

GaAs 光导开关锁定模式阈值条件

崔海娟 杨宏春 阮成礼 吴明和

(电子科技大学物理电子学院, 四川 成都 610054)

摘要 采用脉冲测试电路,测试了半绝缘 GaAs 光导开关(PCSS)在锁定工作模式下的偏置电场及触发光能阈值。测试结果表明,在一定光能范围内,电场阈值随光能阈值的增大类似于指数关系减小;激励光能在数 $10 \mu\text{J}$ 下,半绝缘光导开关偏置电场阈值为 9 kV/cm 。当激励光脉冲能量大于 0.78 mJ 时,光导开关在不同偏压下都不能工作于锁定工作模式而进入线性模式。依据实验测试结果,提出了高倍增偶极畴模型,给出了半绝缘 GaAs 光导开关的电场与光能阈值的计算结果,在实验误差范围内,理论分析与实验测试结果符合。

关键词 物理光学;阈值条件;高倍增偶极畴;锁定模式

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.0213004

Threshold Conditions of GaAs Photoconductive Semiconductor Switch Operated in Lock-on Mode

Cui Haijuan Yang Hongchun Ruan Chengli Wu Minghe

(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract As for semi-insulating GaAs photoconductive semiconductor switch (PCSS) operated in lock-on mode, threshold conditions of biased electric field and optical excitation energy are measured by a pulsed circuit. Experimental results show that the field threshold has an analogy to inverse exponential dependence on the optical energy threshold. PCSS can be triggered into lock-on mode with 9 kV/cm when the optical energy is on the order of $10 \mu\text{J}$; and with the optical energy above 0.78 mJ , PCSS will be operated in linear mode but not lock-on mode for different voltages. On basis of the results, high-gain dipole domain model is proposed to analyze electric field and optical energy thresholds of the PCSS. The results from the experiments and calculation are in good agreement within the measurement error.

Key words physical optics; threshold condition; high-gain dipole domain; lock-on mode

OCIS codes 130.4815; 250.6715; 260.5150; 270.6620; 320.5550

1 引 言

光导开关具有响应速度快、触发抖动小、功率容量大、同步精度高、耐压能力高、体积小、易集成、重量轻、良好的光电隔离和抗电磁干扰能力强等优点,使它在诸如新型高功率微波武器系统^[1]、微波功率系统^[2]、强电流系统^[3]、太赫兹技术^[4,5]、快速响应^[6]、超宽带冲击雷达^[7],以及任何需要光控制、高功率和快速响应的双态系统中有广泛的民用、军用与高科技应用前景。由于 GaAs 光导开关(PCSS)

锁定工作模式所需触发光能比其线性模式小 10^3 以上,使它可以激光二极管来触发^[6,8],系统可以进一步小型化。目前有一种观点认为非线性模式主要指锁定模式;另一种观点认为 GaAs 光导开关的非线性工作模式包括锁定与雪崩 2 种模式,但还未能得到公认。而关于 GaAs 光导开关锁定工作模式的物理机制研究,已存在多种理论模型^[9~15],其中包括与场相关的陷阱俘获模型^[13~14],深能级杂质碰撞电离模型^[15]等,但仍缺乏公认的统一解释。仔细研

收稿日期: 2010-07-19; 收到修改稿日期: 2010-08-24

基金项目: 国家自然科学基金(10804016)资助课题。

作者简介: 崔海娟(1979—),女,博士研究生,讲师,主要从事无线电物理方面的研究。E-mail: cuihaijuan@126.com

导师简介: 阮成礼(1944—),男,教授,博士生导师,主要从事超宽带电磁学方面的研究。E-mail: rcl@uestc.edu.cn

究 GaAs 光导开关由线性机制向锁定机制过渡的阈值条件问题,对分析 GaAs 光导开关非线性工作模式的物理机制至关重要。目前,文献研究 GaAs 光导开关的阈值条件多集中于偏置电场和激励光能的阈值下限^[16,17],而对它们阈值上限的文献报道还不多^[18,19]。

采用脉冲电路,对半绝缘 GaAs 光导开关进入锁定模式的偏置电场和触发光能阈值进行了实验测试。由测试结果可知,外加偏置电场阈值在一定的光能范围内,随光能阈值的增加类似于指数规律减小。当激励光能在 10 μJ 的数量级时,开关的偏置电场阈值大约是 9 kV/cm;而随着激励光能增加到 0.78 mJ 甚至更大,在所有的偏压下,光导开关都不能工作在锁定工作模式下。根据实验结果提出了 GaAs 光导开关锁定模式的高倍增偶极畴模型,对光导开关的电场阈值和光能阈值分别进行了定量计算,理论计算结果和实验测试结果保持一致。

2 实验测试

考虑到锁定模式下,光导开关输出电脉冲总是伴随着丝状电流^[11,20],直流偏压下光导开关长时间输出强电流的锁定脉冲,会数量级地降低光导开关的使用寿命。为此研制了小型化高压脉冲电源、光电同步控制仪和布卢姆莱茵(Blumlein)形成线等仪器,设计了如图 1 所示的实验测试电路。延时精度为 5 ns 的自制光电同步控制仪首先输出 5 V 的 TTL 电平信号触发小型化脉冲电源,并使脉冲电源给 Blumlein 形成线充电(充电时间 4 μs)。经 5~6 μs 后,同步控制仪输出 15 V 的 TTL 电平触发调 Q 激光器,激光器输出光脉冲半峰值时间宽度为 20 ns,激光波长为 1064 nm,激光单脉冲能量范围为 0~20 mJ 并可调,重复频率在 0~1 kHz 范围内可调。激光器输出光脉冲经光匀化器后变为空间均匀分布的光束,并耦合进入自制的集束光纤分束器,

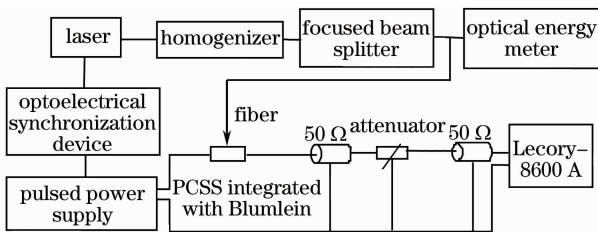


图 1 脉冲偏压下 GaAs 光导开关实验原理图

Fig. 1 Schematic of GaAs PCSS experiment biased with pulsed voltage

光纤芯径为 0.3 mm,光斑半峰值空间直径为 0.45 mm,光纤输出激光单脉冲能量在数十到数百微焦范围内可调。光纤分束器中的一路用来激励光导开关,另一路耦合进入光能计。光导开关导通后的输出电脉冲经同轴线、SMA 接头和宽带衰减器,最后输入至 Lecory-8600A 示波器中。

激光器采用手动触发,3 mm 缝宽的 GaAs 光导开关在偏置电压 5 kV 的条件下,当激励光能为 394.38 μJ 时,连续触发开关 20 次,开关每次触发都能导通;而如果将激励光能降至 56.12 μJ 时,只有一两次能够导通。这说明如果激励光能太低,光导开关不能出现锁定工作模式。由此可以推断,GaAs 光导开关进入锁定模式不仅与偏置电压有关,而且还应该与激励光能有关。将 2 mm 缝宽光导开关两端所加电压由 700 V 逐次升高到 2000V,在激光器采用手动触发,并且输出激光能量分别为 0.06,0.1,0.3,0.5,0.8 和 1.0 mJ 的条件下,得到的实验测试结果如图 2 和图 3 所示。

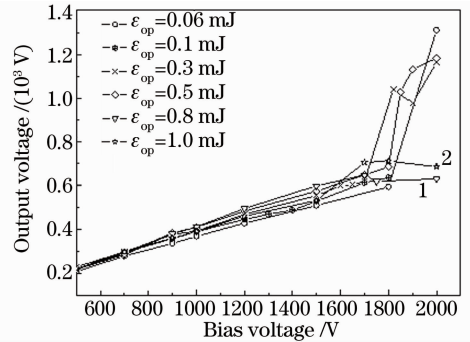


图 2 2 mm GaAs 光导开关光能阈值实验测试
Fig. 2 Measurement on optical energy threshold of 2 mm GaAs PCSS

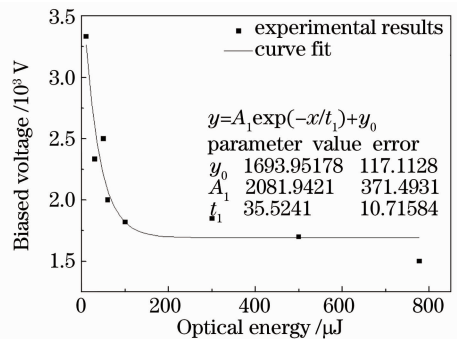


图 3 2 mm GaAs 光导开关锁定模式电压阈值和光能阈值曲线
Fig. 3 Curve of lock-on voltage and optical energy threshold on 2 mm GaAs PCSS

由实验测试结果可以看出:1)在数十微焦光能激励范围内,光导开关电场阈值约为 9 kV/cm,如

图 2 所示,当电场大于该阈值电场时,光导开关进入锁定模式,电压转换效率显著提高。这一测试结果与文献报道的阈值电场介于 $4\sim 12\text{ kV/cm}$ ^[18,19,21] 范围相符合。2) 阈值电场与最小触发光能之间类似于指数减小的变化关系(图 3), 阈值电场越大, 对应的触发光能越小; 触发光能越大, 对应的阈值电场越小; 3) 当触发光能大于 0.78 mJ 时, 无论多大的偏置电压, 都不能出现锁定现象。因此光导开关进入锁定工作模式, 不仅与偏置电场有关, 还与激励光能大小有关, 过低或过高的激励光能都不能使光导开关由线性进入到锁定工作模式。图 2 中曲线 1、曲线 2 分别表示光能为 0.8 mJ 和 1.0 mJ 时的输出、输入电压曲线, 电压转换效率没有明显变化, 曲线表明光导开关始终没有出现锁定效应, 而是进入线性模式。光导开关输出锁定电脉冲的时间延迟及触发抖动^[22] 与激励光能和偏置电场有关, 但更强烈依赖偏置电场的变化, 随偏置电场增加迅速减小; 光导开关输出锁定电脉冲的时间延迟和文献[9]测试结果一致。文献[18]表明当光能小于 1.4 mJ 时就会出现锁定现象, 而触发光能大于 1.4 mJ 时, 直接进入线性模式而不会出现锁定现象。

3 锁定模式高倍增偶极畴形成的阈值条件

如果 GaAs 光导开关的偏置电场大于等于 GaAs 材料的负微分电场阈值, (均匀或非均匀) 光激励所产生的光生载流子[图 4(a)], 在电场作用下会发生扩散和漂移。靠近开关阳极的电子, 由于具有较大迁移率(比空穴大 10^1 量级), 很快到达阳极并与阳极正电荷中和, 剩余空穴在其局部形成正电荷畴; 由于负微分效应, 正电荷畴的积聚会阻碍靠近阴极电子继续向阳极扩散或漂移, 于是在阴极附近会形成负电荷堆积。这样, 在偏置电场大于负微分阈值电场条件下, 由于光生载流子的漂移与扩散, 最终将在开关衬底 GaAs 内形成高倍增偶极畴[图 4(b)], 偶极畴内电场方向与外加电场一致。这

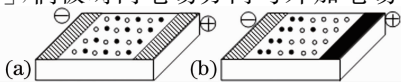


图 4 偶极畴形成机制(黑点表示电子, 空心圈表示空穴)。(a) 光激励产生载流子, (b) 载流子漂移成畴

Fig. 4 Physics of dipole domain (dot is electron, circle is hole). (a) light-induced carriers, (b) carriers drift to the formation of domain

就是光导开关的高倍增偶极畴模型。

3.1 电场阈值

3.1.1 高倍增偶极畴形成的电场阈值下限

由于 GaAs 材料的负微分效应造成了光导开关的锁定工作模式, 而热载流子的光学声子散射是载流子迁移率不断偏离线性规律的最根本原因。因此, 如果把载流子吸收或发射最高能量的光学波声子对应的能量看作为光导开关进入锁定模式的阈值条件, 则很容易根据实验测试数据计算得到 GaAs 光导开关是否进入锁定模式的电场阈值。

一方面当载流子从电场中获取的能量与光学声子散射下失去的能量达到平衡时, 应满足

$$Eq\lambda = h\nu_q, \quad (1)$$

式中 ν_q 表示光学波声子的极限频率。另一方面在临界弱场下, 如果近似认为在阈值条件附近载流子迁移率保持不变, 可得

$$\mu = \frac{4q\lambda}{3\sqrt{2\pi m_n^* k_0 T}}, \quad (2)$$

取常见 GaAs 材料的迁移率典型值范围为 $\mu = 0.5\sim 0.8\text{ m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 可得 λ 取值范围为 $\lambda = 0.944\times 10^{-7}\sim 1.51\times 10^{-7}\text{ m}$ 。可见, 在长声学波散射、弱场和非简并条件下, 电子平均自由程 λ 为 10^{-7} m 数量级。

取 $\nu = 8.7\times 10^{12}\text{ s}^{-1}$, $\mu = 0.5\text{ m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 由(1)式可得 GaAs 的弱场条件为

$$Eq\lambda \geq h\nu \Rightarrow E \geq 3.80\text{ kV/cm}, \quad (3)$$

即 GaAs 光导开关由线性模式进入到锁定模式的电场阈值条件为 3.80 kV/cm 。对于不同生长工艺的 GaAs 材料, 因为有不同的迁移率, 实验测试得到的锁定模式的电场阈值一般在 $4\sim 12\text{ kV/cm}$ 之间。

3.1.2 高倍增偶极畴形成的电场阈值上限

按 GaAs 光导开关形成畴所需满足的等面积定理, 如果 GaAs 光导开关形成畴所需偏置电场达到甚至要高于雪崩模式的偏置电场阈值下限, 就可以认为此时光导开关不能形成高倍增偶极畴而工作于雪崩模式, 这是论文给出 GaAs 光导开关锁定阈值电场上限的基本思路。GaAs 材料的雪崩击穿电场介于 $250\sim 300\text{ kV/cm}$ ^[23] 之间, 对于不同生长工艺的 GaAs 材料, 实验测试过程中的测试封装手段不同, 实际的击穿电场会有所区别, 在远小于 250 kV/cm 时就有可能击穿。

3.2 光能阈值

如何用最小的激励光能导通高功率光导开关, 并使之产生高功率电脉冲是光导开关研究的重要目

的之一。实验测试时,选用半径为 150 μm 的光纤,照射光导开关表面,光导开关的 GaAs 衬底基片厚度为 0.6 mm,激励高斯光脉冲波长为 1064 nm, GaAs 吸收系数实验测试值为 0.45 mm^{-1} 。然而,在对 2 mm 缝隙的光导开关进行实验的过程中,发现了 GaAs 光导开关不仅存在导通光能下限,还存在触发光能的上限阈值,当用 0.78 mJ 及以上的光脉冲激励光导开关时,观察不到锁定效应(图 2 中的曲线 1 和曲线 2)。

依据光吸收的朗伯定律

$$I(z) = I_0 \exp(-\alpha z), \quad (4)$$

式中 α 表示光吸收系数, I_0 表示 $z = 0$ 处的光强。如图 5 所示,在 $t \sim t + dt$, $z \sim z + dz$, 且光照面积为 ds 微元内,半导体基片吸收的光能为

$$d\epsilon_{\text{op}} = -\alpha I_0 \exp(-\alpha z) ds dz dt = -\alpha I(z) ds dz dt, \quad (5)$$

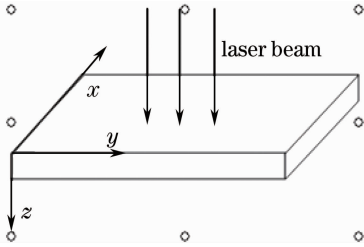


图 5 朗伯光吸收定律

Fig. 5 Lambert's law of light absorption

激励半导体材料的激光脉冲 $I(r, z, t)$ 为时间和空间上的高斯脉冲,

$$I(r, z, t) = I_0 \exp\left(-\frac{\ln 2}{r_{\text{op}}^2} r^2 - \frac{4 \ln 2}{T_{\text{op}}^2} t^2 - \alpha z\right), \quad (6)$$

式中 $r^2 = x^2 + y^2$, I_0 表示 $z = 0, r = 0, t = 0$ 时的光强, r_{op} 表示任意时刻高斯光斑半峰值空间半径, T_{op} 表示高斯光斑半峰值的时间宽度。

如果激励光脉冲经光匀化器后,在空间各 r 处形成均匀光斑。则

$$I(r, z, t) = I_0 \exp\left(-\frac{4 \ln 2}{T_{\text{op}}^2} t^2 - \alpha z\right), \quad (7)$$

激励光脉冲激励半导体衬底基片时产生的光生载流子浓度为

$$n(r, z, t) = \frac{d\epsilon_{\text{op}}}{h\nu ds dz} = \frac{-\alpha I(r, z, t) dt}{h\nu}, \quad (8)$$

式中 ν 为入射光频率, α 是吸收系数。对应的光导开关导通需要的光能为

$$\epsilon = \frac{\pi r^2 h\nu}{\alpha} n. \quad (9)$$

3.2.1 高倍增偶极畴形成的光能阈值下限

高倍增偶极畴的形成除了需满足电场阈值条件外,畴从生长到成熟也需要一定的空间和时间。如果畴的形成时间大于等于偶极畴漂移并渡越光导开关缝隙的时间,那么,高倍增的偶极畴将不能形成。于是

$$\tau_d = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{nq\mu} \ll \frac{l_1}{v_d} = \tau_0, \quad (10)$$

式中 τ_d 为介电驰豫时间, τ_0 为偶极畴渡越光导开关缝隙 l_1 的渡越时间, n 为光生电子浓度。另外,要求

$$nl_1 > 10^{12} \text{ cm}^{-2}, \quad (11)$$

联立(10)式和(11)式,代入(9)式计算得到的最小导通光能约为 33 nJ,文献[8]得到的最小导通光能为 90 nJ。实验测试过程中,获得稳定的偶极畴所需的触发光能值为 14 μJ 。产生这些现象的原因一方面是由于 GaAs 对 1064 nm 波长的激光吸收系数很小,透射系数较高;另一方面是由于选用的 GaAs 材料表面未抛光,表面复合速率较大,封装措施用绝缘硅胶进行封装,增加了激光脉冲的漫反射以及入射光脉冲的耗损。

3.2.2 高倍增偶极畴形成的光能阈值上限

根据偶极畴等面积定理

$$f(E_r, E_p) = \int_{E_r}^{E_p} [v(E) - v_r] dE = 0, \quad (12)$$

要形成偶极畴,要求图 6 中阴影部分的面积相等。式中 v_r 为畴外电子漂移速度,当外加偏置电场 E_h 增大时,畴内峰值电场 E_p 快速增大,畴外电场 E_r 减小,并不断前移逼近 $v-E$ 曲线上饱和速度 v_s 对应的电场值。图中左边的阴影面积增大,要求图中右边阴影面积随之增加。

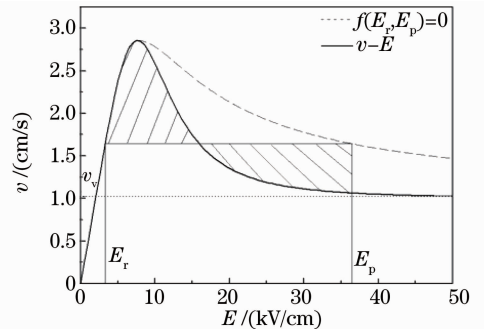


图 6 等面积定理

Fig. 6 Equal-area theorem

根据等面积定理得到的 $f(E_r, E_p) = 0$ 对应的 $E_p \sim E_r$ 关系曲线以及光导开关两端所加偏置电场 E_h 和畴外电场 E_r 的关系表达式

$$E_h = E_r + \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{2qnl_1} (E_p - E_r)^2, \quad (13)$$

得到图 7 的计算结果。图 7 表明使畴外电场 E_r 减小的因素不仅是外加偏置电场的增大,还有激励光能或光生载流子浓度 n 的增加。可以由此给出 GaAs 光导开关锁定工作模式激励光能的上限。对一定工艺研制的 GaAs 材料,具有确定的 $v-E$ 关系曲线,因而也可以确定饱和速度 v_s 对应的 E_r 数值。在图 6 给出的 $v-E$ 曲线中,饱和速度 $v_s = 1.0 \times 10^7$ cm/s,对应的 E_r 的极限值为 2 kV/cm。如果外加偏置电压使得畴外电场 $E_r \leq 2$ kV/cm 时,则高倍增偶极畴就不能形成。因此可以得到,当偏置电场大于偶极畴形成的电场阈值 9 kV/cm 时, E_r 的极限值为 2 kV/cm 时,对应的高倍增偶极畴触发光能上限对应的光生载流子浓度为 $n \leq 10^{19}$ cm⁻³,计算得到的最大导通光能为 0.66 mJ,实验测试结果为 0.78 mJ。而文献[19]在阈值电场为 5 kV/cm,触发光能增大到 280 μ J 的时候也观察不到锁定现象。

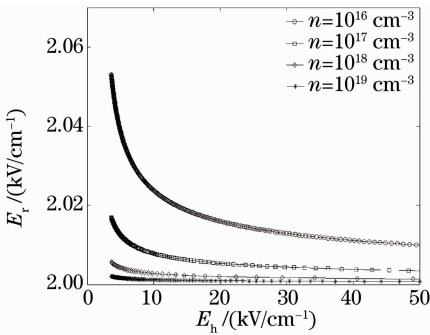


图 7 畴外电场和偏置电场关系曲线

Fig. 7 Dependence of electrical field outside the domain on the biased electrical field

4 结 论

GaAs 光导开关只有在满足一定的偏置电场阈值,触发光能阈值时,才会工作在锁定模式下。

实验测试得到电场阈值和激励光能阈值类似于指数反比规律,偏置电场阈值越大,对应的触发光能阈值越小;触发光能越小,对应的偏置电场越大。当激励光能在数十微焦时,开关的偏置电场阈值大约在 9 kV/cm;由于开关在电场过大时容易雪崩击穿而无法工作在锁定模式下,即存在一定的电场阈值上限。当触发光能超过一定的值,在所有偏压下,光导开关都无法工作在锁定模式,即锁定模式触发光能存在阈值下限和阈值上限。

参 考 文 献

- Rahul G., David S. G., Kapil K. *et al.*. Radio-frequency heating of GaAs and SiC photoconductive switch for high-power applications [J]. *IEEE T Plasma Sci.*, 2006, **34**(5): 1697~1701
- Kelkar K., Fessler C., Nunnally W. C. *et al.*. Experimental and simulation characterization of semi-insulating 6H SiC photoconductive switch for pulsed power applications[R]. 19th IEEE Pulsed Power Conf., 2005. 904~907
- Savage M. E.. Final results from the high-current, high-action closing switch test program at Sandia National Laboratories[J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2000, **28**(5): 1451~1455
- Li T. Y., Lou C. Y., Wang L. *et al.*. Terahertz wave generation with low-temperature-grown GaAs photoconductive antennas[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 978~982
李铁元, 娄采云, 王黎等. 低温生长砷化镓光电导天线产生太赫兹波[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 978~982
- Huang Z., Yu B., Zhao G. Z.. The THz emission properties of small-aperture photoconductive antenna[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 110~114
黄振, 于斌, 赵国忠. 小孔径光电导天线产生太赫兹波的辐射特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 110~114
- Holzaman J. F., Vermeulen F. E., Elezzabi A. Y.. Ultrafast photoconductive self-switching of subpicosecond electrical pulses [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2000, **32**(2): 130~136
- Zutarvern F. J., Louberiel G. M., Hjalmarson H. P. *et al.*. Properties of high gain GaAs switches for pulsed power applications [R]. 11th IEEE Pulsed Power Conf., 1997, **2**: 959~964
- Loubriel G. M., Zutarvern F. J., O'Malley M. W. *et al.*. High gain GaAs photoconductive semiconductor switches for impulse sources[C]. *SPIE*, 1994, **2343**: 180~186
- Shi Shunxiang, Wan Xianjun. Delay time of output pulse in nonlinear photoconductive semiconductor switches [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(3): 365~368
石顺祥, 万贤军. 非线性光导开关输出脉冲延迟时间的研究[J]. *光学学报*, 1998, **18**(3): 365~368
- Gong Renxi, Zhang Yimen, Shi Shunxiang *et al.*. Analysis of lock-on and time delay in high-voltage GaAs PCSS's[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(11): 1372~1376
龚仁喜, 张义门, 石顺祥等. 高压 GaAs 光导开关的锁定及延迟效应机理分析[J]. *光学学报*, 2001, **21**(11): 1372~1376
- Zhang Tongyi, Shi Shunxiang, Gong Renxi *et al.*. The rapid turn-on characteristics in nonlinear photoconductive semiconductor switches [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3): 327~331
张同意, 石顺祥, 龚仁喜等. 非线性光导开关快速导通特性[J]. *光学学报*, 2002, **22**(3): 327~331
- 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
- White W. T., Dease C. G., Pocha M. D. *et al.*. Analysis of performance of gallium arsenide photoavalanche switches [C]. Proc. 7th IEEE Pulsed Power Conference. San Diego, CA, 1989. 442~445
- White W. T., Dease C. G., Pocha M. D. *et al.*. Modeling GaAs high-power subnanosecond photoconductive switches in one spatial dimension [J]. *IEEE Trans. Electron. Devices*, 1990, **7**(12): 2532~2541
- Yee J. H., Khanaka G. H., Druce R. L. *et al.*. Modeling the effect of deep impurity ionization on GaAs photoconductive switches [C]. *Proc. SPIE Optically Activated Switching II*, 1992, **1632**: 21~28

- 16 Zhao Huijuan, Niu Hanben. The theoretical analysis of the lock-on effect in photoconductive semiconductor switches [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(1): 61~65
赵会娟, 牛憨笨. 光电开关锁定机理的理论分析[J]. *光子学报*, 1997, **26**(1): 61~65
- 17 Shi Wei, Zhao Wei, Zhang Xianbin. Investigation of high-power sub-nanosecond GaAs photoconductive switches [J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(4): 867~972
施 卫, 赵 卫, 张显斌 等. 高功率亚纳秒 GaAs 光电导开关的研究[J]. *物理学报*, 2002, **51**(4): 867~972
- 18 F. J. Zutavern, G. M. Loubriel, B. B. Mckenzie *et al.*. Photoconductive semiconductor switch (PCSS) recovery[R]. In proc. 7th IEEE Pulsed Power Conf., Monterey, CA, 1989. 412~417
- 19 Loubriel G. M., Zutavern F. J., Helgeson W. D. *et al.*. Physics and applications of the lock on effect[R]. 8th IEEE Pulsed Power Conf., Digest of Technical Papers, 1991. 33~36
- 20 Zutavern F. J., Loubriel G. M., O'Malley M. W. *et al.*. Characteristics of current filamentation in high gain photoconductive switching [R]. 20th IEEE Power Modulator Symp., Myrtle Beach, SC, 1992. 305~311
- 21 Zhao H., Hadizad P., Hur J. H. *et al.*. Avalanche injection model for the lock-on effect in III-V power photoconductive switches[J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, **73**(4): 1807~1812
- 22 Yang H. C., Cui H. J., Sun Y. Q. *et al.*. High power, longevity gallium arsenide photoconductive semiconductor switches [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, **55**(13): 1331~1337
- 23 Shi W., Tian L. Q., Wang X. M.. A high-voltage and high-current photoconductive semiconductor switch and its breakdown characteristics [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(2): 1219~1223
施 卫, 田立强, 王馨梅. 高压超大电流光电导开关及其击穿特性研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(2): 1219~1223