

文章编号: 0258-7025(2010)02-0394-04

# 高增益砷化镓光导开关中的特征量分析

刘 鸿<sup>1,2</sup> 阮成礼<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 电子科技大学物理电子学院, 四川 成都 610054; <sup>2</sup> 成都大学电子信息工程学院, 四川 成都 610106)

**摘要** 分析了高增益本征砷化镓光导开关(PCSS)中的几个重要参量,研究了光导开关的物理机制,发展了以畴电子崩(DEA)为基础的流注理论。提出了畴电子崩的 3 个必要条件:初始载流子密度  $n_{LD} \geq 3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,耗尽层的空穴密度和积累层的电子密度至少其中之一能够超过畴电子崩的阈值  $n_{cs}$ ,非平衡载流子密度区域沿电场方向的特征长度  $\Delta Z$  必须大于畴电子崩转变为局域流注时的生长畴宽度  $b$ 。揭示了流注的光致电离效应产生的局域平均载流子密度的上限大约为  $10^{17} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{ps}^{-1}$ ,能够为后代生长畴提供的初始载流子密度为  $3 \times 10^{15} \leq n(t=0) < 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ;流注的传播速度范围大约为  $2.97 \times 10^8 \leq v_{pro} \leq 6.21 \times 10^9 \text{ cm/s}$ 。理论分析结果与实验观察一致。

**关键词** 光电子学;参量值范围;仿真比较;光导开关

中图分类号 TN303 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103702.0394

## Analysis of Characteristic Quantities in High Gain GaAs Photoconductive Semiconductor Switches

Liu Hong<sup>1,2</sup> Ruan Chengli<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology,  
Chengdu, Sichuan 610054, China

<sup>2</sup> College of Electronic and Information Engineering, Chengdu University, Chengdu, Sichuan 610106, China

**Abstract** Several significant characteristic quantities as well as physical mechanism in high gain intrinsic GaAs photoconductive semiconductor switches (PCSS) are analyzed. The model of the streamer on the basis of domain electron avalanche (DEA) is developed. It is presented that the DEA requires three necessary conditions: the lower limit of initial carrier density  $n_{LD} \geq 3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , the local carrier density at least either in the depletion layer or in the accumulation layer of the DEA must exceed the threshold  $n_{cs}$ , the characteristic length  $\Delta Z$  of the activated region along the field must be larger slightly than the width  $b$  of the growing domain. The upper limit of the local carrier density created by photo-ionization from the streamer is approximately  $10^{17} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{ps}^{-1}$ , which implies that the carrier density provided for the successive growing domain is approximately  $3 \times 10^{15} \leq n(t=0) < 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Therefore the propagation velocity of streamer is approximately  $2.97 \times 10^8 \leq v_{pro} \leq 6.21 \times 10^9 \text{ cm/s}$ . The results of this theoretical analysis are consistent with the reported experimental observations.

**Key words** optoelectronics; range of the parametric variation; numerical simulation and comparison; photoconductive semiconductor switches

## 1 引 言

高增益砷化镓(GaAs)光导开关(PCSS)作为超快大功率电脉冲<sup>[1]</sup>产生器件、正在开发的太赫兹(THz)源<sup>[2~5]</sup>器件等,多年来受到了极大关注。光导开关的锁定(lock-on)效应的物理机制是长期以来研究的一个关键问题。实验研究已经指出:lock-on 是 GaAs

PCSS 的丝状电流放电<sup>[6]</sup>;在 lock-on 发生前,光导开关中的畴形结构与电流丝的形成有密切联系<sup>[7]</sup>;电流丝的传播速度能够达到  $2 \times 10^9 \text{ cm/s}$ <sup>[8,9]</sup>,电流丝在 1.5 ns 的最大轴向辐射能量为 75 nJ<sup>[10]</sup>;在高增益 GaAs PCSS 中,相对较低的电场( $E > 100 \text{ kV/cm}$ )雪崩导致流注形成<sup>[11~13]</sup>。理论研究一直努力对实验结

收稿日期: 2009-04-13; 收到修改稿日期: 2009-07-02

作者简介: 刘 鸿(1961—),男,副教授,博士研究生,主要从事无线电物理方面的研究。E-mail: liuhong\_68@126.com

导师简介: 阮成礼(1944—),男,博士,教授,主要从事无线电物理方面的研究。E-mail: rcl@uestc.edu.cn

果给出合理完善的解释。1996 年前提出了多个模型<sup>[14~17]</sup>,虽然都能解释光导开关不同侧面或不同阶段的实验现象或特征,然而没有进一步的发展报道。1996 年提出的两个模型<sup>[11,18]</sup>至今处于发展阶段<sup>[12,13~19]</sup>;集体碰撞电离理论基于直接的验证实验<sup>[11]</sup>,主要报道了高增益 PCSS 中光致电离产生的高密度( $\geq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )载流子依赖相对较低的电场雪崩导致流注形成<sup>[11~13]</sup>,但没有给出电流丝的传播速度的计算值;光激发电荷畴模型主要报道了光致电离和转移电子效应<sup>[18,19]</sup>。其他的计算机模型<sup>[20,21]</sup>对物理过程的理解是有限的。以畴电子崩(DEA)为基础的流注模型<sup>[22,23]</sup>统一处理了实验观察到的光致电离、畴形结构、流注形成和发展 3 个基本问题。

本文完善了畴电子崩概念,提出了合理确定高增益 GaAs PCSS 中每一级流注长度的近似方法,比较流注的光致电离效应的理论分析结果<sup>[23]</sup>和实验测量结果<sup>[10]</sup>,确定了流注的光致电离产生的局域初始载流子密度上限,从理论上导出了流注速度的可能范围。所得结果与国际上发表的实验数据符合很好,证明分析方法是合理的。

## 2 畴电子崩概念

在高增益 GaAs PCSS 中,激光束激活光导开关,在与阴极相接触的光斑处产生一个局域非平衡载流子密度区域。这个区域在照明期间保持高的光电导率,因此大量电子从阴极注入该区域。如果局域非平衡载流子密度  $n_{pe}$  与该区域的特征长度  $L_E$ <sup>[23]</sup> 的乘积大于  $10^{12} \text{ cm}^{-2}$  且局域电场在负微分迁移率范围[局域的 N 形电流-电压( $I$ - $V$ )特征曲线],则生长偶极畴能够形成。大量注入电子可能不均匀地分布在生长畴的积累层上,一旦积累层上某些部位的电子积累达到阈值  $n_{cs} = n_c = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ <sup>[12,13]</sup>,则在这些相应区域内,载流子集体雪崩生长发生在沿电场方向的整个畴宽范围,生长畴也被这些雪崩区域分隔成多个亚区。例如在生长畴内存在一个雪崩区域,则生长畴在垂直电场的方向上被分成 3 个亚区。在生长畴的雪崩区域内,产生的载流子密度一旦达到  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,则负微分电导率消失<sup>[24]</sup>,换句话说,雪崩击穿消除了该区域的初始空间电荷结构,导致 N 形  $I$ - $V$  特征曲线直接转变为 S 形  $I$ - $V$  特征曲线,流注能够形成<sup>[25]</sup>。从这个意义上讲,生长畴中由于强电场和高载流子密度导致的雪崩区域被称为“畴电子崩”(参考文献[22]中示意了一个这样的雪崩区域包括了生长畴前面的非平衡电子)。畴电子崩概

念能够解释实验已经观察到的流注使空间电荷结构“短路”的现象<sup>[7]</sup>。畴电子崩要求初始非平衡载流子密度的下限阈值  $n_{LD} \geq 3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  和被积累的局域载流子密度能够超过阈值  $n_{cs}$ (即要求畴电子崩区域内的耗尽层中的空穴密度和积累层中的电子密度两者之一、或者两者能够达到阈值  $n_{cs}$ ),第三个要求是光致电离产生的局域高载流子密度区域必须具有足够的空间允许生长畴在运动中积累载流子。在流注形成和传播过程中,畴电子崩需要的局域高密度载流子一般来自于电极注入或已经形成的流注注入,流注可以形象地看作是“延伸进入 PCSS 绝缘区内的电极”。例如在阴极开始形成的流注可以被看作是“延伸进入 PCSS 绝缘区内的阴极”,高密度电子来自于流注的顶部<sup>[22]</sup>。

## 3 畴区的宽度与每一级流注的长度

对于通常的耿氏(Gunn)效应样品,样品长度和加在样品上的电压必须用来确定畴的超额电势<sup>[26]</sup>。在高增益光导开关中,当激光束在一个小点照明光导开关时<sup>[8,9,27]</sup>,用激光照明的区域的特征长度  $L_E \approx 2r$ <sup>[23]</sup> 和在该区域上的电压  $V_{IL}$  确定畴的超额电势  $\Phi_D$ 。设超额电势  $\Phi_D$  与触发区域上的电压  $V_{IL}$  的比值为  $\beta_1$ ,电子的漂移速度是高场饱和漂移速度  $v_d$  的  $\beta_2$  倍;综合分析实验研究<sup>[28]</sup> 和理论研究<sup>[26,29]</sup> 的结果,可以近似确定  $\beta_1$  和  $\beta_2$  的取值范围。设光导开关两端的电压为  $V_0$ ,平均电场  $E_0 = V_0/L = V_{IL}/L_E$ ,得

$$\Phi_D = \beta_1 V_{IL} = \beta_1 E_0 L_E \quad (0 \leq \beta_1 < 1), \quad (1)$$

$$|\mu| E_0 = \beta_2 v_d \quad (1 \leq \beta_2 \leq 2.2). \quad (2)$$

将(1),(2)式代入稳态畴和生长畴的宽度公式<sup>[22]</sup>,得

$$b_s \approx \left[ \frac{2\epsilon v_d \beta_1 \beta_2 L_E}{en(t=0)|\mu|} \right]^{1/2}, \quad (3)$$

$$b \approx \left[ \frac{2\epsilon v_d \beta_1 \beta_2 L_E}{en(t=0)|\mu|} \right]^{1/2} \times \left[ 1 - \frac{n(t=0)}{n_{cs}} \right], \quad (4)$$

式中  $b_s$  是稳态畴宽度, $\epsilon$  是砷化镓的电容率, $e$  是电子的电荷量, $\mu$  是负微分迁移率, $b$  是生长畴的畴区宽度。(4)式被用于近似确定后代生长畴的畴区宽度,成立的条件是  $3 \times 10^{15} \leq n(t=0) \leq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  和畴区内雪崩发生以前。设  $\epsilon = 12.5 \epsilon_0$ ,  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ,  $v_d \approx 10^7 \text{ cm/s}$ ,  $\mu = -2000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\beta_1 = 1/3$ ,  $\beta_2 = 2$ ,  $L_E \approx 2r = 1 \text{ mm}$ <sup>[27]</sup>,  $n_{cs} = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,由(3),(4)式计算畴宽的结果见图 1。图 1 表明:1)稳态畴宽度  $b_s$  随初始载流子密度  $n(t=0)$  的增加而减小,从大约  $12.4 \mu\text{m}$  减小到  $2.15 \mu\text{m}$ ;与其他的分析畴宽的理论结果<sup>[26,29]</sup> 符合很

好,意味着在高增益 PCSS 中这种分析畴宽的方法是合理的;2)生长畴的畴区宽度  $b$  相应从大约  $12 \mu\text{m}$  减少到近于零(即转变为每级流注时的近似长度),小于稳态畴的宽度。如果畴区以电子的饱和漂移速度  $v_d \approx 10^7 \text{ cm/s}$  运动,则生长畴移动很小距离( $<1 \mu\text{m}$ )畴电子崩就能转变为流注,亦即流注的光致电离产生的非平衡载流子密度区域沿电场方向的特征长度  $\Delta Z$ <sup>[22,23]</sup> 只要稍微大于生长畴宽度  $b$ ,后代畴电子崩就有足够的空间条件转变为流注。

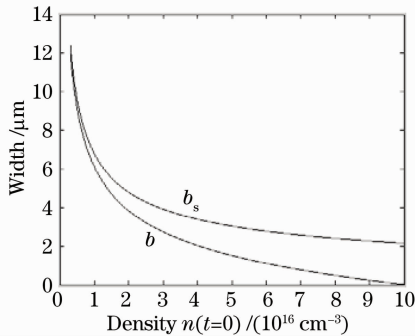


图1 稳态畴宽度  $b_s$  和生长畴的畴区宽度  $b$  随平均载流子密度  $n(t=0)$  的变化

Fig. 1 Widths of a steady state domain and a growing domain decrease with the increase of average carrier density  $n(t=0)$

## 4 流注的光致电离效应

根据电流丝辐射能量的实验测量结果<sup>[10]</sup>:在间隙长度为  $2.5 \text{ mm}$  的光导开关的一端测得在  $1.5 \text{ ns}$  内流注的最大轴向辐射能量为  $75 \text{ nJ}$ (辐射波长为  $890 \text{ nm}$ ),电流丝宽度  $2r_0 = 40 \mu\text{m}$ (设电流丝为圆柱体)。在考虑电场引起光吸收增加的弗朗兹-克尔德什(Franz-Keldysh)效应情况下,取吸收系数  $\alpha_{\text{ph}}$  在  $2 \times 10^2 \leq \alpha_{\text{ph}} \leq 8 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$  范围内,可以近似计算出  $1 \text{ ps}$  在流注顶部前面相应于吸收长度  $\Delta Z = 1/\alpha_{\text{ph}}$  的典型区域  $\Delta V$  内<sup>[22,23]</sup>,流注的光致电离产生的最大平均载流子密度  $n_{\text{max}}(t=0) \leq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。即使  $n(t=0)$  能够超过  $10^{17} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{ps}^{-1}$ ,由于大量载流子以饱和和漂移速度  $v_d$  运动,高密度载流子集体雪崩生长导致的流注传播速度远远小于流注速度的测量值<sup>[8,9]</sup>。流注的光致电离产生的局域非平衡载流子密度  $n(t=0)$  容易满足畴电子崩需要的初始载流子密度条件和局域空间条件。理论分析结果<sup>[23]</sup>表明,流注长度  $d = 2.5 \text{ mm}$  时,光致电离产生的平均载流子密度  $n(t=0)$  已经趋于饱和值。因此实验<sup>[10]</sup>和理论<sup>[23]</sup>一致,表明电流丝的光致电离能够为后代生长

畴提供的非平衡初始载流子密度的最大值约为  $10^{17} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{ps}^{-1}$ 。

## 5 流注的传播速度

在偏置电场大于 lock-on 的阈值时,局域微扰载流子密度在  $3 \times 10^{15} \leq n(t=0) < 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  范围内,可以导出流注的传播速度  $v_{\text{pro}}$  为<sup>[22]</sup>

$$v_{\text{pro}} \approx \frac{b}{t_G} = \frac{n_{\text{cs}} - n(t=0)}{n_{\text{cs}} \times \ln[(n_{\text{cs}})/n(t=0)]} \times \left[ \frac{2e\beta_1\beta_2 |\mu| v_d L_E n(t=0)}{\epsilon} \right]^{1/2}, \quad (5)$$

式中  $t_G$  是畴电子崩生长时间。将前面所取的各个参量值代入(5)式,计算流注的传播速度的结果如图 2 所示。由图 2 可知,流注的速度范围大约为  $2.97 \times 10^8 \leq v_{\text{pro}} \leq 6.21 \times 10^9 \text{ cm/s}$ 。实验测量的流注速度<sup>[8,9]</sup>分别为:在平均电场约为  $66.7 \text{ kV/cm}$  时,测得一个速度值为  $(2 \pm 1) \times 10^9 \text{ cm/s}$ ;在平均电场约为  $70 \text{ kV/cm}$  时,测得的速度范围为  $0.7 \times 10^9 \sim (5.5 \pm 1) \times 10^9 \text{ cm/s}$ ;在平均电场约为  $76.7 \text{ kV/cm}$  时,测得的最高速度为  $(5.9 \pm 1) \times 10^9 \text{ cm/s}$ 。计算值与实验值比较,符合很好。当其他因素保持不变时,由流注的光致电离产生的平均载流子密度  $n(t=0)$  随流注长度  $d$  的伸长而增加,将趋于某个饱和值的规律推知,一定初始长度的流注的传播速度初始增加很快,随后流注的传播速度将趋于一个近似的常数高值<sup>[23]</sup>。如果(5)式中的参量在合理范围内取不同的值,计算的流注速度的数量级范围不变。流注的光致电离产生的载流子密度是限制流注速度的主要因素之一。

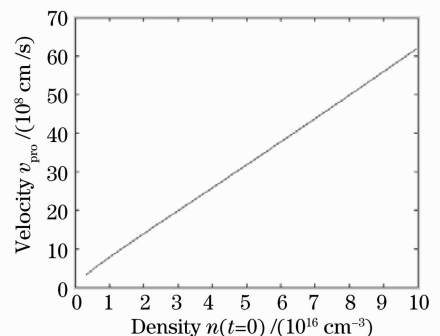


图2 流注的速度随平均载流子密度  $n(t=0)$  的变化  
Fig. 2 Streamer velocity  $v_{\text{pro}}$  versus the average carrier density  $n(t=0)$

## 6 结 论

完善了畴电子崩概念,阐明了畴电子崩需要的 3 个条件,光致电离产生了满足生长畴形成的初始

载流子密度条件  $n_{LD}$  和生长空间条件  $\Delta Z > b$ , 不均匀的载流子注入导致畴电子崩形成。确定了每一级流注形成的近似长度, 揭示了流注的光致电离产生的最大平均载流子密度, 计算了流注的传播速度的范围。理论结果与实验测量相吻合。

### 参 考 文 献

- Ruan Chengli, Wan Changhua. Waveform conditions of the electromagnetic missile[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 1990, **36**(10): 738~741
- 阮成礼, 万长华. 电磁导弹的波形条件[J]. *科学通报*, 1990, **36**(10): 738~741
- Zhong Li, Wang Jun, Feng Xiaoming *et al.*. 808 nm high-power lasers with Al-free active region with asymmetric waveguide structure [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1037~1042
- 仲 莉, 王 俊, 冯小明等. 808 nm 大功率无铝有源区非对称波导结构激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1037~1042
- 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
- Zhang Tongyi, Zhao Wei, Fan Wenhui. Optical absorption spectra and motion of polarization wavepacket in semiconductor superlattices driven by terahertz fields[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s1): 125~129
- 张同意, 赵 卫, 范文慧. 太赫兹场驱动半导体超晶格的光吸收谱与极化波包运动[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s1): 125~129
- Li Tiejuan, Lou Caiyun, Wang Li *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
- F. J. Zutavern, G. M. Loubriel, M. W. O'Malley *et al.*. High gain photoconductive semiconductor switching [C]. Proc. 8th IEEE Pulsed Power Conference, San Diego, 1991. 23~28
- K. H. Schoenbach, J. S. Kenney, F. E. Peterkin *et al.*. Temporal development of electric field structures in photoconductive GaAs switches[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(15): 2100~2102
- G. M. Loubriel, F. J. Zutavern, H. P. Hjalmarson *et al.*. Measurement of the velocity of current filaments in optically triggered, high gain GaAs switches[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(24): 3323~3325
- G. M. Loubriel, F. J. Zutavern, M. W. O'Malley *et al.*. High gain GaAs switches for impulse sources; measurement of the speed of current filaments[C]. Power Modulator Symposium, IEEE Conference Record of the 1994 Twenty-First International, Costa Mesa, CA, 1994. 120~123
- F. J. Zutavern, A. G. Baca, W. W. Chow *et al.*. Semiconductor lasers from photoconductive switch filaments[J]. *Pulsed Power Plasma Science, IEEE*, 2001, **1**: 170~173
- H. P. Hjalmarson, F. J. Zutavern, G. M. Loubriel *et al.*. An impact ionization model for optically-triggered current filaments in GaAs[R]. SNL Report, SAND 96-3972, Albuquerque, NM, 1996
- H. P. Hjalmarson, K. Kambour, C. W. Myles *et al.*. Continuum models for electrical breakdown in photoconductive semiconductor switches [C]. Proc. 16th International IEEE Pulsed Power Conference, Albuquerque, NM, 2007. **1**: 446~450
- K. Kambour, H. P. Hjalmarson, F. J. Zutavern *et al.*. Simulation of current filaments in photoconductive semiconductor switches[C]. IEEE Pulsed Power Conference, Monterey, CA, 2005. 814~817
- R. P. Brinkmann, K. H. Schoenbach, D. C. Stoudt *et al.*. The lock-on effect in electron-beam-controlled gallium arsenide switches[J]. *IEEE T. Electron Dev.*, 1991, **38**(4): 701~705
- H. Zhao, P. Hadizad, J. H. Hur *et al.*. Avalanche injection model for the lock-on effect in high power photoconductive switches[J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, **73**(4): 1807~1812
- L. Partain, D. Day, R. Powell. Metastable impact ionization of traps model for lock-on in GaAs photoconductive switches[J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, **74**(1): 335~340
- C. D. Capps, R. A. Falk, J. C. Adams. Time-dependent model of an optically triggered GaAs switch[J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, **74**(11): 6645~6654
- Liang Zhenxian, Shi Wei, Feng Jun *et al.*. Optically activated charge domain model for high-gain GaAs photoconductive switches [C]. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE, 1996, **2**: 726~729
- Shi Wei, Tian Liqiang, Wang Xinmei *et al.*. 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, 王馨梅等. 高压超大电流光导开关及其击穿特性研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(2): 1219~1223
- P. J. Stout, M. J. Kushner. Modeling of high power semiconductor switches operated in the nonlinear mode[J]. *J. Appl. Phys.*, 1996, **79**(4): 2084~2090
- N. E. Islam, E. Schamiloglu, C. B. Fleddermann. Characterization of a semi-insulating GaAs photoconductive semiconductor switch for ultrawide band high power microwave applications[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **73**(14): 1988~1990
- Liu Hong, Ruan Chengli. The streamer model in intrinsic gallium arsenide photoconductive semiconductor switches[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2008, **53**(18): 2181~2185
- 刘 鸿, 阮成礼. 本征砷化镓光导开关中的流注模型[J]. *科学通报*, 2008, **53**(18): 2181~2185
- 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
- H. W. Thim. Linear microwave amplification with Gunn oscillators[J]. *IEEE Trans. Electron Dev.*, 1967, **14**(9): 517~522
- B. K. Ridley. Specific negative resistance in solids[J]. *P. Phys. Soc. (London)*, 1963, **82**(6): 954~966
- J. A. Copeland. Stable space-charge layers in two-valley semiconductors[J]. *J. Appl. Phys.*, 1966, **37**(9): 3602~3609
- F. J. Zutavern, G. M. Loubriel, M. W. O'Malley *et al.*. Characteristics of current filamentation in high gain photoconductive semiconductor switching [C]. IEEE Power Modulator Symposium, 1992. 305~311
- I. Kuru, P. N. Robson, G. S. Kino. Some measurements of the steady-state and transient characteristics of high-field dipole domains in GaAs[J]. *IEEE Trans. Electron Dev.*, 1968, **15**(1): 21~29
- R. B. Robrock. A lumped model for characterizing single and multiple domain propagation in bulk GaAs[J]. *IEEE Trans. Electron Dev.*, 1970, **17**(2): 93~102