

# 砷化镓光导开关中电流丝的自发辐射能量分析

刘 鸿<sup>1</sup> 郑 理<sup>2</sup> 杨洪军<sup>1</sup> 杨 维<sup>1</sup> 郑勇林<sup>1</sup> 朱晓玲<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 成都学院(成都大学)电子信息工程学院, 四川 成都 610106)

<sup>2</sup> 成都工业学院机电工程系, 四川 成都 611730

**摘要** 研究了高增益砷化镓光导开关中电流丝的自发辐射能量。从砷化镓光导开关中电流丝的非平衡载流子复合出发, 导出了电流丝的自发辐射能量公式, 建立了电流丝自发辐射的理论模型。在电流丝达到稳定状态条件下, 计算了电流丝一端的辐射波长为 875 nm 和四个峰值波长的自发辐射能量, 其中峰值波长 890 nm 的最大光输出能量与实验观察结果吻合, 合理解释了电流丝的自发辐射现象, 对应用这个模型计算其他辐射波长的光输出能量给予了支持, 为进一步深入定量分析电流丝辐射的光致电离效应奠定了基础。

**关键词** 光电子学; 砷化镓光导开关; 电流丝; 自发辐射

中图分类号 TN303

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP50.092303

## Analysis on the Spontaneous Radiation Energy of Current Filament in GaAs Photoconductive Semiconductor Switch

Liu Hong<sup>1</sup> Zheng Li<sup>2</sup> Yang Hongjun<sup>1</sup> Yang Wei<sup>1</sup> Zheng Yonglin<sup>1</sup> Zhu Xiaoling<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Electronic Information Engineering, Chengdu University, Chengdu, Sichuan 610106, China

<sup>2</sup> Department of Mechatronic Engineering, Chengdu Technological University,

Chengdu, Sichuan 611730, China

**Abstract** The spontaneous radiation energy of current filament in high gain GaAs photoconductive semiconductor switch (PCSS) is researched. Based on the recombination of non-equilibrium carrier of current filament in GaAs PCSS, the formula of the spontaneous radiation energy of current filament is exactly derived. The theoretical model of the spontaneous radiation of the current filaments in GaAs PCSS is established. Under the condition that the current filament reaches a steady state, the spontaneous radiation energies from the 875 nm radiation and the radiation of four peak wavelengths at one end of current filament are calculated. The maximum optical output energy from the 890 nm radiation is consistent with experimental observations, explaining reasonably the spontaneous radiation phenomena of current filament and lending support for the model's predictions about the spontaneous radiation energies from the other wavelengths radiation. This lays the foundation for further quantificational analysis on photoionization effect of current filament.

**Key words** optoelectronics; GaAs photoconductive semiconductor switch; current filament; spontaneous radiation

**OCIS codes** 230.0250; 230.2090; 250.5960

## 1 引言

高增益砷化镓(GaAs)光导开关(PCSS)较之线性 GaAs PCSS 具有所需触发激光能量较小的优势<sup>[1-3]</sup>。高增益 GaAs PCSS 的锁定效应与电流丝密切相关<sup>[1-5]</sup>, 电流丝中非平衡载流子复合的自发辐射和 PCSS 中局域雪崩载流子产生是电流丝快速形成的两个主要机制<sup>[2-6]</sup>。定量研究高增益 GaAs PCSS 中电流丝的自发辐射能量, 对于进一步分析高增益 GaAs PCSS 的物理机理和器件应用具有重要意义<sup>[2,6-19]</sup>。本文依据半导体物理方法, 从半导体中非平衡载流子复合开始, 严格推导了高增益 GaAs PCSS 中电流丝的自发辐射能量公式, 在辐射波长范围内建立了电流丝的光输出能量随电流丝电流(简称丝电流)线性变化的模型, 计算了

收稿日期: 2013-04-10; 收到修改稿日期: 2013-07-08; 网络出版日期: 2013-08-20

基金项目: 四川省应用基础研究计划(2010JY0160)、成都工业院校基金(KY1211002A)

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

几个特殊波长的辐射能量,其中 890 nm 辐射的光输出能量的理论值斜率相对于实验值斜率的误差约为 1%,理论与实验十分吻合,解释了高增益 GaAs PCSS 中电流丝的自发辐射现象,证明了使用这个模型计算其他辐射波长的光输出能量的合理性。

## 2 自发辐射能量公式

设高增益 GaAs PCSS 中电流丝是圆柱形,电流丝内为电中性的高密度电子-空穴等离子体<sup>[2-3]</sup>。由于 GaAs 是直接带隙半导体,直接复合起主导作用,因此,辐射复合可以接近 100%。考虑在某一瞬时,电流丝的形状和大小不变,半径为  $r_0$ ,长度为  $d$ ,电流丝内平均载流子密度为  $n$ ,电流丝的体积为  $V_T = \pi r_0^2 d$ ,载流子的有效寿命为  $\tau_h$ ,单位时间电流丝内产生的总光子数为  $N_{ph}$ ,则总光子数可以近似表示为<sup>[7,12,20-21]</sup>

$$N_{ph} = \frac{n}{\tau_h} \times V_T. \quad (1)$$

这个近似可能导致理论计算值略大于实验测量值。设辐射波长分布在  $\lambda$  附近单位波长间隔内的辐射复合系数为  $\eta(\lambda)$ <sup>[10]</sup>,单位时间电流丝内产生的波长分布在  $\lambda$  附近单位波长间隔内的光子数为  $N_{ph}(\lambda)$ ,则

$$N_{ph}(\lambda) = \eta(\lambda) \times \frac{n}{\tau_h} \times V_T. \quad (2)$$

考虑电流丝内平均载流子密度的增量为  $dn$ ,单位时间电流丝内产生的波长为  $\lambda$  的光子数增量为  $dN_{ph}(\lambda)$ ,则

$$dN_{ph}(\lambda) = \eta(\lambda) \times \frac{dn}{\tau_h} \times V_T. \quad (3)$$

设半绝缘砷化镓材料的反射率为  $R$ ,电流丝的表面积为  $S_T$ ,辐射面积为  $S_{emi}$ (显然  $0 \leq S_{emi} \leq S_T$ ),电子-空穴对复合的自发辐射向各个方向是等概率的<sup>[2]</sup>,单位时间通过面积  $S_{emi}$  辐射出电流丝的波长为  $\lambda$  的光子数增量为  $dN_{phemi}(\lambda)$ ,则

$$dN_{phemi}(\lambda) = (1 - R) \times dN_{ph}(\lambda) \times \frac{S_{emi}}{S_T}. \quad (4)$$

将(3)式代入(4)式得

$$dN_{phemi}(\lambda) = (1 - R) \times \frac{\eta(\lambda)}{\tau_h} \times S_{emi} \times \frac{V_T}{S_T} \times dn. \quad (5)$$

设单位时间通过面积  $S_{emi}$  辐射出电流丝的波长为  $\lambda$  的自发辐射能量的增量为  $dP(\lambda)$ ,则

$$dP(\lambda) = dN_{phemi}(\lambda) h\nu = dN_{phemi}(\lambda) \frac{hc}{\lambda}, \quad (6)$$

式中  $h$  为普朗克常数, $\nu$  为波长为  $\lambda$  的光子的频率, $c$  为光速。将(5)式代入(6)式,整理得电流丝单位时间的辐射能量增量随电流丝中平均载流子密度增量变化的微分公式为

$$dP(\lambda) = (1 - R) \times \frac{\eta(\lambda)}{\tau_h} \times \frac{hc}{\lambda} \times S_{emi} \times \frac{V_T}{S_T} \times dn. \quad (7)$$

为了与实验数据<sup>[6]</sup>比较,从而验证(7)式的合理性,考虑高增益 GaAs PCSS 中的电流丝已经贯穿半绝缘 GaAs 间隙连接了两个电极触点,且达到稳定状态时的自发辐射能量。设电流丝的横截面积为  $S_{trans}$ ,丝电流为  $I = enuS_{trans}$ ,则丝电流增量为  $dI = euS_{trans} dn$ ,其中  $e$  为电子的电量, $u$  为载流子速度,代入(7)式,则电流丝单位时间的辐射能量增量随丝电流增量变化的微分公式为

$$dP(\lambda) \approx (1 - R) \times \frac{\eta(\lambda)}{\tau_h} \times \frac{hc}{\lambda} \times \frac{S_{emi}}{euS_{trans}} \times \frac{V_T}{S_T} \times dI. \quad (8)$$

注意(7)式和(8)式中电流丝的辐射面积  $S_{emi}$  是任意的。设当仅丝电流  $I$  变化时,电流丝发射激光的电流阈值为  $I_{th}$ ,单位时间波长为  $\lambda$  的辐射能量为  $P_{th}(\lambda)$ ,则单位时间电流丝的辐射能量随丝电流变化的积分公式为

$$\int_{P_{th}(\lambda)}^{P(\lambda)} dP(\lambda) = \int_{I_{th}}^I (1 - R) \times \frac{\eta(\lambda)}{\tau_h} \times \frac{hc}{\lambda eu} \times \frac{S_{emi}}{S_{trans}} \times \frac{V_T}{S_T} \times dI. \quad (9)$$

(9)式两端积分后整理得

$$P(\lambda) = \frac{(1-R)}{\tau_h} \times \eta(\lambda) \times \frac{hc}{\lambda eu} \times \frac{S_{emi}}{S_{trans}} \times \frac{V_T}{S_T} \times (I - I_{th}) + P_{th}(\lambda). \quad (10)$$

(10)式表明:单位时间电流丝的辐射能量与半绝缘砷化镓材料的反射率 $R$ 、载流子的有效寿命 $\tau_h$ 、辐射波长 $\lambda$ 及其辐射复合系数 $\eta(\lambda)$ 、载流子速度 $u$ 、电流丝的体积面积之比 $V_T/S_T$ 、辐射面积 $S_{emi}$ 和丝电流 $I$ 等参量密切相关。当仅丝电流变化时,电流丝在单位时间内的自发辐射能量与激光电流阈值以上的丝电流成正比。

设电流丝一端(即顶部)的面积为 $S_{tip}$ ,注意到圆柱形电流丝有 $S_{tip} = S_{trans}$ ,辐射面积 $S_{emi} = S_{tip}$ ,通常 $P_{th}(\lambda) = 0$ ,则(10)式表示的电流丝在单位时间内辐射的光能量简化为

$$P(\lambda) = \frac{(1-R)}{\tau_h} \times \eta(\lambda) \times \frac{hc}{\lambda eu} \times \frac{V_T}{S_T} \times (I - I_{th}). \quad (11)$$

依据(11)式计算单位时间电流丝一端的光输出能量,与实验观察结果比较。文献[6]报道,测量的890 nm辐射的光输出能量随丝电流增加呈线性变化趋势,如图1中连接各点的虚线所示。取相关的实验数据<sup>[6]</sup>:电流丝横切面的半径 $r_0 \approx b/2 = 20 \mu\text{m}$  ( $b = 40 \mu\text{m}$ 是电流丝的宽度),长度 $d = 0.5 \text{ mm}$ , $R = 0.3$ , $I_{th} = 5 \text{ A}$ , $P_{th}(\lambda) = 0$ ,丝电流 $I$ 取值范围为 $5 \sim 95 \text{ A}$ ,则 $V_T = 628000 \mu\text{m}^3$ , $S_T = 65312 \mu\text{m}^2$ ;其他各参数分别取值为: $\tau_h = 100 \text{ ps}^{[21]}$ , $h = 6.625 \times 10^{-34} \text{ (J} \cdot \text{s)}$ , $c = 3 \times 10^8 \text{ (m} \cdot \text{s)}^{-1}$ , $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ , $\eta(890) = 0.1182^{[10]}$ , $u = u_d = 10^7 \text{ cm/s}$  ( $u_d$ 为GaAs中电子的高场饱和漂移速度)。计算结果如图1中最上面一条实线所示,为了能够分辨清楚,在图中给出了显示丝电流在 $18 \sim 18.5 \text{ A}$ 范围内变化的光输出能量的插图。

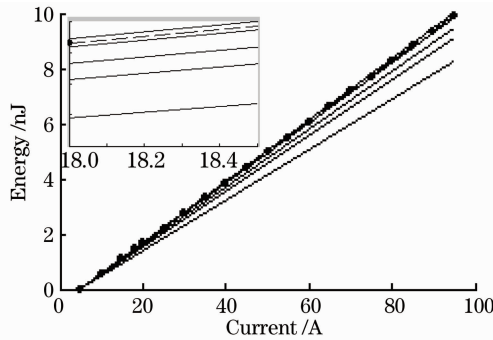


图1 电流丝一端1 ns的光输出能量随丝电流的变化关系。插图显示丝电流在 $18 \sim 18.5 \text{ A}$ 范围内的光输出能量

Fig. 1 Optical output energy in 1 ns versus filament current at one end of the filament. The inset shows the optical output energy when the range of filament current is form 18 A to 18.5 A

(11)式表明 $\tau_h$ 、 $\eta(\lambda)$ 、 $u$ 和 $r_0$ 等多个参量都可能引起电流丝一端辐射能量的计算值与实验观察值之间的差异,例如GaAs材料中非平衡载流子的有效寿命为 $51 \sim 300 \text{ ps}^{[22-24]}$ 。这里在公式推导时忽略了非辐射复合时间,即用稍小的辐射复合寿命代替了稍大的包括了非辐射复合的平均复合时间,这将导致理论结果略大于实验结果。实验数据和理论分析表明:仅丝电流变化时,电流丝一端的自发辐射能量随丝电流变化呈线性关系。因此,这里分析波长890 nm辐射能量的理论斜率相对于实验测量斜率的偏离程度,可以计算理论斜率比实验测量斜率大0.00112,两个斜率的相对差异约为1.02%。可见理论与实验能够很好符合,与文献[10]中的相关结果一致。这个分析结果激励了我们应用这个理论模型计算其他辐射波长的光输出能量。

高增益砷化镓光导开关中电流丝一端的自发辐射光谱显示<sup>[6]</sup>:室温下电流丝的发光强度有四个相对峰值,除了最大发光强度峰值的波长约为890 nm外,其余三个较小的发光强度峰值的波长分别约为885 nm、881 nm和876 nm,相应的辐射复合系数为 $\eta(885) \approx 0.1154$ 、 $\eta(881) \approx 0.1106$ 和 $\eta(876) \approx 0.1058^{[10]}$ ;另外由 $\lambda = 875 \text{ nm}$ 的发光强度近似为 $I(875) = 1.08 \times 10^4 \text{ (a. u.)}^{[6]}$ ,依据文献[10]可以计算出 $\eta(875) \approx 0.0958$ 。将上述四组数据分别代入(11)式替换 $\lambda = 890 \text{ nm}$ 和 $\eta(890) = 0.1182$ ,计算结果如图1中下面四条实线所示,其中885 nm辐射的图线从下方靠近表示实验结果的虚线。对于同一电流,四条曲线从上往下依次表示波长885,881,876 nm和875 nm的辐射能量。这些计算结果有待于进一步的实验验证。

### 3 结 论

依据半导体物理方法,严格推导了高增益 GaAs PCSS 中电流丝的自发辐射能量的普遍公式,结合电流丝的辐射复合系数<sup>[10]</sup>,可以计算辐射波长范围内电流丝的不同波长的自发辐射能量。计算了电流丝一端的几个特殊波长的辐射能量,其中辐射波长 890 nm 的光输出能量的理论斜率与实验测量斜率相对差异约为 1%,表明理论与实验十分吻合,解释了高增益 GaAs PCSS 中电流丝的自发辐射现象,直接为进一步深入定量分析电流丝辐射的光致电离效应奠定了基础。

### 参 考 文 献

- 1 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.
- 2 G M Loubriel, F J Zutavern, H P Hjalmanson, *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.
- 3 F J Zutavern, G M Loubriel, M W O'Malley, *et al.*. Characteristics of current filamentation in high gain photoconductive semiconductor switching[C]. Twentieth IEEE Power Modulator Symposium, 1992. 305–311.
- 4 F J Zutavern, G M Loubriel, M W O'Malley, *et al.*. High gain photoconductive semiconductor switching[C]. Proc 8th IEEE International Pulsed Power Conference, 1991. 23–28.
- 5 R A Falk, J C Adams, G Bohnhoff-Hlavacck. Optical probe techniques for avalanching photoconductors[C]. Proc 8th IEEE International Pulsed Power Conference, 1991. 29–32.
- 6 F J Zutavern, A G Baca, W W Chow, *et al.*. Semiconductor lasers from photoconductive switch filaments[C]. IEEE Pulsed Power Plasma Science Conf, 2001, 1: 170–173.
- 7 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.
- 8 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.
- 9 Liu Hong, Ruan Chengli. Analysis of characteristic quantities in high gain GaAs photoconductive semiconductor switches [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(2): 394–397.  
刘 鸿, 阮成礼. 高增益砷化镓光导开关中的的特征量分析[J]. 中国激光, 2010, 37(2): 394–397.
- 10 Liu Hong, Zheng Li, Yang Hongjun, *et al.*. Radiative recombination coefficient of the streamer in GaAs photoconductive semiconductor switches[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(5): 052301.  
刘 鸿, 郑 理, 杨洪军, 等. 砷化镓光导开关中流注的辐射复合系数[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(5): 052301.
- 11 Liu Hong, Ruan Chengli, Zheng Li. Analysis of the theory of the electron avalanche domain (EAD) in GaAs photoconductive semiconductor switches[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(9): 679–684.  
刘 鸿, 阮成礼, 郑 理. 砷化镓光导开关的畴电子崩理论分析[J]. 科学通报, 2011, 56(9): 679–684.
- 12 Liu Hong, Ruan Chengli. Streamer model in intrinsic GaAs photoconductive semiconductor switch[J]. Chinese Science Bulletin, 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.
- 13 Liu Hong, Ruan Chengli. “S-shaped” negative differential conductivity of high gain GaAs photoconductive switches[C]. CLEO/Pacific Rim, 2009.
- 14 Liu Hong, Ruan Chengli. Streamer in high gain GaAs photoconductive semiconductor switches [C]. 17th IEEE International Pulsed Power Conference (PPC2009), 2009. 663–668.
- 15 P Kayasit, R P Joshi, N Islam, *et al.*. Transient and steady state simulations of internal temperature profiles in high-power semi-insulating GaAs photoconductive switches[J]. J Appl Phys, 2001, 89(2): 1411–1417.
- 16 F J Zutavern, S F Glover, K W Reed, *et al.*. Fiber-optically controlled pulsed power switches[J]. IEEE Trans Plasma Science, 2008, 36(5): 2533–2540.
- 17 Cui Haijuan, Yang Hongchun, Ruan Chengli, *et al.*. Threshold conditions of GaAs photoconductive semiconductor switch operated in lock-on Mode[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0213004.  
崔海娟, 杨宏春, 阮成礼, 等. GaAs 光导开关锁定模式阈值条件[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0213004.
- 18 Xie Yuan, Wang Ya'na, Liu Wei, *et al.*. Comparative study on GaAs photoconductive semiconductor switches[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(6): 063201.  
谢 媛, 王娅娜, 刘 维, 等. 砷化镓光导开关的比较研究[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(6): 063201.
- 19 Zhu Shaolan, Zhao Wei, Liu Baiyu, *et al.*. Cavity dumped laser using fast GaAs photoconductive switch[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0502003.  
朱少岚, 赵 卫, 刘百玉, 等. 利用高速 GaAs 光电导开关实现腔倒空激光脉冲输出[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0502003.

- 20 J L Hudgins, D W Bailey, R A Dougal, *et al.*. Streamer model for ionization growth in a photoconductive power switch[J]. IEEE Trans Power Electronics, 1995, 10(5): 615—620.
- 21 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.
- 22 C H Lee. Picosecond optoelectronic switching in GaAs[J]. Appl Phys Lett, 1977, 30(2): 84—86.
- 23 S Jayaraman, C H Lee. Observation of two-photon conductivity in GaAs with nanosecond and picosecond light pulses[J]. Appl Phys Lett, 1972, 20(10): 392—395.
- 24 R A Lawton, A Scavannec. Photoconductive detector of fast-transition optical waveforms[J]. Electron Lett, 1975, 11(4): 74—75.