

砷化镓光导开关中流注的辐射复合系数

刘 鸿¹ 郑 理² 杨洪军¹ 杨 维¹ 郑勇林¹ 朱晓玲¹

(¹ 成都学院(成都大学)电子信息工程学院, 四川 成都 610106)
² 成都工业学院机电系, 四川 成都 611730)

摘要 在砷化镓样品的自发辐射现象中引入了辐射复合系数的一般概念。对于高增益砷化镓光导开关中流注的自发辐射现象,依据求简单平均值的方法和归一化条件,近似确定了平均辐射复合系数为 $\bar{\eta}(883) \approx 0.1125$ 。导出了各辐射波长的辐射复合系数与平均辐射复合系数之间的关系,计算了辐射波长为 890 nm 的辐射复合系数值为 $\eta(890) = 0.1182$,代入该值计算的最大光输出能量与实验观察结果吻合,证明该近似方法及其结果是合理的。

关键词 光电子学;砷化镓光导开关;自发辐射;辐射复合系数

中图分类号 TN303 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.052301

Radiative Recombination Coefficient of the Streamer in GaAs Photoconductive Semiconductor Switches

Liu Hong¹ Zheng Li² Yang Hongjun¹ Yang Wei¹ Zheng Yonglin¹ Zhu Xiaolin¹

(¹ School of Electronic Information Engineering, Chengdu University, Chengdu, Sichuan 610106, China)
² Department of Mechatronics, Chengdu Technological University, Chengdu, Sichuan 611730, China)

Abstract The radiative recombination coefficient is introduced in spontaneous emission phenomena of GaAs samples. For the spontaneous emission phenomena of streamer in high gain GaAs photoconductive semiconductor switch (PCSS), the average radiative recombination coefficient, $\bar{\eta}(883) \approx 0.1125$, is approximately determined by the simple average method and the normalization conditions. The relationship between radiative recombination coefficients of different radiation wavelengths and the average radiative recombination coefficient is derived. The radiative recombination coefficient of 890 nm radiation, $\eta(890) = 0.1182$, is calculated. The maximum optical output energy calculated by substituting the value of $\eta(890)$ coincides with the result of experimental observations. This demonstrates that the approximation method and the results are reasonable.

Key words optoelectronics; GaAs photoconductive semiconductor switch; spontaneous emission; radiative recombination coefficient

OCIS codes 230.0250; 230.2090; 250.5960

1 引言

光导开关(PCSS)较之常规的脉冲产生器件具有独特的优势^[1~3]。研究高增益砷化镓(GaAs)光导开关中流注的自发辐射,对于进一步研究高增益 GaAs PCSS 的物理机理和器件的性能设计具有重要意义^[4~19]。Zutavern 等^[8]提出了“电流丝半导体激光”概念,测量了高增益 GaAs PCSS 中流注的自发辐射,波长 890 nm 的辐射具有最大光输出能量。本文在分析高增益 GaAs PCSS 中流注的自发辐射光谱特征的基础上,应用统计物理方法,提出了确定不同辐射波长的辐射复合系数的近似方法,所得结论与相关实验观察结果吻合。

2 辐射复合系数的定义

砷化镓样品中非平衡载流子的复合辐射分布在一定波长范围,在此范围内,不同波长所对应的发光强度

收稿日期: 2013-01-11; 收到修改稿日期: 2013-02-04; 网络出版日期: 2013-04-08

基金项目: 四川省应用基础研究计划(2010JY0160)资助课题。

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

不同,这些结论与实验观察的光谱曲线一致^[8,20,21]。室温下砷化镓器件的发射光谱约在 830~930 nm 范围,辐射强度的最大峰值波长约为 890 nm^[8,20]。由于 GaAs 是直接带隙半导体,直接复合起主导作用,在砷化镓样品的自发辐射现象中,引入辐射强度与辐射的波长分布函数的概念。设 $dN(\lambda)$ 为单位时间内产生的波长分布在某一间隔 $\lambda \sim \lambda + d\lambda$ 内的光子数, N_{ph} 为单位时间内产生的总光子数,则 $dN(\lambda)/N_{ph}$ 表示分布在这一间隔内的光子数占总光子数的百分率,显然 $dN(\lambda)/N_{ph}$ 与波长增量 $d\lambda$ 成正比,也与波长 λ 有关。定义辐射波长分布在 λ 附近单位波长间隔内的光子数占总光子数的百分率为辐射复合系数 $\eta(\lambda)$,即辐射强度与辐射的波长分布函数为

$$\eta(\lambda) = \frac{dN(\lambda)}{N_{ph} d\lambda}. \quad (1)$$

对于处在一定温度下的砷化镓样品, $\eta(\lambda)$ 只是波长 λ 的函数^[20],根据分布函数的定义,对自发辐射波长分布范围积分,得到辐射复合系数 $\eta(\lambda)$ 的归一化条件为

$$\int_{\lambda} \eta(\lambda) d\lambda = 1. \quad (2)$$

如果知道了辐射复合系数 $\eta(\lambda)$ 的具体形式,则仅依赖于辐射波长的各个物理量的平均值都能够依据波长分布函数求出,例如辐射波长的平均值为

$$\bar{\lambda} = \int_{\lambda} \lambda \eta(\lambda) d\lambda. \quad (3)$$

设辐射波长是 λ 的辐射强度为 $I(\lambda)$,则平均辐射强度为

$$\bar{I}(\bar{\lambda}) = \int_{\lambda} I(\lambda) \eta(\lambda) d\lambda. \quad (4)$$

设复合辐射波长范围的下限为 λ_1 ,上限为 λ_2 ,则平均辐射复合系数为

$$\bar{\eta}(\bar{\lambda}) = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta(\lambda) d\lambda. \quad (5)$$

上述定义对于近似描述砷化镓样品的自发辐射现象普遍成立。下面讨论高增益砷化镓光导开关中流注的自发辐射现象。

3 确定辐射复合系数的方法

在高增益砷化镓光导开关的流注的自发辐射现象中,由于辐射复合系数 $\eta(\lambda)$ 的具体形式尚不清楚,因此不能直接应用(3)~(5)式。分析流注的自发辐射光谱的结构特征,依据求简单平均值的方法和归一化条件,确定关于 $\eta(\lambda)$ 的一组参照值,从而计算辐射波长范围内各波长的辐射复合系数。

高增益砷化镓光导开关中流注一端的自发辐射光谱显示^[8]:室温下电流丝四个相对发光强度峰值波长大约为 876、881、885、890 nm,四个相应的发光峰值强度分别近似为 $I(876) = 1.1905 \times 10^4$ 、 $I(881) = 1.2381 \times 10^4$ 、 $I(885) = 1.2857 \times 10^4$ 和 $I(890) = 1.3095 \times 10^4$ [强度值均为任意单位(a. u.)],自发辐射峰值半峰全宽(FWHM)约为 50 nm(856~906 nm)。依据自发辐射光谱的分布特征,考虑在波长范围 $875.5 \text{ nm} \leq \lambda \leq 890.5 \text{ nm}$ 内的自发辐射光谱,求四个相对发光峰值波长处的相关物理量的简单平均值,把这组简单平均值作为计算各波长的辐射复合系数的参照值。四个峰值波长处的辐射波长、辐射强度和辐射复合系数的简单平均值分别为:1)平均波长为 $\bar{\lambda} = 883 \text{ nm}$;2)相对发光强度峰值的平均辐射强度 $\bar{I}(883) = 1.25595 \times 10^4$;3)如果估计 45% 的光子数分布在这个波长范围内[即 $\eta(875.5 \text{ nm} \leq \lambda \leq 890.5 \text{ nm}) \approx 0.45$],且假设光子数集中分布在四个峰值波长处的单位波长间隔内,则四个峰值波长的平均辐射复合系数 $\bar{\eta}(883) \approx 0.1125$,这样就近似确定了计算各波长的辐射复合系数 $\eta(\lambda)$ 的一组参照值。

为了讨论方便,设流注为圆柱形,从流注一端发出的波长为 λ 的光子在单位时间内通过单位面积进入紧邻流注顶部的区域内的光子数为^[11,12,22]

$$\frac{\Delta N'(\lambda)}{S_{tip}} = \frac{(1-R)}{S_T} \times \eta(\lambda) \times \frac{n}{\tau_h} \times V_T = \frac{(1-R)}{S_T} \times \Delta N(\lambda), \quad (6)$$

式中 $\Delta N'(\lambda)$ 为单位时间内通过流注顶部面积的波长为 λ 的光子数, S_{tip} 为流注顶部的面积, R 为半绝缘砷化镓材料的反射率, S_{T} 为流注体的表面积, n 为流注内的平均载流子密度, τ_{h} 为空穴的复合时间, V_{T} 为流注的体积, $\Delta N(\lambda)$ 为流注体内单位时间复合辐射产生的波长为 λ 的光子数。依据以光子数计算的光强度的基本公式为

$$I(\lambda) = \frac{\Delta N'(\lambda)}{S_{\text{tip}}} h\nu = \frac{(1-R)}{S_{\text{T}}} \times \Delta N(\lambda) \times \frac{hc}{\lambda}, \quad (7)$$

式中 ν 是波长为 λ 的光子频率, h 为普朗克常数, c 为光速。联合(1)、(4)、(5)式, 可以导出各辐射波长的辐射复合系数与平均辐射复合系数之间的关系为

$$\frac{\eta(\lambda)}{\bar{\eta}(\lambda)} = \frac{\lambda}{\bar{\lambda}} \times \frac{I(\lambda)}{\bar{I}(\lambda)}. \quad (8)$$

由(8)式和前面得到的参照值, 可以求出 $\eta(890) = 0.1182$, $\eta(885) \approx 0.1154$, $\eta(881) \approx 0.1106$, $\eta(876) \approx 0.1058$ 。

4 与实验测量结果比较

将文献[22]中电流丝顶部的自发辐射功率的基本公式改写为

$$P(890) = (1-R) \times \frac{\eta(890)}{\tau_{\text{h}}} \times \frac{hc}{\lambda eu} \times \frac{S_{\text{tip}}}{S_{\text{trans}}} \times \frac{V_{\text{T}}}{S_{\text{T}}} \times (I - I_{\text{th}}) + P_{\text{th}}, \quad (9)$$

式中 e 为电子的电量, u 为载流子速度, S_{trans} 为流注的横切面积, I 为电流丝电流, I_{th} 为电流丝发射激光的阈值电流, P_{th} 为与 I_{th} 对应的辐射功率。实验测量流注一端的最大辐射能量 ($\lambda = 890 \text{ nm}$) 如图 1 中连接两个数据点的虚线所示^[8]。注意到圆柱形流注有 $S_{\text{tip}} = S_{\text{trans}}$, 取文献[8]中的实验测量数据: 流注横切面的半径 $r_0 \approx b/2 = 20 \text{ }\mu\text{m}$ (流注宽度 $b = 40 \text{ }\mu\text{m}$), 长度 $d = 0.5 \text{ mm}$, $R = 0.3$, $\lambda = 890 \text{ nm}$, $I_{\text{th}} = 5 \text{ A}$, $P_{\text{th}} = 0$; 则 $V_{\text{T}} = 628000 \text{ }\mu\text{m}^3$, $S_{\text{T}} = 65312 \text{ }\mu\text{m}^2$ 。其他各参数取值分别为: $\tau_{\text{h}} = 100 \text{ ps}$ ^[2], $h = 6.625 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, $u = u_{\text{d}} = 10^7 \text{ cm/s}$ (u_{d} 为 GaAs 中载流子的高场饱和和漂移速度), $\eta(890) = 0.1182$ 。如图 1 所示, (9)式的计算结果(实线)与实验数据(虚线)几乎重合, 证明这里确定辐射复合系数的近似方法和计算的辐射复合系数值 $\eta(890) = 0.1182$ 是合理的。

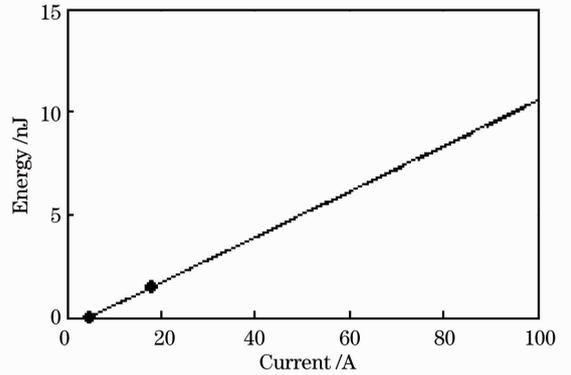


图 1 流注一端 1 ns 最大自发辐射能量随电流丝电流的变化关系, 模拟结果(实线)与实验结果(虚线)吻合
Fig. 1 Optical output energy of the spontaneous emission in 1 ns versus filament current. The computed results (the solid line) are in accordance with experimental data (the dotted line)

5 结 论

定义了砷化镓样品中自发辐射的辐射复合系数。在分析高增益砷化镓光导开关中流注的自发辐射光谱结构特征的基础上, 依据求简单平均值的方法和归一化条件, 近似确定了关于辐射复合系数的一组参照值, 计算了辐射波长为 890 nm 的辐射复合系数值 $\eta(890) = 0.1182$ 。由该值计算的光输出能量与实验测量吻合, 证明了本文引入的近似计算辐射复合系数的方法的合理性。本工作为进一步研究高增益 GaAs PCSS 的物理机理和“电流丝半导体激光”器件的性能设计奠定了基础。

参 考 文 献

- 1 D. H. Auston. Picosecond optoelectronic switching and gating in silicon [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1975, **26**(3): 101~103
- 2 C. H. Lee. Picosecond optoelectronic switching in GaAs [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **30**(2): 84~86
- 3 S. Williamson, G. F. Albrecht, G. Mourou. Laser triggered Cr:GaAs HV sparkgap with high trigger sensitivity [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1982, **53**(6): 867~870

- 4 M. S. Mazzola, K. H. Schoenbach, V. K. Lakdawala *et al.*. Infrared quenching of conductivity at high electric fields in a bulk, copper-compensated, optically activated GaAs switch [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1990, **37**(12): 2499~2505
- 5 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
- 6 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
- 7 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
- 8 F. J. Zutavern, A. G. Baca, W. W. Chow *et al.*. Semiconductor lasers from photoconductive switch filaments [C]. IEEE Pulsed Power Plasma Science Conference, 2001, **1**: 170~173
- 9 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
- 10 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
- 11 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
- 12 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
- 13 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
- 14 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
- 15 Liu Hong, Ruan Chengli. "S-shaped" negative differential conductivity of high gain GaAs photoconductive switches [C]. CLEO/PACIFIC RIM, 2009
- 16 Liu Hong, Ruan Chengli. Streamer in high gain GaAs photoconductive semiconductor switches [C]. 17th IEEE International Pulsed Power Conference (PPC2009), 2009. 663~668
- 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, 刘白玉 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 P. D. Southgate. Recombination processes following impact ionization by high-field domain in gallium arsenide [J]. *J. Appl. Phys.*, 1967, **38**(12): 4589~4595
- 21 R. A. Falk, J. C. Adams, G. Bohnhoff-Hlavacck. Optical probe techniques for avalanching photoconductors [C]. Proceedings of the 8th IEEE International Pulsed Power Conference, 1991. 29~32
- 22 Liu Hong, Zheng Li, Cheng Hao *et al.*. Theoretical analysis of streamer radiation in GaAs photoconductive semiconductor switches (PCSS) [J]. *J. Chengdu University (Natural Science Edition)*, 2012, **31**(2): 133~135
刘 鸿, 郑 理, 程 浩 等. 砷化镓光导开关中流注辐射实验理论分析 [J]. 成都大学学报(自科版), 2012, **31**(2): 133~135