

文章编号: 1006-4710(2013)01-0008-05

# 超快光电导开关的传输特性分析及优化方案

王馨梅<sup>1</sup>, 纪卫莉<sup>2</sup>, 施卫<sup>2</sup>, 张苗苗<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 西安理工大学 理学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 超快光电导开关输出的是超宽带的电脉冲信号, 因此开关至负载的传输线路设计优劣对输出波形影响很大。本研究分析了光电导开关典型的同轴-微带传输结构, 计算了线性工作模式下开关电阻瞬态变化在传输线路阻抗不连续处引起的电磁波反射, 及其对输出脉冲波形和电压传输率产生的影响, 然后与实测脉冲波形进行了对比, 解释了肩峰现象。最后根据仿真结果提出了提高光电导开关传输特性的三种优化方案。

**关键词:** 光电导开关; 传输特性; 电脉冲

**中图分类号:** TN202      **文献标志码:** A

## Analysis and Optimizing Design For Matching Transmission Characteristics of Ultra-Fast Photoconductive Semiconductor Switches

WANG Xinmei<sup>1</sup>, JI Weili<sup>2</sup>, SHI Wei<sup>2</sup>, ZHANG Miaomiao<sup>2</sup>

(1. Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Faculty of Science, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The output of an ultra-fast photoconductive semiconductor switch (PCSS) is ultra-wideband electric pulses, so that the good design of transmission line from the switch to the load has a great effect upon the output waveforms. The coaxial-to-microstrip transition, a classic transition structure of planar PCSS, is analyzed in this paper. Considering the transient resistance of the linear-mode PCSS, the reflections of electromagnetic wave caused at the impedances discontinuity points are calculated. Its influences on the output waveform and on the voltage transmission efficiency are computed. And then, the contrasts are made with the real measured pulse waveforms, thus accounting for the shoulder peak phenomenon. Finally, in accordance with the simulation results, three kinds of optimized schemes of improving PCSS transmission characteristics are suggested.

**Key words:** photoconductive semiconductor switch; transmission characteristic; electric pulse

具有超快上升沿的大功率电脉冲序列在科研、医疗、国防等领域中有广泛应用。当脉冲功率系统需要兼顾超快开通、高重复频率、高功率、低触发抖动时, 光电导开关(Photoconductive Semiconductor Switch, PCSS)是所有功率开关器件中的最优选择<sup>[1-5]</sup>。其工作原理是用超短激光脉冲触发高偏置电场下的半绝缘半导体, 瞬间产生大量光生电子-空穴对参与电流输运, 再随着光生载流子的复合和

电极吸收, 迅速恢复为半绝缘态使开关闭合。随着超短脉冲激光器技术的迅猛发展, 超快光电导开关在超宽带雷达、超宽带通信等领域的应用前景越来越广阔。超宽带电脉冲的传输结构设计优劣对输出波形和电压传输效率影响很大, 因此有必要对光电导开关传输线路中所有阻抗不连续点进行分析和优化设计。

**收稿日期:** 2012-12-02

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60906029); 陕西省教育厅专项科研计划基金资助项目(09JK663); 广东省产学研基金资助项目(2011B090400362)。

**作者简介:** 王馨梅, 女, 副教授, 博士, 研究方向为超快功率半导体器件。E-mail: wangxinmei@xaut.edu.cn。

## 1 理论计算

光电导开关的经典传输方案是微带-同轴过渡,结构如图1所示。开关经微带传输线过渡后接同轴端子,再连接开关外部的同轴传输线。严格说来,微带不是 TEM 波传输线,可称之为准 TEM 模,精度已足够满足脉冲功率技术要求。本实验选择充填纤维的聚四氟乙烯覆铜板制作微带线,结构如图2所示,其电磁波传输速度介于空气中的光速  $c$  和基板中波速  $c/\sqrt{\epsilon_r}$  之间。

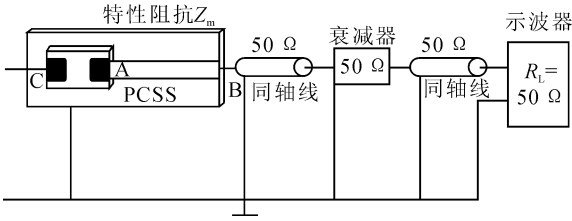


图1 光电导开关的传输线结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of transmission line connected with planar PCSS

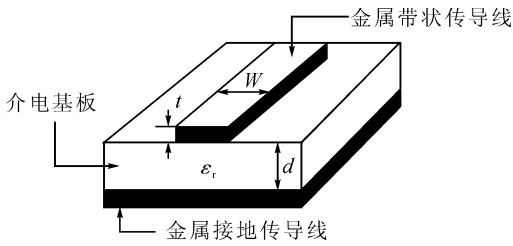


图2 微带传输线的结构图

Fig. 2 Structure diagram of microstrip transmission line

按照工程惯例,为了和  $50 \Omega$  电阻负载匹配,同轴传输线和微带线的特性阻抗设计值均为  $50 \Omega$ 。覆铜层的厚度 ( $t$ ) 为  $0.1 \text{ mm}$ ,介电基板(聚四氟乙烯)的相对介电常数 ( $\epsilon_r$ ) 为  $2.55$ ,基板厚度 ( $d$ ) 为  $2.3 \text{ mm}$ 。因此铜导带的线宽应为  $6.44 \text{ mm}$ ,其计算公式为:

$$\frac{W}{d} = \frac{8e^K}{e^{2K} - 2}, (W/d < 2 \text{ 时}) \quad (1)$$

$$\frac{W}{d} = \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \right.$$

$$\left. \left[ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] \right\}, (W/d \geq 2 \text{ 时}) \quad (2)$$

$$\text{其中, } K = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left( 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0 \sqrt{\epsilon_r}}$$

需要特别指出的是,光电导开关近似为一个时

变电阻  $R_{\text{pcss}}(t)$ ,因此无论微带线的特性阻抗 ( $Z_0$ ) 为何值,PCSS 都不可能和微带传输线完美匹配。在二者连接处(图1所示的A反射点),电压和电流信号的透射率为:

$$T_A(t) = 1 - \left| \frac{Z_0 - R_{\text{PCSS}}(t)}{Z_0 + R_{\text{PCSS}}(t)} \right| \quad (3)$$

设 PCSS 用半绝缘 GaAs:EL2 材料制作,其半绝缘性质源于液封直拉法砷化镓晶体生长中的非故意掺杂自补偿<sup>[6]</sup>。设电极间隙为  $4 \text{ mm}$ ,在外加偏置  $1300 \text{ V}$  电压下由纳秒脉冲激光器触发,工作在线性模式<sup>[7-8]</sup>下。按照以往实验经验拟合它的通态电阻  $R_{\text{PCSS}}$  随时间的变化曲线,如图3所示。如果 PCSS 完全导通时的电阻值小于  $50 \Omega$ ,根据式(3)计算,电磁波的透射率随光电导开关电阻瞬态变化而出现两次极大值(见图4(a)),输出电压脉冲的典型波形如图4(b)所示。如果 PCSS 完全导通时电阻值大于  $50 \Omega$ ,则电磁波的透射率只出现一次极大值(见图5(a)),输出电压脉冲的典型波形如图5(b)所示。

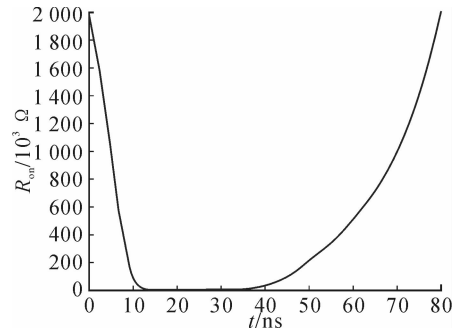


图3 光电导开关的瞬态电阻

Fig. 3 Transient resistance of PCSS

上文仅考虑了第一次发生部分反射时的透射波,图4(b)的仿真结果中有两个峰且高度基本相等。进一步分析完整的波过程为,在图1所示A点第一次发生部分反射/透射,其反射脉冲传播至图1所示的C点处再次发生部分反射,在A点处第二次发生部分反射/透射,反射波如上所述再次循环往复,而透射波到达负载。其中,二次透射率可表示为:

$$\eta_2(t) = R_A(t - 2t_d) \cdot R_C(t - t_d) \cdot T_A(t) \cdot \alpha \quad (4)$$

式中,  $R_A$ 、 $T_A$  分别为 A 点的反射率、透射率,  $R_C$  为 C 点的透射率,  $t_d$ 、 $\alpha$  分别为电磁波在 PCSS 的单程传播时间和来回损耗。式(4)展开为:

$$\eta_2(t) = \frac{Z_0 - R_{\text{PCSS}}(t - 2t_d)}{Z_0 + R_{\text{PCSS}}(t - 2t_d)} \cdot$$

$$\frac{Z_1 - R_{\text{PCSS}}(t - t_d)}{Z_1 + R_{\text{PCSS}}(t - t_d)} \cdot \left( 1 - \left| \frac{Z_0 - R_{\text{PCSS}}(t)}{Z_0 + R_{\text{PCSS}}(t)} \right| \right) \cdot \alpha \quad (5)$$

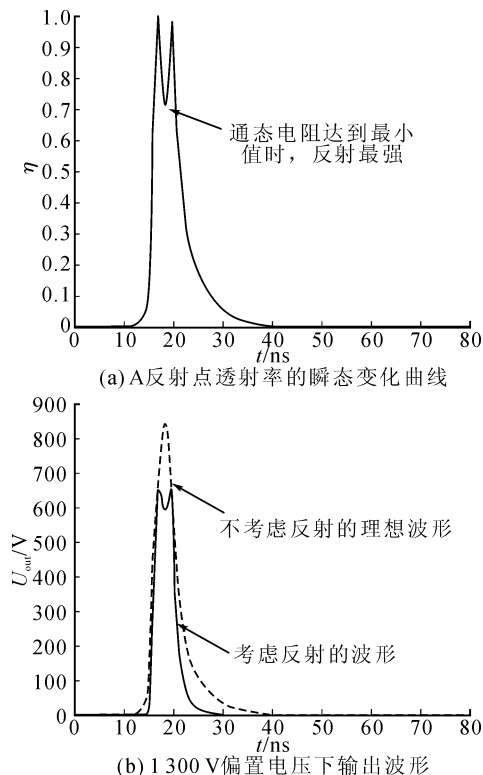


图4 PCSS 通态电阻最小值为  $25 \Omega$  时传输特性的仿真图  
Fig.4 Simulation analysis of transmission characteristic when assuming the minimum on-state resistance of PCSS is  $25 \Omega$

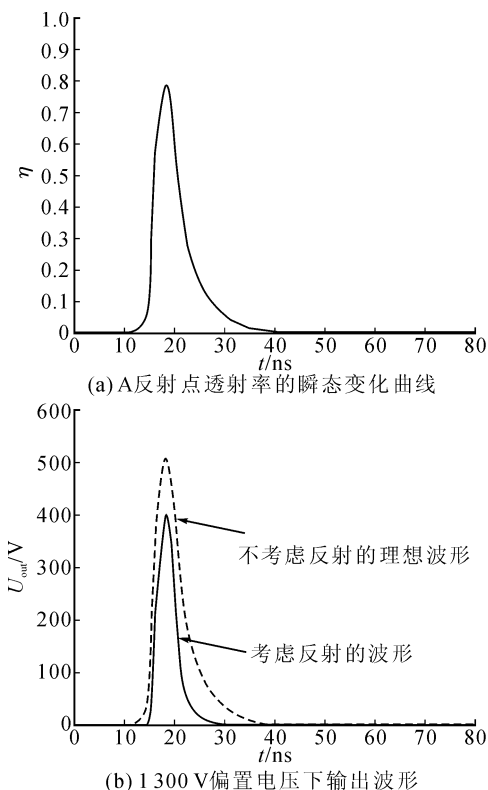


图5 PCSS 通态电阻最小值为  $75 \Omega$  时传输特性的仿真图  
Fig.5 Simulation analysis of transmission characteristic when assuming the minimum on-state resistance of PCSS is  $75 \Omega$

式中,  $Z_1$  为 C 点处传输线特性阻抗。针对前述 4 mm GaAs PCSS 仿真对象, 取  $t_d = 1 \text{ ns}$ ,  $\alpha = 0.5$  和  $Z_1 = 50 \Omega$  时的仿真结果, 见图 6。从图 6(b) 可以看出, 考虑了二次透射波之后, 第一个峰会比第二个峰略高, 从而形成了肩峰现象。

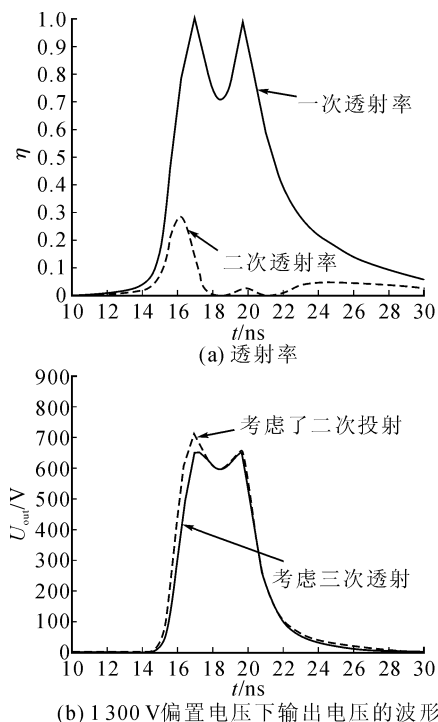


图6 PCSS 通态电阻最小值为  $25 \Omega$  时二次透射波的仿真结果

Fig.6 Simulation analysis of transmitted wave when assuming the minimum on-state resistance of PCSS is  $25 \Omega$

## 2 实验结果

实际测试一个电极间隙 4 mm 的 GaAs:EL2 光电导开关, 测试电路如图 1 所示, 微带线的参数如上节所述。直流偏置电源端口并联着 11 个  $0.01 \mu\text{F}$  的陶瓷电容作为储能电容。

用 SGR-S/100 型 Q 开关掺钕铝石榴石 (Nd-doped Yttrium Aluminum Garnet, Nd:YAG) 激光器触发, 其触发光波长为  $1064 \text{ nm}$ , 光能为  $8 \text{ mJ}$ , 脉宽为  $8 \text{ ns}$ , 在时间和空间均近似为高斯分布。PCSS 输出电脉冲经 60 dB 同轴衰减器 (带宽为  $0 \sim 4 \text{ GHz}$ ) 衰减, 输出到 TDS 5104 示波器上。

偏置电压分次调至  $1150 \text{ V}$ 、 $1300 \text{ V}$ 、 $1400 \text{ V}$  时触发 PCSS, 因偏置电场与触发光能不满足 GaAs:EL2 PCSS 进入非线性工作模式所需的光电阈值条件<sup>[7-8]</sup>, 所以该开关工作在线性模式下, 输出波形如图 7 所示。峰值电压传输效率为  $52\% \sim 60\%$ , 在主峰后均有一个明显的肩峰。

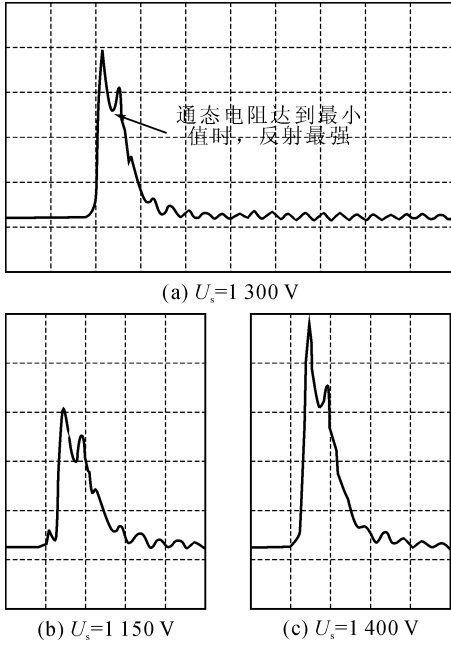


图7 不同偏置电压下4 mm GaAs 光电导开关的输出波形( $X:80 \text{ ns/格}$ ,  $Y:200 \text{ V/格}$ )

Fig. 7 Output waveforms of 4 mm GaAs PCSS biased at different bias voltages( $X:80 \text{ ns/div}$ ,  $Y:200 \text{ V/div}$ )

图7中三个电脉冲波形的一致性表明肩峰现象不是随机现象,对照上文仿真分析结果(图6)可知,输出脉冲波形的肩峰现象源自于超宽带电磁波在PCSS与微带传输线连接处的第一次强反射。

图7(a)中箭头所标示的时刻(位于激光触发后第24 ns左右)是通态电阻达到最小值的时刻(通常滞后于光脉冲峰值时刻,该滞后时间主要取决于载流子寿命、偏置电场强度和传输线色散程度)。该时刻PCSS与微带线不匹配程度达到局部最大,因此电磁波反射最强,电压为局部最小,从而在该时刻之后出现了所谓的“肩峰”现象。将电压传输效率最小值带入式(3),反推出PCSS最小通态电阻约为 $11.7 \Omega$ 。

### 3 优化方案

由上述仿真和实验结果知,输出电脉冲的峰值会因反射而损失。为了减小反射损失,优化方案之一是对触发光的能量值进行优化,使之达到阻抗匹配。但是受超快脉冲激光器输出功率限制,对电极间隙较大的光电导开关而言上述方案通常不可行。原因为,假设光生载流子的寿命大于超快激光脉冲的脉宽(即忽略载流子复合),则光生载流子最大浓度为:

$$\Delta n = \Delta p = \frac{\eta E_{\text{all}}(1-R)}{h\nu w l \xi} \quad (6)$$

式中,  $h\nu$  为光子能量;  $R$  为界面反射比;  $\eta$ 、 $E_{\text{all}}$ 、 $\xi$  分别为入射光的量子效率、总能量和吸收深度;  $w$  为电极间隙宽度。

由于PCSS中平衡载流子浓度很低,实际电子浓度( $n$ )和空穴浓度( $p$ )约等于光生电子浓度和光生空穴浓度,因此开关最小通态电阻为:

$$R_{\text{min}} = \frac{l}{(q\eta\mu_n + qp\mu_p)w\xi} = \frac{l^2 h\nu}{\eta E_{\text{all}} q(\mu_n + \mu_p)(1-R)} \quad (7)$$

式中,  $\mu_n$ 、 $\mu_p$  分别为电子、空穴迁移率。

当PCSS外加偏置电场小于 $2 \text{ kV/cm}$ 量级时,通常可理想化地认为迁移率与电场强度无关。

实际工程中,常用增大PCSS电极间隙的方法提高其耐压能力,然而由式(7)知最小通态电阻与电极间隙的平方成正比,即为追求阻抗匹配,所需的脉冲激光能量应随电极间隙的增大而平方增长。

超快脉冲激光器的单脉冲能量越大则激光器成本越高且便携性越差,因此上述优化方案不适用于大间隙的光电导开关。

减小反射的优化方案之二是对微带线结构进行优化,通过铜导带宽度的渐变设计实现特性阻抗过渡,避免电场的严重畸变,抑制高次谐波的反射。

铜导带渐变线的宽度应根据式(1)和式(2)计算,计算结果见图7。由于 $W = f(Z_0)$ 函数关系复杂,这种优化方案增加了刻蚀工艺技术难度。

减小反射的优化方案之三是对微带线特性阻抗 $Z_0$ 值进行优化,即当 $Z_0 \neq 50 \Omega$ 时,传输线阻抗不连续处为图1所示的A点和B点,如果忽略A、B点之间电磁波的多次反射对输出信号造成的畸变,则信号的总透射率 $\eta$ 为:

$$\eta = \eta_A \times \eta_B = \left(1 - \left| \frac{Z_0 - R_{\text{min}}}{Z_0 + R_{\text{min}}} \right| \right) \times \left(1 - \left| \frac{R_L - Z_0}{R_L + Z_0} \right| \right) \quad (8)$$

其中,  $\eta_A$ 、 $\eta_B$  分别为A点和B点的透射率。

$Z_0$ 的最优值对应于 $\eta$ 的最大值,且该值必然介于开关通态电阻最小值 $R_{\text{min}}$ 和负载电阻 $R_L$ 之间。

根据式(8)分别计算 $R_{\text{min}}$ 等于 $5 \Omega$ 、 $10 \Omega$ 、 $20 \Omega$ 、 $50 \Omega$ 、 $70 \Omega$ 时 $\eta$ 随 $Z_0$ 变化的曲线,如图8和图9所示,  $Z_0$ 的最优值分别是 $15.8 \Omega$ 、 $22.4 \Omega$ 、 $31.6 \Omega$ 、 $50.0 \Omega$ 、 $59.2 \Omega$ 。

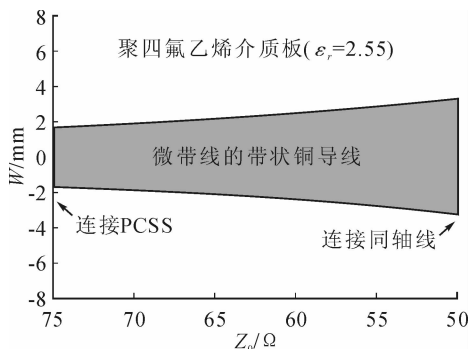


图8 PCSS 通态电阻最小值为  $75\Omega$  时微带渐变线的线宽

Fig. 8 Width of gradually changing microstrip when the minimum on-state resistance of PCSS equals  $75\Omega$

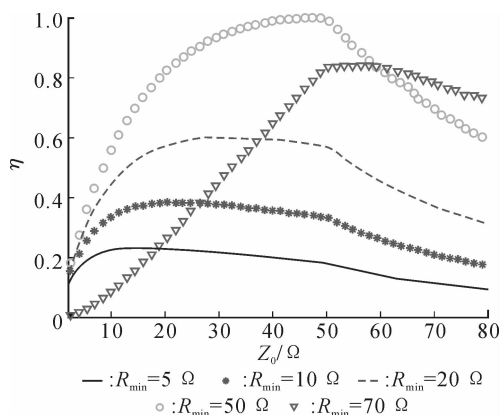


图9 微带线特性阻抗值与透射率的关系曲线

Fig. 9 Relationship curve of microstrip characteristic impedance versus transmittance

## 4 结论

线性工作模式的砷化镓超快光电导开关已被应用于工程实际中,其输出脉冲的波形和传输效率一直是关注的重点。光电导开关内阻的瞬态变化,导致了阻抗匹配难题。本研究仿真分析了光电导开关的微带-同轴输出结构中的波反射对输出波形和电压传输效率的影响,该仿真结果能够解释实测波形的肩峰现象。最后根据仿真结果提出了提高光电导开关传输特性的三种优化方案。

## 参考文献:

- [1] Kelkar K S, Islam N E, Fessler C M, et al. Silicon carbide photoconductive switch for high-power, linear-mode operations through sub-band-gap triggering[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 98(9): 1-6.
- [2] Pocha M D, Druce R L. 35 kV GaAs subnanosecond photoconductive switches[J]. IEEE Transaction Electron Devices, 1990, 37(12): 2486-2492.
- [3] Loubriel G M, Zutavern F J, Baca A G, et al. Photoconductive semiconductor switches [J]. IEEE Transaction Plasma Science, 1997, 25(2): 124-130.
- [4] 施卫, 马德明, 赵卫. 用光电导开关产生稳幅 ps 量级时间晃动超快电脉冲的研究[J]. 物理学报, 2004, 53(6): 1716-1720.  
Shi Wei, Ma Deming, Zhao Wei. Generation of steady and jitter\_free ultra\_fast electrical pulses with GaAs photoconductive switches[J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(6): 1716-1720.
- [5] Shi W, Tian L, Liu Z, et al. 30 kV and 3 kA semi-insulating GaAs photoconductive semiconductor switch[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(04): 043511.
- [6] Bourgoin J C, Neffati T. Detection of the metastable state of the EL2 defect in GaAs[J]. Journal of Applied Physics, 1997, 82(8): 4124-4125.
- [7] 薛红, 施卫, 纪卫莉, 等. GaAs 光电导开关非线性锁定效应的机理研究[J]. 西安理工大学学报, 2011, 27(4): 407-410.  
Xue Hong, Shi Wei, Ji Weili, et al. Lock-on mechanism in nonlinear mode of photoconductive switches[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011, 27(4): 407-410.
- [8] 施卫, 贾婉丽, 纪卫莉, 等. 光电导开关工作模式的蒙特卡罗模拟[J]. 物理学报, 2007, 56(11): 6334-6339.  
Shi Wei, Jia Wanli, Ji Weili, et al. Monte Carlo simulation of operating modes of semi-insulating GaAs photoconductive switches[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(11): 6334-6339.

(责任编辑 李虹燕)