

文章编号: 0253-2239(2010)05-1492-05

# 反射式非均匀掺杂负电子亲和光电阴极 量子效率研究

傅江涛<sup>1</sup> 张松春<sup>1</sup> 常本康<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 河南科技大学电子信息工程学院, 河南 洛阳 471003; <sup>2</sup> 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

**摘要** 内建电场对提高阴极量子效率有重要作用。为获得恒定的电场强度,需要用指数掺杂方式对光电阴极激活层进行掺杂。指数掺杂实际上是一种特殊的梯度掺杂,针对这种掺杂方式,建立了指数掺杂和均匀掺杂加权的量子效率公式。实验设计了 4 种掺杂浓度从  $10^{19} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  掺杂样品,测量样品的光谱响应曲线和量子效率曲线,并分别用均匀掺杂量子效率公式,指数掺杂量子效率公式和新建立的梯度掺杂量子效率公式这三种方式,对量子效率曲线进行了拟合,证明了该量子效率公式具有较高的拟合精度。

**关键词** 光电子学;量子效率;非均匀掺杂;GaAs 光电阴极;负电子亲和

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103005.1492

## Study on the Quantum Efficiency for Non-Uniform Doping Negative Electron Affinity Photocathode with Reflection Mode

Fu Jiangtao<sup>1</sup> Zhang Songchun<sup>1</sup> Chang Benkang<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Electronic Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China

<sup>2</sup> Institute of Electronic Engineering & Opto-Electronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

**Abstract** Built-in electronic field has important effect to improve the quantum efficiency of the photocathode. In order to get a stable electronic field, the exponential-doping method is applied in the active layer. Exponential doping actually is a special gradient doping, according to this consideration, a new quantum efficiency formula including uniform doping and exponential doping is brought forward. Four doping samples with concentration from  $10^{19}$  to  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  are produced in the experiment, meanwhile their spectral response curves and quantum yield curves are detected. Through the data fitting analysis of the quantum yield curve with three methods which are uniformly-doping quantum yield formula fitting, exponential-doping quantum yield formula fitting and the new-built graded-doping quantum yield formula, the fitting precision of the new-built quantum yield formula is proved best.

**Key words** optoelectronics; quantum efficiency; non-uniformly doping; GaAs photocathode; negative electron affinity (NEA)

### 1 引 言

变掺杂 GaAs 负电子亲和自动对焦 (NEA) 光电阴极,是一种由体内到表面掺杂浓度由高到低的梯度掺杂结构,在这种掺杂模式下,阴极的电子扩散长度会随着掺杂浓度的降低而增大,同时在两个不同掺杂浓度区域交界面,形成由体内到表面向下的能带弯曲<sup>[1,2]</sup>。能带弯曲区对应一个正向的内建电场,体内光生电子将以扩散和定向漂移两种方式到达表面,会大大提高体内光电子向表面的输运效率,从而提高了阴极的量子效率<sup>[1~4]</sup>。不断优化掺杂结

构,最大程度地提高阴极的光电发射性能,是目前该领域研究的重点。阴极量子效率曲线反映了阴极在整个响应波长范围内不同能量光子的量子效率大小,包含有关阴极的丰富信息,这些信息必须通过量子效率公式的拟合分析才可以得到。由于变掺杂阴极的掺杂方式很多,其能带结构差异较大,目前关于变掺杂光电阴极的量子效率尚无统一的理论解析式,因此深入开展变掺杂阴极研究存在很大的不便。当前,变掺杂阴极的量子效率研究主要是借助均匀掺杂或指数掺杂阴极的理论公式<sup>[2]</sup>进行拟合研究,

收稿日期: 2009-04-10; 收到修改稿日期: 2009-07-01

作者简介: 傅江涛(1974—),男,博士,副教授,主要从事 GaAs 光电阴极材料的研究和光电阴极的性能评估。

E-mail: fjtmenngnan302@sina.com.cn

结果存在较大误差,且不能全面反映材料的结构特性,故缺乏说服力。

本文利用特殊变掺杂形式——指数掺杂与均匀掺杂阴极的量子效率公式,提出了采用加权平均法表示的反射式变掺杂光电阴极量子效率理论模型,利用该模型对梯度掺杂阴极的量子效率曲线进行了大量的拟合研究,取得了很好的拟合效果。

## 2 反射式变掺杂 GaAs 光电阴极量子效率公式

### 2.1 反射式均匀掺杂 GaAs 光电阴极量子效率公式

经过修正的反射式均匀掺杂 GaAs 光电阴极的量子效率公式<sup>[5~9]</sup>为

$$Y_{\tau} = \frac{P_0 \exp[-k(\lambda - \lambda_0)](1 - R)}{1 + 1/\alpha L_D}, \quad (1)$$

式中  $\lambda_0$  为光谱响应曲线的起始波长,  $\lambda$  为入射光波长,  $P_0$  为入射光波长为  $\lambda_0$  时的光电子逸出概率,大小在  $0 \sim 1$  之间,  $k$  为表面势垒因子 ( $k \geq 0$ ),  $R$  为 GaAs 光电阴极表面的反射率,  $\alpha$  为阴极对入射能量为  $h\nu$  的光子的吸收系数,  $L_D$  为阴极材料电子扩散长度。由文献[3]的研究结果可知,光电子的逸出几率  $P$  是  $\lambda$  射光波长的函数,  $P$  与  $\lambda$  近似满足指数关系,  $P(\lambda)$  具有(2)式的形式:

$$P(\lambda) = P_0 \exp[-k(\lambda - \lambda_0)]. \quad (2)$$

将(2)式中的  $P$  转换为入射光子能量  $h\nu$  的函数,则可以得到(3)式:

$$P(h\nu) = P(h\nu_0) \exp[-k(h\nu - h\nu_0)], \quad (3)$$

因此,反射式均匀掺杂 GaAs 光电阴极量子效率公式可转换为(4)式所示的形式:

$$Y_{\tau} = \frac{P(h\nu_0) \exp[-k(h\nu - h\nu_0)](1 - R)}{1 + 1/\alpha L_D}. \quad (4)$$

### 2.2 反射式指数掺杂 GaAs 光电阴极量子效率公式

如果按照指数规律对材料结构进行掺杂,则能在阴极发射层内形成一个均匀(恒定)的内建电场,将对电子的逸出非常有利,这就是指数掺杂光电阴极,它实际上是梯度掺杂的一种特殊形式。文献[2]推导得到了指数掺杂 GaAs 光电阴极的量子效率公式,其反射式量子效率为

$$Y_{\text{RE}}(h\nu) = \frac{P(1 - R)\alpha_{hv}L_D}{\alpha_{hv}^2L_D^2 - \alpha_{hv}^2L_E - 1} \times \left\{ \frac{N(S - \alpha_{hv}D_n) \exp[(L_E/2L_D^2 - \alpha_{hv})T_e]}{M} - \frac{Q}{M} + \alpha_{hv}L_D \right\}, \quad (5)$$

式中  $P$  为表面电子逸出几率,  $R$  为 GaAs 光电阴极表面的反射率,  $\alpha_{hv}$  为阴极对入射能量为  $h\nu$  的光子的吸收系数,  $L_D$  是阴极材料电子扩散长度,

$$L_E = \mu |E| \tau = \frac{q|E|}{k_0 T} L_D^2,$$

$$N = \sqrt{L_E^2 + 4L_D^2}, \quad S = S_V + \mu |E|,$$

$$M = (ND_n/L_D) \cosh(NT_e/2L_D^2) + (2SL_D - D_nL_E/L_D) \sinh(NT_e/2L_D^2),$$

$$Q = SN \cosh(NT_e/2L_D^2) +$$

$$(SL_E + 2D_n) \sinh(NT_e/2L_D^2),$$

式中  $k_0$  为玻耳兹曼常数,  $T$  为绝对温度,  $S_V$  为后界面复合速率,  $T_e$  为阴极发射层的厚度,  $D_n$  为电子的扩散系数。

根据文献[3]的研究结果,利用(3)式对(5)式进行了修正,得到如(6)式所示修正后的反射式指数掺杂 GaAs 光电阴极量子效率公式<sup>[2,9,13]</sup>:

$$Y_{\text{RE}}(h\nu) = \frac{P(h\nu_0) \exp[-k(h\nu - h\nu_0)](1 - R)\alpha_{hv}L_D}{\alpha_{hv}^2L_D^2 - \alpha_{hv}L_E - 1} \times \left\{ \frac{N(S - \alpha_{hv}D_n) \exp[(L_E/2L_D^2 - \alpha_{hv})T_e]}{M} - \frac{Q}{M} + \alpha_{hv}L_D \right\}. \quad (6)$$

### 2.3 反射式变掺杂光电阴极量子效率理论公式的修正

实际应用中生长的 GaAs 光电阴极材料,其掺杂结构不可能实现严格意义上的指数掺杂,而只能是符合指数规律的梯度掺杂。因此其量子效率既不同于均匀掺杂情况,也不完全符合指数掺杂情况,而是介于两者之间。如果用变掺杂系数  $L$  ( $0 \leq L \leq 1$ ) 来表示其量子效率中指数掺杂成分所占的权重,用  $1 - L$  表示均匀掺杂成分所占的权重,就得到了采用加权平均法表示的反射式变掺杂光电阴极的量子效率理论模型。设反射式变掺杂阴极的量子效率为  $Y$ , 反射式指数掺杂阴极的量子效率为  $Y_{\text{RE}}$ , 反射式均匀掺杂阴极的量子效率为  $Y_{\tau}$ , 则按照上述模型有

$$Y = LY_{\text{RE}} + (1 - L)Y_{\tau}, \quad (7)$$

式中的  $Y_{\text{RE}}$  和  $Y_{\tau}$  分别来自(4)式和(6)式。  $L$  的大小,可以通过曲线拟合的方法求出,它的实际物理意义是表征了材料变掺杂结构对阴极量子产额的贡献程度。  $L$  越大,其贡献越大。掺杂方式不同,  $L$  的大小也不同。

## 3 实验验证和结果分析

为了验证(7)式所表述的模型的效果,按图1的掺杂结构设计了4种反射式 GaAs 光电阴极样品,样品1是均匀掺杂,样品2~4是外延层分别为2个

区,4 个区和 8 个区按指数规律变化的梯度掺杂。在 4 个样品中样品 4 激活后不仅光谱响应曲线平坦,而且积分灵敏度最高。图 2(a)是样品 1~4 激活结束后原位实际测量的光谱响应曲线,图 2(b)为图 2(a)中样品 1~4 对应的实际测量的量子效率曲线。利用(4),(6)和(7)式,分别用三种方法对大量实验获得的样品 4 的量子效率曲线[图 2(b)中的曲线 4]进行了拟合。为了对比三种拟合方法的效果,选取一条实际测量的量子效率曲线进行拟合,根据以往的研究结果和经验,拟合时设定材料的电子扩散长度  $L_D=2.8 \mu\text{m}$ ,拟合的结果如图 3 所示。由图 3 可以看出采用(7)式的拟合效果最好。拟合过程中发现,对于不同波段的入射光,阴极变掺杂结构的作用效果差别很大,变掺杂系数  $L$  在整个入射光响应波段内不是一个定值。因此采用了分段拟合的方法,选取的波段范围为 600~920 nm,每 40 nm 为一波段区间单独进行拟合。实际效果表明,这样既保证了拟合精度,又能反映出阴极材料的结构特性。表 1 所示的数据是对图 2(b)中曲线 4 进行拟合所得到的结果。表 1 中的  $L$  为(7)式中的变掺杂系

数, $P$  为量子效率。样品的外延层分为 8 个区进行按指数规律变化的梯度掺杂,每个分区的厚度和掺杂浓度如图 1 所示。

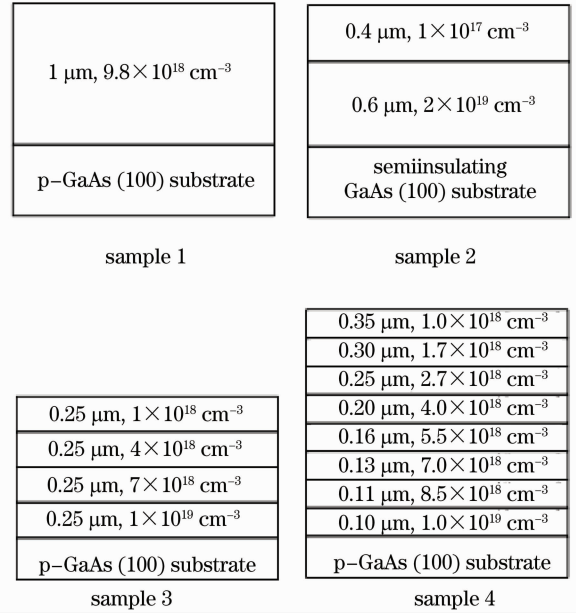


图 1 4 种非均匀样品掺杂结构

Fig. 1 Structures for 4 non-uniformly doping samples

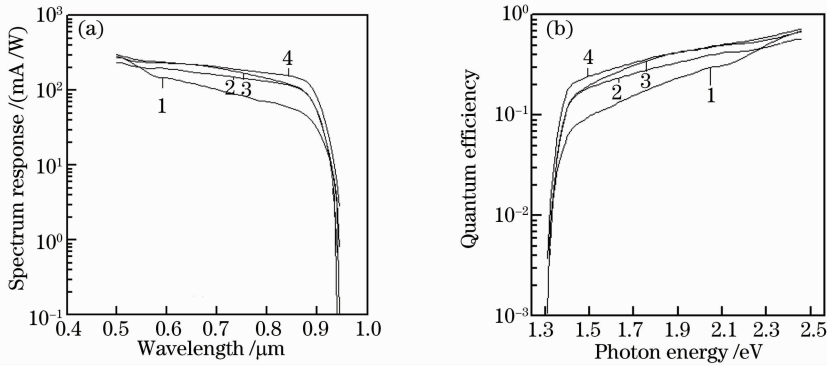


图 2 样品实测光谱响应曲线(a)与量子效率曲线(b)

Fig. 2 Measured spectral response curves (a) and quantum efficiency curves of the samples (b)

表 1 量子效率曲线的拟合结果

Table 1 Fitting result of quantum efficiency curve

Fitting method	Fitting result with formula (7)			Fitting result with formula (4)			Fitting result with formula(6)			
	Wavelength /nm	Fitting precision	$P$	$L$	Fitting precision	$P$	$L$	Fitting precision	$P$	$L$
	600~640	0.000392	0.38	0.1	0.000411	0.38	0	0.000527	0.36	1
	640~680	0.000394	0.35	0.03	0.000396	0.35	0	0.000552	0.32	1
	680~720	0.000444	0.31	0.11	0.000470	0.31	0	0.000538	0.29	1
	720~760	0.000176	0.26	0.86	0.000194	0.28	0	0.000211	0.26	1
	760~800	0.000092	0.23	0.9999	0.001240	0.25	0	0.000092	0.23	1
	800~840	0.000012	0.22	0.88	0.000040	0.23	0	0.000018	0.22	1
	840~880	0.000044	0.23	0.11	0.000044	0.22	0	0.000118	0.23	1
	880~920	0.000241	0.23	0.9999	0.000928	0.19	0	0.000241	0.23	1

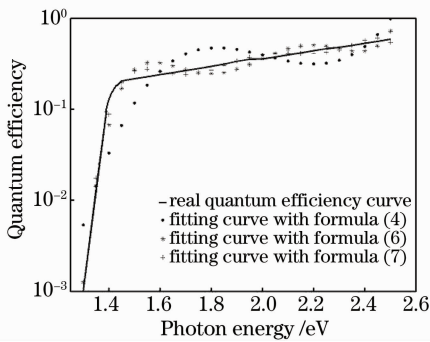


图3 三种方法对样品4量子效率拟合曲线

Fig. 3 Quantum efficiency fitting curves of sample 4 with three methods

分析表1中数据可得出下述结论:

1) 三种拟合方法中,采用变掺杂模型的拟合精度在各个波段内都是最高的,而且拟合结果能够体现阴极变掺杂结构在不同入射光波段,其对阴极量子效率的贡献程度不同这一特点;

2) 在600~840 nm波长范围内,阴极的表面逸出几率随波长增加而减小,但在840~920 nm范围内有所偏离,这和文献[3]的研究结果相一致;

3) 当波段在720 nm以下时,用变掺杂模型和用均匀掺杂公式拟合的精度相接近,变掺杂系数 $L$ 的值很小,表明在 $\lambda < 720$  nm时,阴极的内建电场作用效果不大,变掺杂结构特性得不到体现;

4) 当波段在720~920 nm范围内时,阴极变掺杂结构的贡献较大,同时在不同的波段区间,其大小又有差异;

5) 当入射光波长在720 nm以下时,对应产生的光电子能量高,分布集中,又都靠近阴极表面,自身逸出几率较大;而同时该区域的内建电场强度较弱,对光电子作用甚微。因此在该入射光波段内的阴极量子效率和均匀掺杂情况下几乎无差别;

6) 当入射光波长 $\lambda > 720$  nm时,阴极内建电场对光电子的作用逐渐明显起来,原因在于:a)随着波长的增加,光生电子的能量越来越低,表面势垒对光电子逸出的阻碍加大;b)光的吸收深度越来越大,所生光电子位置距离表面越来越远;c)内建电场强度越来越大,对光电子能量有明显提高。因此,光电子在内建电场作用下,以漂移加扩散的方式输运到表面,其漂移扩散长度较无电场作用的扩散长度有所增加,同时能量也有所提高,逸出几率明显增加,量子效率的变掺杂特性在波段720~840 nm范围内非常显著,因此拟合出的变掺杂系数 $L$ 的值较大。当 $\lambda > 840$  nm时,光生电子的能量进一步降

低,而入射光的吸收深度也进一步增大,大量的低能光电子在后界面附近产生,受到后界面复合速率的影响较大,此时内建电场的作用已不能弥补以上因素所导致的量子产额的降低,变掺杂结构贡献非常轻微,因此在840~880 nm波长范围内, $L$ 值接近于0。当 $\lambda$ 在880~920 nm范围时,从 $L$ 值可以看出,内建电场的作用效果突然增大,变掺杂结构对量子效率的贡献非常显著<sup>[14,15]</sup>。分析其原因可能是:在该波长范围内入射光的吸收深度(1.887~11.36  $\mu\text{m}$ )已经大大超出了阴极材料的厚度(1.6  $\mu\text{m}$ ),部分入射光在到达GaAs衬底材料界面后又反射回前表面方向,在近前表面的位置产生了部分光电子,这些光电子虽然能量较低,但内建电场的作用仍能使其表面逸出几率显著提高,从而提高了波段内的量子效率。

## 4 结 论

提出了采用加权平均法表示的变掺杂光电阴极量子效率理论模型。利用该模型对变掺杂阴极的量子效率曲线进行了拟合研究,并和用其它方法得到的拟合效果进行对比,结果表明采用该模型的拟合精度最高。拟合结果还能定量地表明材料的变掺杂结构在不同入射光波段对阴极量子效率的贡献大小,丰富了变掺杂阴极性能研究的信息量,为进一步优化阴极变掺杂结构设计提供了有效的分析途径,解决了目前针对变掺杂光电阴极缺乏合适分析模型的问题。

## 参 考 文 献

- Du Xiaoping, Chang Benkang, Zou Jijun *et al.*. High quantum efficiency GaAs photocathode by gradient doping[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1411~1414  
杜晓晴, 常本康, 邹继军 等. 利用梯度掺杂获得高量子效率的GaAs光电阴极[J]. *光学学报*, 2005, **25**(10): 1411~1414
- Zou Jijun, Chang Benkang, Yang Zhi. Theoretical calculation of quantum yield for exponential doping GaAs photocathode[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(5): 2992~2995  
邹继军, 常本康, 杨 智. 指数掺杂GaAs光电阴极量子效率的理论计算[J]. *物理学报*, 2007, **56**(5): 2992~2995
- Zou Jijun, Chen Huilin, Chang Benkang *et al.*. Study of relation between surface electron escape probability of GaAs photocathode and incident photon wavelength [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9): 1400~1404  
邹继军, 陈怀林, 常本康 等. GaAs光电阴极表面电子溢出概率与波长关系的研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(9): 1400~1404
- Zhi Liu, Yun Sun, F. Machuca *et al.*. Preparation of clean GaAs (100) studied by synchrotron radiation photoemission [J]. *J. Vacuum Science and Technology A*, 2003, **21**(1): 212~218
- Niu Lihong, Liu Jinyuan, Peng Wenda *et al.*. Microchannel plate gated X-ray nanosecond framing camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1274~1276

- 牛丽红, 刘进元, 彭文达等. 微通道板选通 X 射线纳秒分幅相机的研制[J]. 光学学报, 2008, **28**(7): 1274~1276
- 6 Chen Xiaojing, Wu Di, Yu Jijia *et al.*. A new choice method of characteristic wavelength of visible/near infrared spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2153~2156
- 陈孝敬, 吴迪, 虞佳佳等. 一种用于可见-近红外光谱特征波长选择的新方法[J]. 光学学报, 2008, **28**(11): 2153~2156
- 7 Zou Jijun, Yang Zhi, Qiao Jianliang *et al.*. Stability and photoemission characteristics for GaAs photocathodes in a demountable vacuum system [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(17): 953~958
- 8 Li Jianjun, Zheng Xiaobing, Lu Yunjun *et al.*. Optical radiometric calibration based on parametric down-conversion effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2325~2327
- 李建军, 郑小兵, 卢云君等. 基于参变下转换效应的光辐射定标方法[J]. 光学学报, 2008, **28**(12): 2325~2327
- 9 Liu Yuanzhen, Wang Zhongchun, Dong Yaqiang. Electron Emission and Photocathode [M]. Beijing: Beijing University of Science and Technology Press, 1995. 308~327
- 刘元震, 王仲春, 董亚强. 1995 电子发射与光电阴极[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995. 308~327
- 10 Zong Zhiyuan, Chang Beikang. Calculating the quantum yield of NEA photocathode by integral [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(9): 1177~1182
- 宗志园, 常本康. 用积分法推倒 NEA 光电阴极的量子产额[J]. 光学学报, 1999, **19**(9): 1177~1182
- 11 D. J. Bartelink, J. L. Moll, N. I. Meyer. Hot-electron emission from shallow p-n junction in silicon [J]. *Phys. Rev.*, 1963, **130**(3): 972~985
- 12 Qian Yunsheng, Zong Zhiyuan, Chang Benkang. Property evaluation of NEA photocathodes [J]. *Vacuum Science and Technology*, 2001, **21**(6): 445~448
- 钱芸生, 宗志园, 常本康. 负电子亲和势光电阴极评估技术研究 [J]. 真空科学与技术, 2001, **21**(6): 445~448
- 13 Zou Jijun. Study of GaAs photocathode theory and its property evaluation [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007. 85~91
- 邹继军. GaAs 光电阴极理论及其表征技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007. 85~91
- 14 Liu Yibao, Pang Wenning, Ding Haibing *et al.*. Distribution of electron clouds in the excited atomic coincidence scattering experiment [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(8): 3554~3557
- 刘义保, 庞文宁, 丁海兵等. 电子-光子符合散射实验中受激原子态电荷云分布的研究 [J]. 物理学报, 2005, **54**(8): 3554~3557
- 15 Zhu Ying, Chang Benkang, Liu Lei. Influence of the frame integral time to detecting distance of low light level-TV [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 259~262
- 朱莹, 常本康, 刘磊. 帧积分时间对微光电视观察视距的影响 [J]. 中国激光, 2008, **35**(2): 259~262