

# 反射式变掺杂 GaAs 光电阴极量子效率模型研究\*

牛 军<sup>1)2)</sup> 杨 智<sup>1)</sup> 常本康<sup>1)†</sup> 乔建良<sup>1)2)</sup> 张益军<sup>1)</sup>

1) 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

2) 南阳理工学院电子与电气工程系, 南阳 473004)

(2008 年 9 月 2 日收到, 2008 年 10 月 8 日收到修改稿)

借助指数掺杂与均匀掺杂光电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. 使用该模型对某掺杂结构的反射式 GaAs 光电阴极量子效率曲线进行了拟合, 获得了最佳的拟合效果, 且模型的拟合结果能够定量地揭示材料的变掺杂结构, 在不同入射光波段对阴极量子效率的贡献不相同这一现象. 针对此现象进行了深入地分析和探讨.

关键词: GaAs, 变掺杂, 光电阴极, 量子效率

PACC: 7960, 7280E, 7360L, 7320A

## 1. 引 言

变掺杂 GaAs 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<sup>[1-3]</sup>, 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, 形成一个由体内到表面向下的能带弯曲. 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. 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<sup>[4-6]</sup>.

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还没有统一的理论解析式, 因此深入开展变掺杂阴极研究存在很大的不便. 当前对变掺杂阴极的量子效率主要是借助均匀掺杂<sup>[7]</sup>或指数掺杂阴极的理论公式<sup>[3]</sup>进行拟合研究, 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 光电阴极量子效率理论模型

### 2.1. 反射式均匀掺杂 GaAs 光电阴极量子效率公式

文献[8]给出了经过修正的反射式均匀掺杂 GaAs 光电阴极的量子效率公式.

$$Y_{\text{Rt}}(h\nu) = \frac{P_0 \exp[-k(\lambda - \lambda_0)] \cdot (1 - R)}{1 + 1/\alpha_{\text{hv}} L_{\text{D}}}, \quad (1)$$

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—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,  $\alpha_{\text{hv}}$  为阴极对入射能量为  $h\nu$  的光子的吸收系数,  $L_{\text{D}}$  是阴极材料电子扩散长度.

由文献[8]的研究结果可知, 光电子的逸出概率  $P$  是入射光波长的函数,  $P$  与  $\lambda$  近似满足指数关系,  $P(\lambda)$  具有以下形式:

\* 国家自然科学基金(批准号: 60678043) 高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20050288010) 资助的课题.

† E-mail: bkchang@mail.njust.edu.cn

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

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

$$P(h\nu) = P_0 \exp\left[-k\left(\frac{1}{h\nu} - \frac{1}{h\nu_0}\right)\right]. \quad (3)$$

因此,反射式均匀掺杂 GaAs 光电阴极量子效率公式可转换为以下的形式:

$$Y_{\text{RU}}(h\nu) = \frac{P_0 \exp\left[-k\left(\frac{1}{h\nu} - \frac{1}{h\nu_0}\right)\right](1-R)}{1 + 1/\alpha_{h\nu} L_D}. \quad (4)$$

## 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[3]推导得到了指数掺杂 GaAs 光电阴极的量子效率公式,其反射式量子效率公式为

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

式中

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

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

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

$$Q = SN \cosh(NT_e/2L_D^2) + (SL_E + 2D_n) \sinh(NT_e/2L_D^2).$$

上述表达式中  $P$  为表面电子逸出概率,  $R$  为 GaAs 光电阴极表面的反射率,  $\alpha_{h\nu}$  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,  $L_E$  为电子在电场  $E$  作用下的牵引长度.

根据文献[8]的研究结果,利用(3)式对(5)式进行了修正,得到了修正后的反射式指数掺杂 GaAs 光电阴极量子效率公式为

$$Y_{\text{RE}}(h\nu) = \frac{P_0 \exp\left[-k\left(\frac{1}{h\nu} - \frac{1}{h\nu_0}\right)\right](1-R)\alpha_{h\nu} L_D}{\alpha_{h\nu}^2 L_D^2 - \alpha_{h\nu} L_E - 1}$$

$$\times \left\{ \frac{N(S - \alpha_{h\nu} D_n) \exp[(L_E/2L_D^2 - \alpha_{h\nu})T_e]}{M} - \frac{Q}{M} + \alpha_{h\nu} L_D \right\}. \quad (6)$$

## 2.3. 加权法表示的反射式变掺杂光电阴极量子效率理论模型

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  $K(0 \leq K \leq 1)$  来表示其量子效率中指数掺杂成分所占的权重,用  $1-K$  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  $Y_{\text{RC}}$ ,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  $Y_{\text{RU}}$ ,则按照上述模型有

$$Y_{\text{RC}} = KY_{\text{RE}} + (1-K)Y_{\text{RU}}, \quad (7)$$

式中的  $Y_{\text{RU}}$  和  $Y_{\text{RE}}$  分别来自(4)和(6)式.  $K$  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.  $K$  越大,其贡献越大.掺杂方式不同,  $K$  的大小也不同.

## 3. 实验曲线拟合与结果

我们按图 1 的掺杂结构设计了一反射式梯度掺杂 GaAs 光电阴极样品,并对该样品进行了激活实验.图 2(a)是激活结束后原位测量的光谱响应曲线,图 2(b)为其对应的量子效率曲线<sup>[9]</sup>.利用(4),(6)(7)式,我们分别用三种方法对大量实验获得的

0.35 $\mu\text{m}$ , $1.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
0.30 $\mu\text{m}$ , $1.7 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
0.25 $\mu\text{m}$ , $2.7 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
0.20 $\mu\text{m}$ , $4.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
0.16 $\mu\text{m}$ , $5.5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
0.13 $\mu\text{m}$ , $7.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
0.11 $\mu\text{m}$ , $8.5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
0.10 $\mu\text{m}$ , $1.0 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$
p-GaAs (100) 衬底

图 1 GaAs 光电阴极掺杂结构示意图

量子效率曲线进行了拟合. 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  $L = 2.8 \mu\text{m}$ . 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  $K$  在整个入射光响应波段内不是一个固定的值. 因此我们采

用了分段拟合的方法, 选取的波段范围从 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) 中曲线进行拟合所得到的结果.

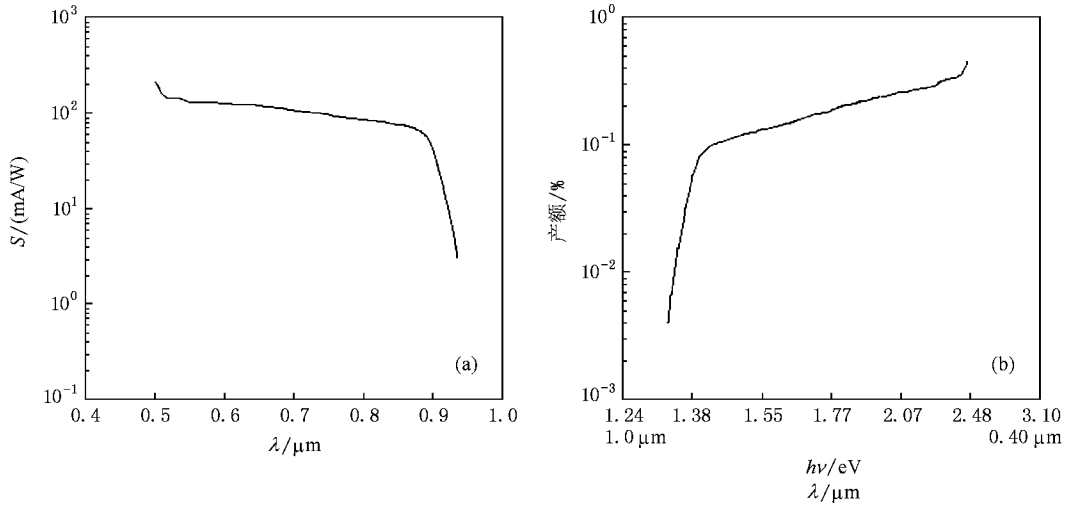


图 2 梯度掺杂 GaAs 光电阴极的光谱响应 (a) 光谱响应曲线 (b) 量子效率曲线

表 1 拟合结果统计

拟合方法		变掺杂模型		均匀掺杂公式			指数掺杂公式		
波长/nm	拟合精度	$P_0$	$K$	拟合精度	$P_0$	$K$	拟合精度	$P_0$	$K$
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	0.000124	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

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, 阴极的表面逸出概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 [8] 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  $K$  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, 同时不同的波段区间, 其大小又有差异.  $K$  值明显具有如下特点:

$$K(880-920) > K(720-840) > K(840-880), \\ K(600-720)$$

## 4. 讨 论

1) 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, 自身逸出概率较大, 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。

2)当入射光波长  $\lambda > 720 \text{ nm}$  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,以扩散加漂移的方式输运到表面,其扩散漂移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,逸出概率明显增加,量子效率的变掺杂特性在波段  $720\text{—}840 \text{ nm}$  范围内非常显著,因此拟合出的变掺杂系数  $K$  的值较大。

当  $\lambda > 840 \text{ nm}$  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  $840\text{—}880 \text{ nm}$  波长范围内, $K$  值接近于零。

当  $\lambda$  在  $880\text{—}920 \text{ nm}$  范围时,从  $K$  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,分析其原因可能是:在该波长范围内入射光的吸收深度( $1.887\text{—}11.36 \mu\text{m}$ )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概率显著提高,从而提高了该波段内的量子效率。

## 5. 结 论

本文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,并和用其他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,对深入开展变掺杂阴极的研究工作具有非常重要的意义。

- [1] Du X Q, Chang B K, Zou J J 2005 *Acta Opt. Sin.* **25** 1411 (in Chinese) [杜晓晴、常本康、邹继军 2005 光学学报 **25** 1411]
- [2] Zou J J, Chang B K 2006 *Opt. Eng.* **45** 054001
- [3] Zou J J, Chang B K, Yang Z 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2992 (in Chinese) [邹继军、常本康、杨 智 2007 物理学报 **56** 2992]
- [4] Su C Y, Spicer W E, Lindau I 1983 *J. Appl. Phys.* **54** 1413
- [5] Zou J J, Chang B K, Yang Z *et al* 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6109 (in Chinese) [邹继军、常本康、杨 智等 2007 物理学报 **56** 6109]
- [6] Guo L J, Wüstenberg J P, Andreyev O, Michael B, Martin A 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3200 (in Chinese) [郭立俊、Wüstenberg J P,

Andreyev O, Michael B, Martin A 2005 物理学报 **54** 3200]

- [7] Liu Y Z, Wang Z C, Dong Y Q 1995 *Electron Emission and Photocathode* (Beijing: Beijing University of Science and Technology Press) p308 (in Chinese) [刘元震、王仲春、董亚强 1995 电子发射与光电阴极(北京:北京理工大学出版社)第 308 页]
- [8] Zou J J, Chen H L, Chang B K, Wang S Y 2006 *Acta Opt. Sin.* **26** 1400 (in Chinese) [邹继军、陈怀林、常本康、王世允 2006 光学学报 **26** 1400]
- [9] Zou J J, Qian Y S, Chang B K, Wang H, Wang S Y 2006 *Chin. J. Vac. Sci. Technol.* **26** 172 (in Chinese) [邹继军、钱芸生、常本康、王 惠、王世允 2006 真空科学与技术学报 **26** 172]

# Study on the model of quantum efficiency of reflective varied doping GaAs photocathode<sup>\*</sup>

Niu Jun<sup>1,2)</sup> Yang Zhi<sup>1)</sup> Chang Ben-Kang<sup>1)†</sup> Qiao Jian-Liang<sup>1,2)</sup> Zhang Yi-Jun<sup>1)</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China*

<sup>2</sup> *Department of Electron and Electric, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China*

( Received 2 September 2008 ; revised manuscript received 8 October 2008 )

## Abstract

The theoretical model of quantum efficiency of the reflective varied doping GaAs photocathode is proposed, which adopts the weighted mean method based on the quantum efficiency formula of exponential doping and uniform doping photocathode. By this model the quantum efficiency curves of a reflective GaAs photocathode under varied doping structure have been fit and we obtained the precise best fit in different incident photon wavebands. The phenomena that the contributions of doping structures to the cathode quantum efficiency are different was discovered. This phenomena has been analysed and discussed detailedly in the paper.

**Keywords** : GaAs, varied doping, photocathode, quantum efficiency

**PACC** : 7960, 7280E, 7360L, 7320A

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60678043 ) and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China ( Grant No. 20050288010 ).

<sup>†</sup> E-mail : bkchang@mail.njust.edu.cn