

文章编号: 0253-2239(2005)10-1411-4

# 利用梯度掺杂获得高量子效率的 GaAs 光电阴极\*

杜晓晴 常本康 邹继军 李 敏

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

**摘要:** 获得高量子效率且稳定性良好的阴极一直是近年来发展 GaAs 光电阴极的重要方向。对晶面为(100), 掺杂 Be, 厚度为 1  $\mu\text{m}$  分子束外延生长的反射式 GaAs 发射层, 设计了一种从体内到表面掺杂浓度由高到低分布的新型梯度掺杂结构。掺杂浓度的范围从  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  到  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 并利用(Cs,O)激活技术制备了 GaAs 光电阴极。光谱响应测试曲线显示, 与传统均匀掺杂的 GaAs 光电阴极相比, 梯度掺杂的 GaAs 光电阴极的量子效率在整个波段都有提高, 积分灵敏度可达  $1580 \mu\text{A}/\text{lm}$ , 且具有更好的稳定性。讨论了这种新型 GaAs 光电阴极获得更高量子效率的内在机理。该设计结构是现实可行的, 且具有很大发展潜力, 它为国内发展高性能 GaAs 光电阴极提供了一条重要途径。

**关键词:** 光电子学; GaAs 光电阴极; 量子效率; 梯度掺杂; 激活; 光谱响应; 积分灵敏度

中图分类号: TN214 文献标识码: A

## High Quantum Efficiency GaAs Photocathode by Gradient Doping

Du Xiaoqing Chang Benkang Zou Jijun Li Min

(*Institute of Electronic Engineering and Optoelectronics Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094*)

**Abstract:** To achieve high quantum efficiency and good stability has been a main direction to develop GaAs photocathode recently. For a molecular beam epitaxy grown, (100) wafer, Be doping and 1  $\mu\text{m}$  thickness reflection-mode GaAs emission layer, a new-type gradient doping structure, in which from GaAs bulk to surface doping concentrations are distributed gradiently from  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  to  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , was designed. And the new-type GaAs emission layer was prepared into photocathode by (Cs,O) activation technique. The spectral response curves show that compared to common uniform doping GaAs photocathode, the quantum efficiency of gradient doping GaAs photocathode is increased within whole response waveband, with integral sensitivity of  $1580 \mu\text{A}/\text{lm}$ , and the photocathode also behaves more stable, which proved that the new-type gradient doping structure is executable and practical, has great potential, and the development of it provides an important approach to development of the national GaAs photocathode with high performance. The inherent reasons why the new-type GaAs photocathode obtained higher quantum efficiency were also discussed.

**Key words:** optoelectronics; GaAs photocathode; quantum efficiency; gradient doping; activation; spectral response; integral sensitivity

## 1 引 言

GaAs 光电阴极是一种负电子亲和势(NEA)光电阴极, 具有高量子效率、低暗噪声、光谱响应范围宽、光电发射电子能量和角度分布集中等众多优点, 在光电探测器件、半导体敏感器件以及高能物理电子源等众多领域得到了广泛应用。

获得高量子效率且稳定性良好的阴极一直是近年来发展 GaAs 光电阴极的重要方向。GaAs 光电阴极量子效率的提高主要依赖于电子扩散长度和电子表面逸出几率的提高。要获得大的扩散长度要求 GaAs 材料具有低的 p 型掺杂浓度, 但为了获得窄的表面能带弯曲区, 以减小电子散射, 提高电子逸出

\* 十五国防科技预研重点项目(404050501D)资助课题。

作者简介: 杜晓晴(1978~), 重庆人, 南京理工大学博士研究生, 主要从事高性能 GaAs 光电阴极方面的研究。

E-mail: muyuandu@sina.com

收稿日期: 2004-11-29; 收到修改稿日期: 2005-03-12

几率,又要求 GaAs 材料具有高的 p 型掺杂浓度。

曾有人提出表面高浓度掺杂<sup>[2]</sup>,体内低浓度掺杂的掺杂方案。但能带结构图指出,这将导致体内到表面的能带向上弯曲,形成电子势垒,阻碍电子的逸出。

本文提出了一种由体内到表面掺杂浓度由高到低的梯度掺杂结构,以提高 GaAs 光电阴极的量子效率。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的向下能带弯曲。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,从而大大提高体内电子到达表面的输运效率。

## 2 实 验

### 2.1 GaAs 发射层的梯度掺杂结构

在半绝缘的 GaAs 衬底上,利用北京半导体研究所提供的分子束外延(MBE)系统生长晶面为(100)的反射式 GaAs 发射层材料。GaAs 的 p 型掺杂元素为 Be。由于该系统目前最高 Be 掺杂浓度为  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ,因此选取梯度掺杂结构中体内最高掺杂浓度为  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。同时,如果表面掺杂浓度降低会带来电子表面逸出几率的减小,因此将表面最低掺杂浓度限制在  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  范围内。为了使相邻掺杂区域的浓度梯度一致,在  $1 \times 10^{18} \sim 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  范围内依次设计了  $7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、 $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  的掺杂浓度,并将  $1 \mu\text{m}$  厚度的发射层等分成四层,每层  $0.25 \mu\text{m}$ ,依次进行上述浓度由高到低的掺杂,梯度掺杂结构示意图如图 1 所示。为了进行对照,实验生长了同样掺杂元素、晶面、厚度的均匀掺杂样品,掺杂浓度为  $9.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,该掺杂浓度是均匀掺杂 GaAs 光电阴极能获得最高量子效率的一个取值<sup>[3,4]</sup>。

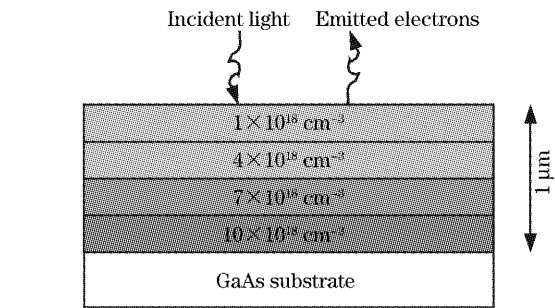
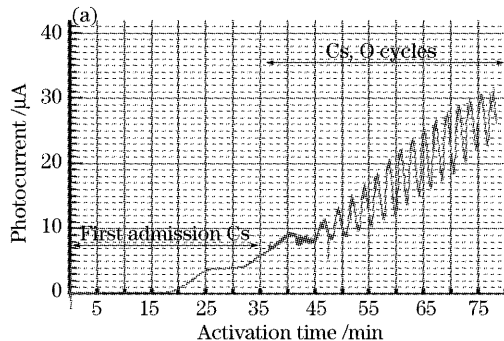


图 1 GaAs 发射层的梯度掺杂结构  
Fig. 1 Gradient doping structure of GaAs emission layer

### 2.2 GaAs 光电阴极的制备

对梯度掺杂和均匀掺杂的 GaAs 光电阴极均采用相同的制备方法。首先用 HF 酸对阴极材料表面进行化学清洗,去除玷污在表面上少量的油脂。然后用去离子水冲洗,吹干后送入超高真空系统(UHV)中加热净化,去除外延片表面上各种氧化物,获得原子级清洁表面。加热温度为  $625 \text{ }^\circ\text{C}$ ,时间  $10 \sim 20 \text{ min}$ 。加热净化前超高真空系统的本底真空度为  $1 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ ,净化过程中真空度不低于  $1 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ 。

加热净化结束,待样品自然冷却到室温后开始 Cs, O 激活,此时真空度回复到  $1 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ 。激活采用 Cs 源持续, O 源断续的方法进行。在第一步进铯过程中待光电流升至峰值,再降至峰值的 70% 左右时开始进氧。此时光电流会升至一个新的峰值,到达峰值时停氧,待光电流再次降到峰值 70% 左右时再次进氧,不断重复上述过程,直至最近两次交替所达峰值几乎相等时结束交替过程,通常需要交替  $10 \sim 15$  次。最后短时间暴露于 Cs 蒸气而结束激活。激活过程中光电流随时间的变化曲线如图 2 所示。图 2(a) 材料为梯度掺杂样品,图 2(b) 材料为均匀掺杂样品。在制备结束后,利用自行研制的光谱响应测试仪<sup>[5~8]</sup>对 GaAs 光电阴极的光谱响应进行了测试。

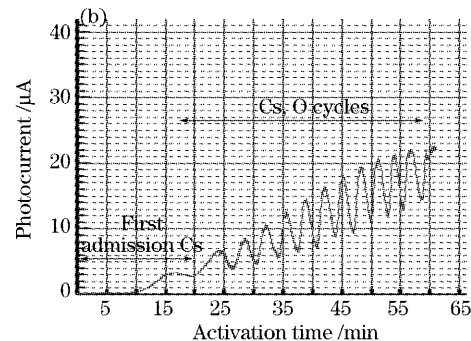


图 2 光电流随激活时间的变化曲线。(a) 梯度掺杂样品, (b) 均匀掺杂样品

Fig. 2 Variation curves of photocurrent with activation time. (a) gradient doping sample, (b) uniform doping sample

### 3 实验结果

图 3(a)为激活结束后 GaAs 光电阴极的光谱响应曲线,图 3(b)为对应的量子效率曲线。曲线 1 为梯度掺杂样品,曲线 2 为均匀掺杂样品。两条曲线对应的光谱响应特性参量如表 1 所示。

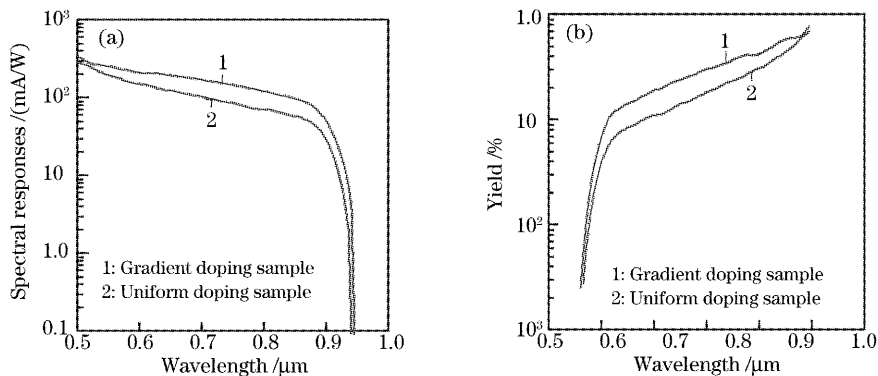


图 3 GaAs 光电阴极的光谱响应。(a)光谱响应曲线,(b)量子效率曲线

Fig. 3 Spectral response of GaAs photocathodes. (a) Spectral response curve, (b) quantum efficiency curve

表 1 光谱响应特性参量比较

Table 1 Compare of spectral response performance parameters

Curve	1	2
Start wavelength / $\mu\text{m}$	0.5	0.5
Cut-off wavelength / $\mu\text{m}$	0.940	0.935
Peak response / (mA/W)	341	297
Peak position / $\mu\text{m}$	0.5	0.5
Integral sensitivity / ( $\mu\text{A}/\text{lm}$ )	1580	1012

对这两种阴极在强光照下的稳定性的测试结果如图 4 所示。可以看到梯度掺杂的 GaAs 光电阴极在强光照下的灵敏度衰减速率明显小于均匀掺杂 GaAs 光电阴极。

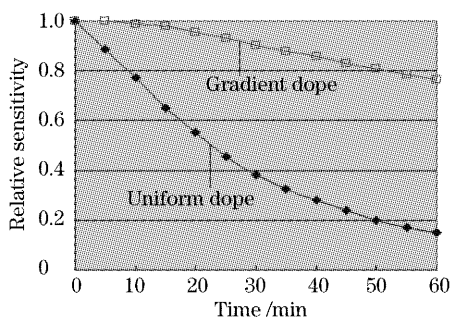


图 4 强光照下 GaAs 光电阴极灵敏度随时间的衰减

Fig. 4 Degradation of sensitivity of GaAs photocathode with time under strong illumination

### 4 讨论

由 GaAs 光电阴极的光电发射理论以及反射式 GaAs 光电阴极的理论量子效率公式<sup>[2]</sup>:

可以看到,梯度掺杂的 GaAs 光电阴极的灵敏度达到  $1580 \mu\text{A}/\text{lm}$ ,是均匀掺杂样品灵敏度的 1.5 倍多。这证明梯度掺杂的 GaAs 光电阴极是现实可行的,具有比传统均匀掺杂的 GaAs 光电阴极更高的量子效率。

$$\gamma_r = \frac{P \cdot (1 - R)}{1 + 1/\alpha L_D}, \quad (1)$$

式中  $P$  为电子的表面逸出几率, $L_D$  为电子扩散长度, $R$  为 GaAs 光电阴极表面的反射率, $\alpha$  为 GaAs 材料的光谱吸收系数。

由(1)式可知,电子表面逸出几率决定了量子效率曲线的高度,而电子扩散长度决定了量子效率曲线在长波段的响应高度。

比较图 3 的两条光谱响应测试曲线,曲线 1 比曲线 2 高,说明梯度掺杂 GaAs 光电阴极的表面逸出几率比均匀掺杂的阴极高;这种增长幅度在不同波段也不同,其中  $0.7 \sim 0.8 \mu\text{m}$  波段内的光谱响应增长幅度较大,说明两种阴极的电子扩散长度也存在差异。

由(1)式,对图 3(b)的量子效率曲线进行拟合,可以获得阴极的电子扩散长度  $L_D$  和电子表面逸出几率  $P$  的大小<sup>[4]</sup>。拟合的波段选取  $0.7 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 。该入射波段下,光电子都在导带底  $\Gamma$  热化,量子效率将主要受到体内电子扩散长度的影响<sup>[4]</sup>。拟合结果如表 2 所示。

表 2 阴极参量拟合结果

Table 2 Results of simulation of photocathode parameters

Sample	$P$	$L_D/\mu\text{m}$
Uniform doping	0.3	1.0
Gradient doping	0.46	1.4

可见,梯度掺杂一方面增加了电子扩散长度,另一方面大大提高了电子表面逸出几率。由于体内低掺杂浓度都在  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  范围内,因此电子扩散长度

的提高不大,主要在 GaAs 光电阴极的长波响应的提高上得到发挥。但电子表面逸出几率提高很明显。

电子表面逸出几率主要由到达阴极表面的电子能量分布和表面势垒的形状决定<sup>[4]</sup>。在梯度掺杂的 GaAs 光电阴极中,两个不同掺杂浓度区域交界面会由于费米能级拉平效应,形成一个由高掺杂到低掺杂,即体内到表面的向下的能带弯曲。内建电场将有利于体内电子向表面的迁移。能带结构示意图如图 5 所示。这种内建电场的作用与外加电场的场

助光电阴极的效应类似<sup>[9]</sup>,体内光生电子将以扩散和定向漂移两种方式到达表面,提高了到达阴极表面的光电流,另一方面内建电场提高了到达阴极表面的电子能量,使得高能电子增多,更容易越过表面势垒而逸出。虽然表面的低掺杂会使得阴极表面的低能电子增多,但这种负效应完全可以通过内建电场效应得到补偿。因此最终到达阴极表面的电子能量分布在高电子能量下具备一个较大的光电流密度,从而获得较大的电子表面逸出几率。

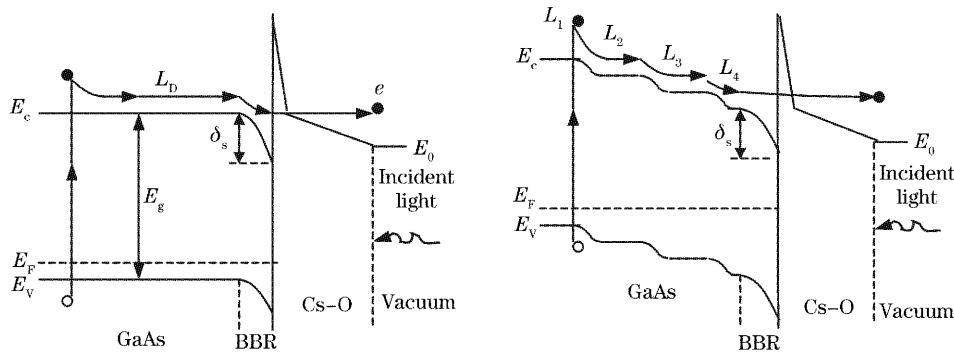


图 5 GaAs 光电阴极光电发射能带结构。(a)均匀掺杂样品,(b)梯度掺杂样品

Fig. 5 Energy-band structure of photoemission of GaAs photocathode. (a) Uniform doping sample, (b) gradient doping sample

强光照阴极稳定性测试中,阴极表面势垒由于 Cs 的脱附等因素而发生变化<sup>[10]</sup>。在表面势垒变化情况下,由于梯度掺杂提高了阴极表面电子能量,它们受到表面势垒变化的影响也较小,因此梯度掺杂阴极比均匀掺杂阴极表现出了更好的稳定性。

## 5 结 论

本文利用梯度掺杂设计了一种 GaAs 光电阴极,并成功进行了制备。与传统均匀掺杂的 GaAs 光电阴极相比,这种新型结构的阴极具有更高的量子效率以及更好的稳定性。这些性能的提高可以从梯度掺杂提高了电子扩散长度,以及梯度掺杂产生了内建电场,在内建电场作用下高能电子数增加,电子表面逸出几率因此获得提高来解释。梯度掺杂 GaAs 光电阴极的开发为当前发展高性能阴极提供了一个重要的可行途径。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Qi, Huang Hui, Wang Xingyan *et al.*. Novel InP-based resonant cavity enhanced photodetectors for long-wavelength applications[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1487~1490 (in Chinese)  
王琦,黄辉,王兴妍等. 新型长波长 InP 基谐振腔增强型光探测器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1487~1490
- 2 Liu Yuanzheng, Wang Zhongchun, Dong Yaqiang. *Electron Emission and Photocathode* [M]. Beijing: Beijing University of

- Science and Technology Press, 1995
- 刘元震,王仲春,董亚强. 电子发射与光电阴极[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995
- 3 G. Vergara, L. J. Gomez, J. Capmany *et al.*. Influence of the dopant concentration on the photoemission in NEA GaAs photocathodes[J]. *Vacuum*, 1997, **48**(2): 155~160
- 4 German Vergara, Alberto Herrera Gomez, William E. Spicer. Escape probability for negative electron affinity photocathodes: calculations compared to experiments[C]. *Proc. SPIE*, 1995, **2550**: 142~156
- 5 Qian Yunsheng, Zong Zhiyuan, Chang Benkang. On-line measurement of spectral response of GaAs photocathodes[J]. *Vacuum Science and Technology*, 2000, **20**(5): 305~307 (in Chinese)  
钱芸生,宗志园,常本康. GaAs 光电阴极原位光谱响应测试技术研究[J]. *真空科学与技术*, 2000, **20**(5): 305~307
- 6 Chang Benkang, Xu Denggao, Qian Yunsheng *et al.*. Peak value position shifting of spectral response multialkali photocathodes [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(2): 233~237 (in Chinese)  
常本康,徐登高,钱芸生等. 多碱光电阴极光谱响应峰值位置移动技术研究[J]. *光学学报*, 1998, **18**(2): 233~237
- 7 Zong Zhiyuan, Chang Benkang. Calculation the quantum yield of NEA photocathode by integral[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(9): 1177~1182 (in Chinese)  
宗志园,常本康. 用积分法推导 NEA 光电阴极的量子产额[J]. *光学学报*, 1999, **19**(9): 1177~1182
- 8 Li Wei, Zong Zhiyuan, Chang Benkang. Spectral matching factors of S<sub>25</sub> photocathodes for reflection spectrum of objects I. Dark green paint and green vegetation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(2): 279~282 (in Chinese)  
李蔚,宗志园,常本康. S<sub>25</sub> 光电阴极与景物反射光谱的光谱匹配系数 I. 暗绿色涂层和绿色草木[J]. *光学学报*, 2000, **20**(2): 279~282
- 9 Lihui Guo, Jinmin Li, Hou xun. The quantum efficiency of field-assisted transmission-mode GaAs photocathodes [ J ]. *Semiconductors Science and Technology*, 1989, **4**(6): 498~499
- 10 Tailiang Guo. The adsorption of Cs and O<sub>2</sub> on a clean GaAs (110) surface under light illumination[J]. *J. Vac. Sci. Technol. (A)*, 1989, **7**(3): 1563~1567