

不同变掺杂结构 GaAs 光电阴极的光谱特性分析

牛 军^{1,2}, 乔建良^{1,2}, 常本康^{1*}, 杨 智¹, 张益军¹

1. 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094
2. 南阳理工学院电子与电气工程系, 河南 南阳 473004

摘 要 为定量研究变掺杂结构对阴极量子效率的作用效果, 设计生长了两种不同掺杂方式的反射式梯度掺杂 GaAs 光电阴极, 激活后测量了两者的光谱响应曲线。将光谱响应曲线转换为对应的量子效率曲线, 对不同入射光波段的量子效率进行了拟合分析, 得到了体现变掺杂结构贡献程度的变掺杂系数 K 值。研究发现, 同一阴极材料对不同波段的入射光, 其掺杂结构产生的作用效果各不相同。同时, 不同掺杂结构光电阴极对于相同波段范围内的入射光, 其作用效果也不相同。产生这些差别的根本原因, 是由于不同掺杂结构下, 材料中内建电场的位置和强度不同而造成的。该研究为评判不同掺杂方式下光电阴极的结构性能提供了有效的分析手段, 对研究阴极变掺杂结构的优化设计具有重要的应用价值。

关键词 GaAs 光电阴极; 变掺杂; 内建电场; 量子效率

中图分类号: TN223 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)11-3007-04

引 言

负电子亲和势 GaAs 光电阴极具有量子效率高、暗发射小和光谱响应曲线平坦等优点, 因而在高性能微光像增强器、自旋极化电子源等领域得到了广泛的应用^[1-4]。如何获得高量子效率的 GaAs 光电阴极一直是该领域近年来的重要研究方向。变掺杂光电阴极能够在材料内部形成内建电场, 从而能显著提高材料的量子效率^[5-7], 已成为当前研究的热点。然而有关变掺杂结构对于阴极量子效率的作用情况究竟如何, 不同掺杂方式之间效果有什么差别, 尚未有专门的研究报道。进行掺杂结构对阴极量子效率贡献大小的量化研究, 有助于进一步优化变掺杂结构设计, 改善材料特性, 从而最大程度地提高阴极的光电灵敏度, 因此具有极其重要的意义。光谱响应曲线对于研究物质的结构组成及其性能具有重要的价值^[8], 本文利用在线光谱响应测试仪^[9-12]测量了变掺杂 GaAs 光电阴极的光谱响应曲线, 对不同入射光波段的量子效率进行了拟合分析与对比研究。

1 实 验

分别按两种不同的掺杂结构设计了 2 个反射式 GaAs 光

电阴极样品, 并对其进行了激活实验。样品掺杂结构如图 1 所示。样品在激活前先进行化学清洗, 清洗后迅速将其送至激活系统的加热位置, 当超高真空系统的本底真空度不低于 1×10^{-7} Pa 时进行加热净化。高、低温净化温度分别为 640 和 580 °C。加热净化结束, 待样品自然冷却到 60 °C 左右开始激活, 激活时, 用一个 12 V/50 W 的卤钨灯照射阴极面, 通过观察阴极产生的光电流曲线来决定 Cs 和 O 的进或停。激活采用 Cs 源连续, O 源断续的方法来进行。激活结束后, 我们在激活台内利用在线光谱响应测试仪^[8-11]测量了阴极的光谱响应曲线, 结果如图 2 所示。其中曲线 1 是样品 1 的光谱响应曲线, 曲线 2 是样品 2 的光谱响应曲线。

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

sample 1

sample 2

Fig. 1 Doping structure diagram of GaAs photocathode

收稿日期: 2008-08-10, 修订日期: 2008-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(60678043)和教育部高等学校博士点基金项目(20050288010)资助

作者简介: 牛 军, 1971 年生, 南京理工大学电子工程与光电技术学院博士研究生 e-mail: nyistnj@163.com, nyistnj@yahoo.cn

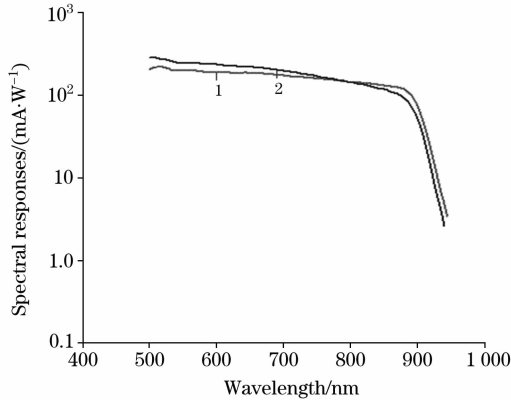


Fig. 2 Spectral response curves of two samples
1: Sample 1; 2: Sample 2

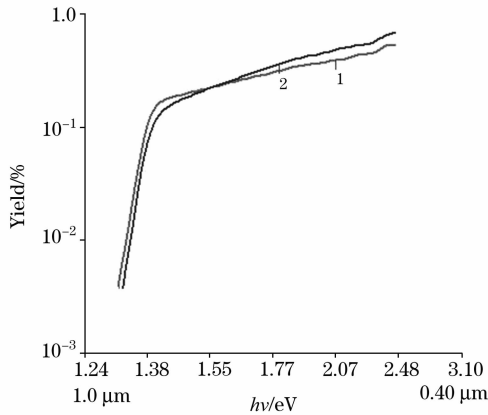


Fig. 3 Quantum efficiency curves of two samples
1: Sample 1; 2: Sample 2

2 实验结果分析

光谱响应是光电阴极的一项重要指标,它直观形象地反映了阴极的光电发射性能。图 2 中两样品的光谱响应特性参数分别如表 1 所示。

Table 1 Comparison of spectral response performance parameters

曲线	光谱响应特性				积分灵敏度 ($\mu\text{A} \cdot (\text{lm})^{-1}$)
	起始波长/nm	截止波长/nm	峰值响应 ($\text{mA} \cdot \text{W}^{-1}$)	峰值位置/nm	
1	500	950	251.6	510	1 687
2	500	965	315.5	510	1 790.1

对阴极光谱响应特性的研究,主要通过将其转换成量子产额曲线,用曲线拟合的方法计算出一些反映阴极性能的重要参数,如电子表面逸出概率、少子扩散漂移长度、掺杂系数等。对图 2 的曲线转换后,得到图 3 所示的量子效率曲线。对量子效率曲线的拟合,是利用所建立的反射式变掺杂光电阴极量子效率理论模型进行的,该模型如式(1)所示。

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

(1)式中, Y_{RE} 为指数掺杂阴极的量子效率; Y_{RU} 为均匀掺杂阴极的量子效率; Y_{RG} 为变掺杂阴极的量子效率; K 为变掺杂系数,取值在 0~1 之间,表示阴极量子效率中指数掺杂成分所占的权重; $1-K$ 表示均匀掺杂成分所占的权重。对于反射式 GaAs 光电阴极有^[6,13]

$$Y_{\text{U}} = \frac{P \cdot (1-R)}{1 + 1/\alpha_{\text{b}}L_{\text{D}}} \quad (2)$$

$$Y_{\text{E}} = \frac{P(1-R)\alpha_{\text{b}}L_{\text{D}}}{\alpha_{\text{b}}^2L_{\text{D}} - \alpha_{\text{b}}L_{\text{E}} - 1} \times \left\{ \frac{N(S - \alpha_{\text{b}}D_{\text{n}})\exp[(L_{\text{E}}/2L_{\text{D}}^2 - \alpha_{\text{b}})T_{\text{e}}]}{M} - \frac{Q}{M + \alpha_{\text{b}}L_{\text{D}}} \right\} \quad (3)$$

(3)式中

$$L_{\text{E}} = \mu |E| \tau = \frac{q |E|}{k_{\text{0}}T} L_{\text{D}}^2,$$

$$N = \sqrt{L_{\text{E}}^2 + 4L_{\text{D}}^2}, S = S_{\text{V}} + \mu |E|,$$

$$M = (ND_{\text{n}}/L_{\text{D}}) \cosh(NT_{\text{e}}/2L_{\text{D}}^2) +$$

$$(2SL_{\text{D}} - D_{\text{n}}L_{\text{E}}/L_{\text{D}}) \sinh(NT_{\text{e}}/2L_{\text{D}}^2),$$

$$Q = SN \cosh(NT_{\text{e}}/2L_{\text{D}}^2) +$$

$$(SL_{\text{E}} + 2D_{\text{n}}) \sinh(NT_{\text{e}}/2L_{\text{D}}^2)$$

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, α_{b} 为阴极对入射能量为 $h\nu$ 的光子的吸收系数, L_{E} 为电子在电场 E 作用下的牵引长度, L_{D} 是阴极材料电子扩散长度。

根据文献^[14]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 λ 近似满足指数关系, $P(\lambda)$ 具有(4)式的形式

$$P(\lambda) = P_{\text{0}} \exp[-k(\lambda - \lambda_{\text{0}})] \quad (4)$$

将(4)式中的 P 转换为入射光子能量 $h\nu$ 的函数,则可以得到(5)式

$$P(h\nu) = P_{\text{0}} \exp\left[-k\left(\frac{1}{h\nu} - \frac{1}{h\nu_{\text{0}}}\right)\right] \quad (5)$$

因此,反射式均匀掺杂 GaAs 光电阴极量子效率公式可转换为(6)式所示的形式

$$Y_{\text{RU}}(h\nu) = \frac{P_{\text{0}} \exp\left[-k\left(\frac{1}{h\nu} - \frac{1}{h\nu_{\text{0}}}\right)\right](1-R)}{1 + 1/\alpha_{\text{b}}L_{\text{D}}} \quad (6)$$

同样可得修正后的反射式梯度掺杂 GaAs 光电阴极的量子效率,如(7)式所示

$$Y_{\text{RE}}(h\nu) = \frac{P_{\text{0}} \exp\left[-k\left(\frac{1}{h\nu} - \frac{1}{h\nu_{\text{0}}}\right)\right](1-R)\alpha_{\text{b}}L_{\text{D}}}{\alpha_{\text{b}}^2L_{\text{D}}^2 - \alpha_{\text{b}}L_{\text{E}} - 1} \times \left\{ \frac{N(S - \alpha_{\text{b}}D_{\text{n}})\exp[(L_{\text{E}}/2L_{\text{D}}^2 - \alpha_{\text{b}})T_{\text{e}}]}{M} - \frac{Q}{M + \alpha_{\text{b}}L_{\text{D}}} \right\} \quad (7)$$

对两个阴极样品,我们均采用了分波段拟合的方法,波段范围为 600~920 nm,每 40 nm 为一波段区间单独进行拟合仿真,这样既保证了拟合精度,又能反映出阴极材料的结构特性。拟合时设定电子扩散长度 $L_{\text{D}}=300$ nm,拟合结果见表 2。

分析表 1 和表 2 中的数据可以得出如下结论。

Table 2 Results of simulation of photocathode parameter

波长/nm	样品 1		样品 2	
	P	K	P	K
560~600	0.65	0.01	0.8	0.01
600~640	0.61	0.06	0.69	0.92
640~680	0.57	0.0	0.63	0.999 9
680~720	0.52	0.05	0.58	0.999 9
720~760	0.44	0.92	0.52	0.999 9
760~800	0.41	0.95	0.47	0.95
800~840	0.39	0.87	0.44	0.999 9
840~880	0.4	0.03	0.41	0.68
880~920	0.41	0.999 9	0.44	0.999 9

(1)同一掺杂结构阴极在不同入射光波段区间内,其对阴极量子效率的贡献大小是不同的。样品 1 在入射光波长 $\lambda < 720$ nm 时,阴极的内建电场作用效果很小,变掺杂结构特性得不到体现,当波长在 720~840 nm 和 880~920 nm 范围时,变掺杂结构特性很明显,对阴极量子效率的贡献非常大;样品 2 则在入射光波长为 600~920 nm 范围时,其内建电场的作用效果均非常显著。

(2)对总浓度差相同的变掺杂光电阴极,其掺杂结构不同,作用效果也不相同。从表 2 中看,样品 2 的掺杂结构对阴极量子效率的贡献明显要比样品 1 大,同时表 1 中的数据也表明,样品 2 的阴极积分灵敏度确实比样品 1 的大。

3 讨论

两种掺杂结构作用效果不同的根本原因,是它们在材料内部形成的能带弯曲的位置和幅度大小各不相同(如图 4 和图 5 所示),因此对相同波段的入射光子,其作用效果不一样。

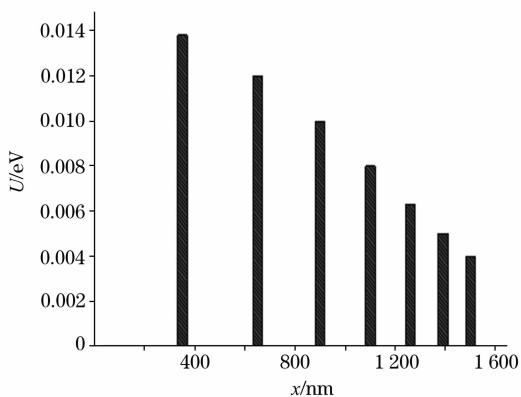


Fig. 4 Position and value of the energy-band bend inside sample 1

对样品 1 来说:(1)当入射光波长 $\lambda < 720$ nm 时,材料对光的吸收深度最远只到 $0.5 \mu m$ 处,从样品 1 的掺杂结构图可以看出,此时的内建电场非常微弱,同时光电子的能量也都比较高,又都分布于近表面,逸出概率较大,所以内建电场对阴极的量子效率没有什么贡献;(2)当入射光波长 $\lambda > 720$ nm 时,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,光的吸收深度也越来越大,所生光电子位置距离表面越来越远,同时内建电场强度逐渐增大,对光电子能量有明显提高。所以光电子在内建电场作用下,以漂移加扩散的方式运输到表面,其漂移扩散长度较无电场作用的扩散长度要大,同时能量也有所提高,逸出概率大大增加,对阴极量子效率的贡献也就明显变大;(3)入射光波长在 840~880 nm 范围内时,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 K 值接近于零。

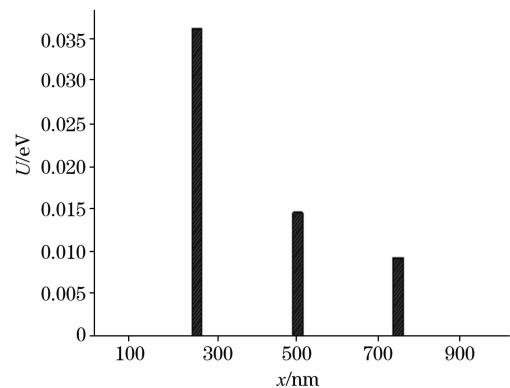


Fig. 5 Position and value of the energy-band bend inside sample 2

对样品 2 而言,由于其掺杂结构的第一层厚度只有 $0.25 \mu m$,且第二层和第一层之间的浓度差比较大,所产生的内建电场比较强,当入射光波长 > 600 nm 时,内建电场对光电子的作用效果已非常明显,所以对阴极量子效率的贡献非常显著。

从图 2 的光谱响应曲线可以看出,当 $\lambda < 840$ nm 时,样品 2 的光谱响应明显高于样品 1,这与上面对样品 2 的分析完全一致。但当 $\lambda > 840$ nm 时,样品 2 的长波响应明显不如样品 1,这是因为样品 2 的厚度只有 $1 \mu m$,此时入射光的吸收深度已超出了阴极的厚度,从而导致阴极对该波段内的光谱响应有很大程度的缺失。因此,对于样品 2 的结构设计,我们可以采取增加阴极厚度的办法来进行优化。

4 结论

通过对两种不同掺杂结构 GaAs 光电阴极激活后的光谱响应曲线进行对比分析,并利用变掺杂光电阴极量子效率的仿真模型,对其对应的量子效率曲线进行了阴极参数的拟合计算,得到了体现变掺杂结构贡献程度的重要参数 K ,通过对不同掺杂结构下 K 值随入射光波段不同而变化的情况,定量地剖析了材料中内建电场对阴极量子效率的作用效果。研究结果能够反映出阴极材料变掺杂结构设计的合理之处以及存在的缺陷,为进一步优化结构设计,提供了重要的理论指导依据。

参 考 文 献

- [1] Mulhollan G A, Subashiev A V, Clendenin J E, et al. Phys. Lett. A, 2001, 282: 309.
- [2] Drouhin H J, Hermann C, Lampel G. Phys. Rev. B, 1985, 31(6): 3859.
- [3] Su C Y, Lindau I, Spicer W E. Chem. Phys. Lett., 1982, 87(6): 523.
- [4] Su C Y, Spicer W E, Lindau I. J. Appl. Phys., 1983, 54(3): 1413.
- [5] DU Xiao-qing, CHANG Ben-kang, ZOU Ji-jun(杜晓晴, 常本康, 邹继军, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2005, 25(10): 1411.
- [6] ZOU Ji-jun, CHANG Ben-kang, YANG Zhi(邹继军, 常本康, 杨 智). Acta Physica Sinica(物理学报), 2007, 56(5): 2992.
- [7] Zou Jijun, Chang Benkang. Optical Engineering, 2006, 45(5): 054001.
- [8] ZOU Ji-jun, CHANG Ben-kang, DU Xiao-qing, et al(邹继军, 常本康, 杜晓晴, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2007, 27(8): 1465.
- [9] Chang Benkang, Du Xiaoping, Liu Lei, et al. Proc. SPIE, 2003, 5209: 209.
- [10] ZONG Zhi-yuan, QIAN Yun-sheng, CHANG Ben-kang. Proc. SPIE, 2001, 4580: 623.
- [11] QIAN Yun-sheng, ZONG Zhi-yuan, CHANG Ben-kang(钱芸生, 宗志园, 常本康). Vacuum Science and Technology(真空科学与技术), 2000, 20(5): 305.
- [12] ZOU Ji-jun, CHANG Ben-kang, YANG Zhi, et al(邹继军, 常本康, 杨 智, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2007, 56(10): 6109.
- [13] LIU Yuan-zhen, WANG Zhong-chun, DONG Ya-qiang(刘元震, 王仲春, 董亚强). Electron Emission and Photocathode(电子发射与光电阴极). Beijing: Beijing University of Science and Technology Press(北京: 北京理工大学出版社), 1995. 308.
- [14] ZOU Ji-jun, CHEN Huai-lin, CHANG Ben-kang, et al(邹继军, 陈怀林, 常本康, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2006, 26(9): 1400.

Analysis of Spectral Performance of Varied-Doping GaAs Photocathodes

NIU Jun^{1,2}, QIAO Jian-liang^{1,2}, CHANG Ben-kang^{1*}, YANG Zhi¹, ZHANG Yi-jun¹

1. Institute of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China
2. Department of Electronic and Electrical Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China

Abstract For a quantitative analysis of the effect of varied doping structure on the quantum efficiency of cathode, two kinds of reflective gradient doping GaAs photocathode samples were designed and grown respectively. After activation, the dynamic spectral response curves of the two samples were obtained. The spectral response curves were transformed into quantum efficiency curves. The quantum efficiency curves in different wavebands were fit, and the varied doping coefficient K that reflects the contribution of the varied doping structure to the cathode quantum efficiency was obtained. Results show that, the functional effects of the same material varied doping structure responding to the incident photon of different wavebands are different from each other. The same is true for the different material varied doping structures responding to the same waveband incident photon. The fundamental reasons for these differences are that the positions and the intensities of the inside electric fields which build within the materials under different varied doping structures are different from each other. It offers an effective analysis means to evaluate the structure performance of cathodes grown under different doping ways, and has great value for the study on optimization design of cathode varied doping structure.

Keywords GaAs photocathode; Varied doping; Built-in electric field; Quantum efficiency

(Received Aug. 10, 2008; accepted Nov. 20, 2008)

* Corresponding author