jensen, Ulrich D. Keil, Jorn M. Hvam. Spatio-temporal imaging of voltage pulses with an ultrafast scanning tunneling microscope[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(20): 2762~2764
- 28 R. H. M. Groeneveld, H. van Kempen. The capacitive origin of the picosecond electrical transients detected by a photoconductively gated scanning tunneling microscope[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **63**(15): 2294~2296
- 29 M. R. Freeman, A. Y. Elezzabi, G. M. Steeves *et al.*. Ultrafast time resolution in scanning tunneling microscopy[J]. *Surface Sci.*, 1997, **386**(1): 290~300
- 30 Ulrich D. Keil, Jacob R. Jensen, Jorn M. Hvam. Transient measurements with an ultrafast scanning tunneling microscope on semiconductor surfaces[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(13): 1644~1646

- 31 N. N. Khusnatdinov, T. J. Nagle, G. Nunes, Jr. Ultrafast scanning tunneling microscopy with 1 nm resolution[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(26): 4434~4436
- 32 Yasuhiko Terada, Masahiro Aoyama, Hiroyuki Kondo *et al.*. Ultrafast photoinduced carrier dynamics in GaNAs probed using femtosecond time-resolved scanning tunneling microscopy[J]. *Nanotechnology*, 2007, **18**(4): 044028
- 33 Yuan Shuzhong, Guan Xin'an, Lü Fuyun. Measurement of response time of ultrafast photoelectric detectors and dispersive broadening effect of connectors with picosecond photoconductive sampling technique[J]. *Chinese J. Lasers*, 1991, **18**(6): 417~420
袁树忠,关信安,吕福云. 利用 ps 光电导取样技术测量超快光电探测器的响应时间和联结件的色散展宽[J]. *中国激光*, 1991, **18**(6): 417~420
- 34 Yuan Shuzhong, Lü Fuyun, Guan Xin'an *et al.*. Picosecond photoconductive sampling technique and application[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 1994, (1): 16~19
袁树忠,吕福云,关信安. 微微秒光电导采样技术及应用[J]. *南开大学学报*, 1994, (1): 16~19
- 35 Pan Jiaqi, Yuan Shuzhong, Lü Fuyun *et al.*. Design of SOS picosecond photoconductive switch configuration and experimental result[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 1994, (1): 12~15
潘家齐,袁树忠,吕福云等. SOS 微微秒光导开关的结构设计及实验结果[J]. *南开大学学报*, 1994, (1): 12~15
- 36 Lü Fuyun, Yuan Shuzhong, Pan Jiaqi *et al.*. The measurement of sparmeter of a microwave monolithic integrated circuit by ps photoconductive sampling technique[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1999, **27**(2): 26~28
吕福云,袁树忠,潘家齐等. 用 ps 光电导采样技术测量微波单片集成电路的 S 参数[J]. *电子学报*, 1999, **27**(2): 26~28
- 37 Ma Guoyong, Lan Tian, Zhang Yinchoo *et al.*. Propagation characteristics of transient pulse generated by low temperature GaAs photoconductive switches of coplanar striplines[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s2): 73~77
马国永,蓝天,张寅超等. 共平面低温砷化镓光导开关产生瞬态脉冲传输特性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s2): 73~77