

# 不同掺杂砷化镓光电阴极光电发射性能分析

赵 静<sup>1</sup> 覃 翠<sup>1</sup> 刘伟伟<sup>1</sup> 余辉龙<sup>1</sup> 瞿文婷<sup>2</sup> 常本康<sup>2</sup> 张益军<sup>2</sup>

<sup>1</sup>南京工程学院通信工程学院, 江苏 南京 211167

<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** 采用分子束外延技术制备了具有相同的均匀掺杂或指数掺杂的反射式(r-mode)和透射式(t-mode)GaAs光电阴极样品。利用在线光谱响应测试系统测试了它们的光谱响应,并对实验曲线进行拟合,得到了电子扩散长度和积分灵敏度。结果表明,经工艺处理后的t-mode样品,在均匀掺杂情况下其电子扩散长度的减小量是指数掺杂情况的两倍,积分灵敏度的降低量后者比前者少3%,因此指数掺杂方式有利于降低组件制备工艺对阴极材料发射层的影响。

**关键词** 光学器件; GaAs光电阴极; 掺杂方式; 量子效率拟合; 电子扩散长度; 积分灵敏度

**中图分类号** O462.3 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.1023001

## Photoemission Performance Analysis of GaAs Photocathodes with Different Doping Concentrations

Zhao Jing<sup>1</sup> Qin Cui<sup>1</sup> Liu Weiwei<sup>1</sup> Yu Huilong<sup>1</sup>

Qu Wenting<sup>2</sup> Chang Benkang<sup>2</sup> Zhang Yijun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Communication Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, Jiangsu 211167, China

<sup>2</sup>School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

**Abstract** By molecular beam epitaxy technology, reflection-mode (r-mode) and transmission-mode (t-mode) GaAs photocathode samples with identical uniform doping or exponential doping are prepared. Their spectral response are measured based on the on-line spectral response measuring system and via fitting to the experimental curves, the electron diffusion length and integral sensitivity are obtained. These results indicate that, after the cathode module processing of the t-mode sample, the decrease of the electron diffusion length for sample with uniform doping is twice that for sample with exponential doping, the reduction of the integral sensitivity for the latter is smaller by 3% than that for the former. The exponential doping way is beneficial to reducing the influence of cathode module process on photoemission layer of photocathode materials.

**Key words** optical devices; GaAs photocathode; doping way; quantum efficiency fitting; electron diffusion length; integral sensitivity

**OCIS codes** 230.0250; 040.3780; 040.5160

## 1 引 言

III-V族半导体中的负电子亲和势(NEA)光电阴极具有积分灵敏度高、自旋极化强、响应波长宽等特点,在很多方面得到了广泛应用。近年来,人们对砷化镓(GaAs)光电阴极的性能、制备工艺、结构等展开了研究<sup>[1-10]</sup>。文献[11]采用指数掺杂结构设计发射层,该设计能有效提高阴极的量子效率,这是因为变掺杂设计可使发射层由体内到表面形成梯度变化能带,形成的内建电场有利于提高电子向表面的扩散长度和几率。增强器中的光电阴极通常采用透射式(t-mode)结构,因此人们更关注透射式GaAs光电阴极在光谱响应上

**收稿日期:** 2016-04-25; **收到修改稿日期:** 2016-05-26

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(91433108)、国家自然科学基金青年科学基金(61301023)、江苏省南京工程学院引进人才科研启动基金(YKJ201323, YKJ201419)

**作者简介:** 赵 静(1986—),女,博士,讲师,主要从事光电子材料与器件方面的研究。E-mail: zhaojing7319@njit.edu.cn

的提高<sup>[12-13]</sup>。而在组件制备的过程中,需要将透射式外延层材料加工成阴极组件,这一步骤会造成光电发射性能的降低。

利用薄膜等效矩阵分析了反射式(r-mode)和透射式光电阴极的结构差异与联系,给出了不同结构光电阴极的量子效率公式。实验制备了反射式均匀掺杂、透射式均匀掺杂、反射式指数掺杂、透射式指数掺杂这4种类型的GaAs光电阴极,测量了各样品的实验光谱响应曲线。最后,对各样品结构、性能曲线、拟合参数进行分析,探索了在不同工作模式下,掺杂浓度差异对阴极光电发射性能的影响。

## 2 理论计算

### 2.1 光学结构计算

反射式和透射式GaAs光电阴极结构如图1所示,其中I表示光子入射,R表示反射式阴极中光电子出射,T表示透射式阴极中光电子出射。透射式GaAs光电阴极是玻璃/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>增透膜/GaAlAs窗口层/GaAs发射层的4层膜结构,玻璃层相对于其他几个薄膜层来说非常厚,可以看作光子进入到光电阴极的入射介质,然后光电子依次通过其他三个薄膜层,最后从空气中射出。在计算时乘以一个调整因子(常数),以抵消空气-玻璃界面的反射<sup>[14]</sup>。在透射式光电阴极组件的光路结构中,玻璃是入射介质,空气是三个薄膜层的基底。根据薄膜光学矩阵理论,三个薄膜层可以分别用三个包含各层光学信息的特征矩阵来表示,这样,通过矩阵计算可分别得到光谱反射率 $R(h\nu)$ 和透射率 $T(h\nu)$ ,其中 $h$ 是普朗克常数, $\nu$ 是光子频率, $h\nu$ 表示光子能量。

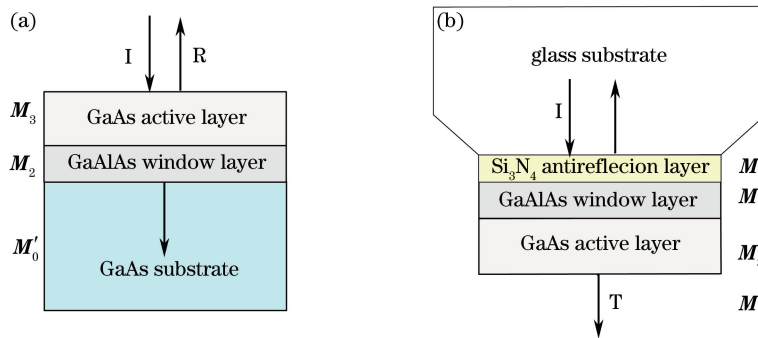


图1 (a)反射式和(b)透射式GaAs光电阴极光路结构

Fig. 1 Light path structures of (a) r-mode and (b) t-mode GaAs photocathodes

利用矩阵理论计算透射式GaAs光电阴极的反射率、透射率和吸收率时, $2 \times 1$ 的矩阵 $\mathbf{M}_0$ 表示空气基底的信息,三个 $2 \times 2$ 的矩阵连乘表示三个薄膜层的作用,其中 $\mathbf{M}_1$ 代表三个连乘矩阵中的第一项,携带的是Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>层的信息; $\mathbf{M}_2$ 代表第二项,携带的是GaAlAs层的信息; $\mathbf{M}_3$ 代表第三项,携带的是GaAs层的信息。矩阵计算如下

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B}_t \\ \mathbf{C}_t \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \times \mathbf{M}_2 \times \mathbf{M}_3 \times \mathbf{M}_0, \quad (1)$$

计算得到透射式阴极特征矩阵的中间变量 $\mathbf{B}_t$ 和 $\mathbf{C}_t$ 值后,再将它们代到相应的公式中计算,就能得到透射式GaAs光电阴极的反射率、透射率和吸收率。

计算反射式GaAs光电阴极的光学性能时,入射介质是空气,出射介质是GaAs基底。与透射式相比,主要区别是入射方向的不同。类似地, $\mathbf{M}_3$ 代表GaAs层的 $2 \times 2$ 特征矩阵, $\mathbf{M}_2$ 代表GaAlAs层的 $2 \times 2$ 矩阵, $\mathbf{M}'_0$ 代表GaAs基底的 $2 \times 1$ 矩阵,连乘计算如下

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B}_r \\ \mathbf{C}_r \end{bmatrix} = \mathbf{M}_3 \times \mathbf{M}_2 \times \mathbf{M}'_0, \quad (2)$$

通过反射式阴极特征矩阵的中间变量 $\mathbf{B}_r$ 和 $\mathbf{C}_r$ 可以得到反射式GaAs光电阴极的光学性能,由此得到的反射率、透射率和吸收率与透射式光电阴极存在区别。

## 2.2 量子效率公式

GaAs 光电阴极的量子效率公式可以根据带有边界条件的一维连续性方程推导得到。反射式均匀掺杂 GaAs 光电阴极的量子效率  $Y_{RU}$  的计算公式如下<sup>[15-16]</sup>

$$Y_{RU}(h\nu) = \frac{P[1 - R_r(h\nu)]}{1 + 1/(\alpha_{hv}L_D)}, \quad (3)$$

式中  $P$  是表面电子逸出几率,其值在  $0 \sim 1$  之间; $R_r(h\nu)$  是反射式 GaAs 光电阴极的反射率,是波长(光子能量)的函数; $\alpha_{hv}$  是发射层材料对能量为  $h\nu$  的光子的吸收系数; $L_D$  是电子扩散长度。

透射式均匀掺杂 GaAs 光电阴极的量子效率  $Y_{TU}$  的计算公式如下<sup>[15-16]</sup>

$$Y_{TU}(h\nu) = \frac{P[1 - R_t(h\nu)]\alpha_{hv}L_D \exp(-\beta_{hw}T_w)}{\alpha_{hv}^2L_D^2 - 1} \times \left\{ \frac{\alpha_{hv}D_n + S_v}{(D_n/L_D)\cosh(T_e/L_D) + S_v\sinh(T_e/L_D)} - \frac{\exp(-\alpha_{hv}T_e)[S_v\cosh(T_e/L_D) + (D_n/L_D)\sinh(T_e/L_D)]}{(D_n/L_D)\cosh(T_e/L_D) + S_v\sinh(T_e/L_D)} - \alpha_{hv}L_D \exp(-\alpha_{hv}T_e) \right\}, \quad (4)$$

式中  $R_t(h\nu)$  是透射式 GaAs 光电阴极的反射率,也是波长(光子能量)的函数; $T_e$  是发射层厚度; $T_w$  是窗口层厚度; $\beta_{hw}$  是窗口层材料的吸收系数; $S_v$  是后界面复合速率; $D_n$  是电子扩散系数。

反射式指数掺杂 GaAs 光电阴极的量子效率  $Y_{RE}$  公式如下<sup>[15-16]</sup>

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

式中

$$L_E = \mu |E| \tau = \frac{q|E|}{k_0 T} L_D^2, N = \sqrt{L_E^2 + 4L_D^2}, S = S_v + \mu |E|, \\ M = (ND_n/L_D)\cosh(NT_e/2L_D^2) + (2SL_D - D_nL_E/L_D)\sinh(NT_e/2L_D^2), \\ Q = SN\cosh(NT_e/2L_D^2) + (SL_E + 2D_n)\sinh(NT_e/2L_D^2),$$

其中  $\mu$  是载流子迁移率; $k_0$  是玻尔兹曼常数; $E$  是内建电场; $L_E$  是在内建电场  $E$  作用下、电子在少数载流子寿命内的漂移长度; $q$  是电子电荷量; $N$ 、 $S$  是中间变量。

透射式指数掺杂 GaAs 光电阴极量子效率  $Y_{TE}$  公式如下<sup>[15-16]</sup>

$$Y_{TE}(h\nu) = \frac{P[1 - R_t(h\nu)]\alpha_{hv}L_D \exp(-\beta_{hw}T_w)}{\alpha_{hv}^2L_D^2 + \alpha_{hv}L_E - 1} \times \left[ \frac{N(S + \alpha_{hv}D_n)\exp(L_ET_e/2L_D^2)}{M} - \frac{Q\exp(-\alpha_{hv}T_e)}{M} - \alpha_{hv}L_D \exp(-\alpha_{hv}T_e) \right]. \quad (6)$$

利用(3)、(4)式分析均匀掺杂 GaAs 光电阴极时,反射式和透射式两种类型量子效率公式的共同参数是发射层吸收系数、电子逸出几率和电子扩散长度,而不同的参数是反射率。此外,透射式光电阴极公式又受到电子扩散系数、后界面复合速率、发射层厚度、窗口层厚度与吸收系数的影响。

利用(5)、(6)式分析指数掺杂 GaAs 光电阴极时,反射式和透射式量子效率的异同点与均匀掺杂情况类似。此外,在均匀掺杂发射层中,光电子移向阴极表面只能通过扩散运动,平均长度为  $L_D$ ,而在指数掺杂情况下,受发射层中内建电场的影响,体内光电子能以扩散和漂移两种方式移向表面。定义电子漂移扩散长度  $L_{DE}$ ,它是漂移长度  $L_E$  和扩散长度  $L_D$  的函数,计算公式如下<sup>[17]</sup>

$$L_{DE} = \frac{1}{2}(\sqrt{L_E^2 + 4L_D^2} + L_E). \quad (7)$$

反射式 GaAs 光电阴极的电子扩散长度和表面电子逸出几率可以根据实验光谱响应曲线拟合得到。由于表面电子逸出几率与材料制备工艺有关,此处认为反射式和透射式表面电子逸出几率是一样的。通过拟合反射式、透射式、均匀掺杂、指数掺杂 GaAs 光电阴极的光谱响应曲线,可以得到各电子扩散长度。因此,电子扩散长度的不同可体现组件制备工艺、掺杂浓度、工作模式等对 GaAs 光电阴极材料的影响程度。

### 3 实验与结果

采用分子束外延(MBE)技术生长了 4 种类型的 GaAs 光电阴极,样品 I 和样品 II 分别是反射式和透射式的均匀掺杂样品,样品 III 和样品 IV 分别是对应的指数掺杂样品。图 2 给出了几种样品的阴极材料外延生长结构,其中  $x$  表示 GaAlAs 层 Al 的原子数分数。发射层都采用铍(Be)掺杂,总厚度都是  $2\ \mu\text{m}$ 。对于两个均匀掺杂样品,发射层掺杂浓度是  $1\times 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$ ;对于两个指数掺杂样品,掺杂浓度呈指数变化规律分布在  $1\times 10^{19}\sim 1\times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$  之间。由于材料生长工艺的局限性,实际制备时采用了八台阶不等厚度分布来近似模拟。

利用透射式 GaAs 样品 II 和 IV 制备组件,通过选择性腐蚀<sup>[18]</sup>,外延层制备成具有玻璃/ $\text{Si}_3\text{N}_4$  增透层/GaAlAs 窗口层/GaAs 发射层的透射式结构。表面的 GaAs 保护层首先被选择性腐蚀,露出 GaAlAs 窗口层,在其上生长  $\text{Si}_3\text{N}_4$  增透层,然后热粘接玻璃,再腐蚀去除高质量 p 型 GaAs 衬底和 GaAs 阻挡层,暴露出 GaAs 发射层,图 2 中的虚线部分表示需腐蚀去除的部分。最后,透射式样品被制成图 1(b)所示的 4 层结构。

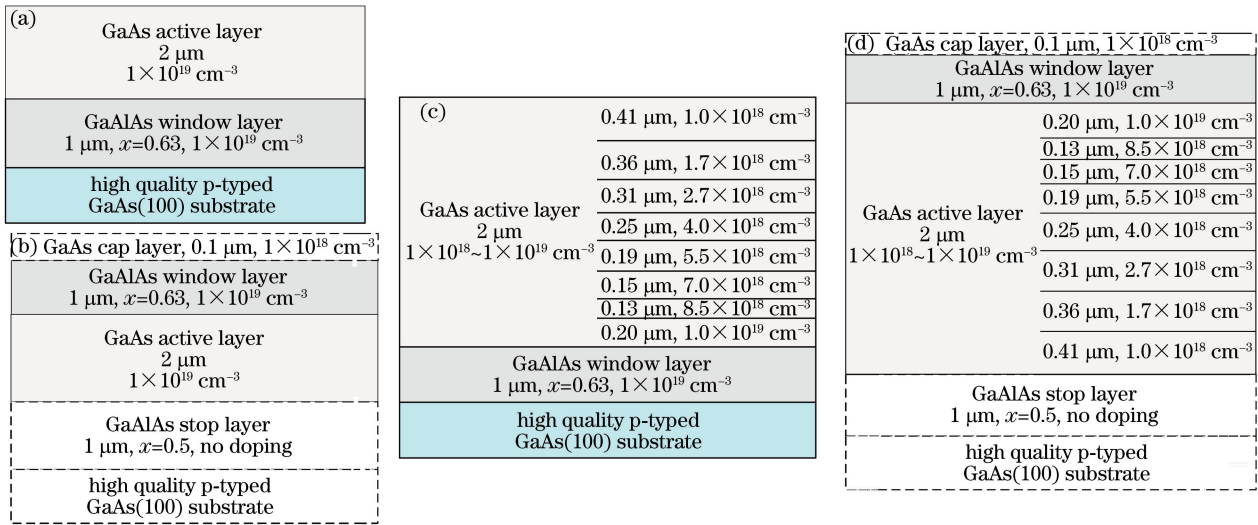


图 2 各类 GaAs 光电阴极材料的外延层结构。(a)反射式均匀掺杂样品 I;

(b)透射式均匀掺杂样品 II;(c)反射式指数掺杂样品 III;(d)透射式指数掺杂样品 IV

Fig. 2 Structures of epitaxial layers of various GaAs photocathode materials. (a) r-mode sample I with uniform doping;

(b) t-mode sample II with uniform doping; (c) r-mode sample III with exponential doping;

(d) t-mode sample IV with exponential doping

从结构上来说,发射层的掺杂浓度和总厚度,以及窗口层的掺杂浓度、厚度、铝(Al)含量,两组样品(均匀样品 I 和 II,指数样品 III 和 IV)都是对应相同的。不同之处在于反射式样品 I 和 III 的发射层和窗口层是直接生长在较厚的 GaAs 衬底上,而透射式样品 II 和 IV 的发射层和窗口层粘接了  $\text{Si}_3\text{N}_4$  增透层和玻璃衬底。另外,如图 1 所示,反射式和透射式阴极的工作模式也不相同。对于反射式阴极而言,光子从空气中进入阴极体内,然后依次通过发射层、窗口层、衬底,最后以光电子形式射入空气。对于透射式阴极而言,入射光从玻璃衬底入射,然后依次通过增透层、窗口层,最后以光电子形式向真空发射。

化学清洗和加热净化之后,在压强不高于  $1\times 10^{-9}\ \text{Pa}$  的超高真空室内对光电阴极进行高低温两步铯氧激活<sup>[15,19]</sup>。激活后,反射式样品 I 和 III 直接采用在线光谱响应测试系统测量实验曲线。利用透射式样品 II 和 IV 制备成组件,对其铯氧激活后,再钢封成真空像增强器,最后测试光谱响应实验曲线。4 条实验曲线的对比如图 3 所示。

### 4 讨 论

为了利用量子效率公式进行拟合计算,先将实验光谱响应值转换成量子效率值,然后使用 Matlab 中的非线性回归函数 nlinfit 拟合出反射式光电阴极的表面电子逸出几率  $P$  和电子扩散长度  $L_D$ ,拟合结果如表 1 所示。对于均匀掺杂反射式样品 I,  $P=0.5, L_D=2.04\ \mu\text{m}$ ,积分灵敏度为  $1287\ \mu\text{A}/\text{lm}$ ,而对应的透射式样品



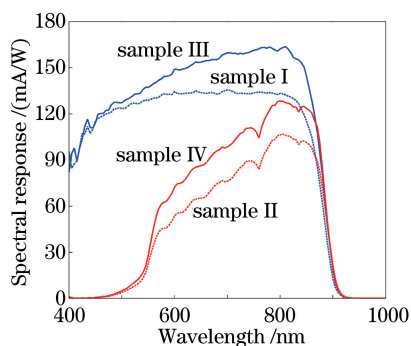


图 3 4 个 GaAs 光电阴极样品的实验光谱响应曲线

Fig. 3 Experimental spectral response curves of four GaAs photocathode samples

II 的积分灵敏度只有 965  $\mu\text{A}/\text{lm}$ 。由于组件制备工艺中阴极材料性能的不同,反射式 GaAs 光电阴极的量子效率高于具有相同发射层的透射式样品。

表 1 4 个 GaAs 光电阴极样品的性能参数对比

Table 1 Parameter comparison among four GaAs photocathode samples

Doping way	Average doping concentration $N_{\text{dop}}/\text{cm}^{-3}$	Electron escape probability $P$	Electron diffusion length $L_D/\mu\text{m}$		Relative change of $L_D$
			r-mode	t-mode	
Uniform doping	$10.00 \times 10^{18}$	0.50	2.04	1.81	-11%
Exponential doping	$4.03 \times 10^{18}$	0.51	2.39	2.26	-5%
Relative change			15%	20%	

为了量化差异,将图 3 中反射式和透射式光谱响应曲线转换成量子效率曲线,然后进行拟合参数的对比分析。拟合时,透射式曲线保持  $P=0.50$ ,只拟合  $L_D$ ,拟合结果为 1.81  $\mu\text{m}$ ,这比反射式的减小了 11%。为了使透射式  $L_D$  值与反射式的更接近,即透射式阴极的量子效率接近相同发射层结构的反射式阴极,改进方法之一是进一步完善组件制备工艺。

对指数掺杂样品作类似的处理分析,反射式样品 III 与样品 I 采用同样的函数拟合,结果得到  $P=0.51$ ,  $L_D=2.39 \mu\text{m}$ ,积分灵敏度为 1517  $\mu\text{A}/\text{lm}$ ,对应的透射式样品 IV 的积分灵敏度为 1182  $\mu\text{A}/\text{lm}$ 。为了更直观地对比反射式指数掺杂和透射式指数掺杂样品  $L_D$  值,将反射式指数掺杂拟合出的表面电子逸出几率直接代入透射式样品 IV 的量子效率中,再拟合得出此时的  $L_D=2.26 \mu\text{m}$ ,比样品 III 的  $L_D$  值减小了 5%。

另外,计算了 4 个样品中发射层的平均掺杂浓度,如表 1 所示,指数掺杂样品 III 和 IV 的平均浓度为  $4.03 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ,比均匀掺杂样品 I 和 II 要低一半以上,但指数掺杂样品的电子扩散长度比均匀掺杂样品大得多。在掺杂浓度较低的样品中,离子杂质与电子碰撞的几率小,这就使得电子在阴极体内扩散长度的衰减变缓,从而具有相对更长的电子扩散长度。对于反射式 GaAs 光电阴极,均匀掺杂样品 I 比指数掺杂样品 III 的电子扩散长度要小 15%;对于透射式 GaAs 光电阴极,均匀掺杂样品 II 比指数掺杂样品 IV 的电子扩散长度减小了 20%。由于均匀掺杂透射式样品发射层中的掺杂浓度高,阴极组件制备工艺对电子扩散长度有很大影响。而对于指数掺杂透射式样品,组件制备对电子扩散长度的影响较小。均匀掺杂样品阴极电子扩散长度的减小量是指数掺杂情况的两倍。

4 种 GaAs 光电阴极的积分灵敏度因结构的差异而不同,如表 2 所示。透射式均匀掺杂样品的积分灵敏度比对应结构的反射式样品降低了 25%,透射式指数掺杂样品的积分灵敏度比对应结构的反射式样品降低了 22%。从掺杂浓度方面分析,透射式指数掺杂样品比均匀掺杂样品积分灵敏度提高了 18%,而反射式指数掺杂样品比均匀掺杂样品积分灵敏度提高了 15%。在不同掺杂浓度情况下,透射式积分灵敏度的提高量比反射式多 3%;在不同工作模式下,指数掺杂积分灵敏度的降低量比均匀掺杂少 3%。这进一步说明了发射层指数掺杂结构更有利于提高光电阴极的积分灵敏度。

表 2 4 个 GaAs 光电阴极样品积分灵敏度及其相对变化量  
Table 2 Integral sensitivity and relative change of four GaAs photocathode samples

Doping way	Integral sensitivity / ( $\mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$ )		Relative change
	r-mode	t-mode	
Uniform doping	1287	965	-25%
Exponential doping	1517	1182	-22%
Relative change	15%	18%	

## 5 结 论

利用光学薄膜传输矩阵,分别推导了反射式和透射式 GaAs 光电阴极结构模型。采用 MBE 技术生长了具有相同发射层结构(均匀掺杂或指数掺杂)的两类光电阴极样品。采用在线光谱响应测试系统测试了反射式样品和透射式样品的光谱响应曲线。对实验曲线进行拟合,获得了均匀掺杂样品和指数掺杂样品的电子扩散长度、积分灵敏度。结果表明,在组件工艺的影响下,均匀掺杂阴极电子扩散长度的减小量是指数掺杂阴极的两倍。在两种工作模式下,指数掺杂积分灵敏度的降低量比均匀掺杂少 3%。在不同掺杂浓度下,透射式积分灵敏度的提高量比反射式多 3%。发射层具有较低平均掺杂浓度的指数掺杂分布更有利于 GaAs 光电阴极光电发射性能的提高。

## 参 考 文 献

- 1 Drouhin H J, Hermann C, Lampel G. Photoemission from activated gallium arsenide. I. Very-high-resolution energy distribution curves[J]. Phys Rev B, 1985, 31(6): 3859-3871.
- 2 Bourree L E, Chasse D R, Thamban P S, *et al.* Comparison of the optical characteristics of GaAs photocathodes grown using MBE and MOCVD[C]. SPIE, 2003, 4796: 11-22.
- 3 Liu Z, Sun Y, Peterson S, *et al.* Photoemission study of Cs-NF<sub>3</sub> activated GaAs (100) negative electron affinity photocathodes[J]. Appl Phys Lett, 2008, 92(24): 241107.
- 4 Sun Y, Kirby R E, Maruyama T, *et al.* The surface activation layer of GaAs negative electron affinity photocathode activated by Cs, Li, and NF<sub>3</sub>[J]. Appl Phys Lett, 2009, 95(17): 174109.
- 5 Machuca F, Liu Z, Sun Y, *et al.* Oxygen species in Cs/O activated gallium nitride (GaN) negative electron affinity photocathodes[J]. J Vac Sci Technol B, 2003, 21(4): 1863-1869.
- 6 Karkare S, Bazarov I. Effect of nanoscale surface roughness on transverse energy spread from GaAs photocathodes[J]. Appl Phys Lett, 2011, 98(9): 094104.
- 7 Zhao J, Shen W K, Chang B K, *et al.* Comparison of module structure of wideband response GaAs photocathode grown by MBE and MOCVD[J]. Opt Commun, 2014, 328: 129-134.
- 8 Chen L, Shen Y, Zhang S Q, *et al.* Comparative research on reflection-mode GaAs photocathode with graded Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As buffer layer[J]. Opt Commun, 2015, 355: 186-190.
- 9 Fu Jiangtao, Zhang Songchun, Chang Benkang. Study on the quantum efficiency for non-uniform doping negative electron affinity photocathode with reflection mode[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5): 1492-1496.  
傅江涛,张松春,常本康. 反射式非均匀掺杂负电子亲和光电阴极量子效率研究[J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1492-1496.
- 10 Chen Liang, Qian Yunsheng, Chang Benkang, *et al.* Research on surface photovoltage spectroscopy for exponential doping transmission-mode GaAs photocathodes[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(9): 0906002.  
陈亮,钱芸生,常本康,等. 指数掺杂透射式 GaAs 光电阴极表面光电压谱研究[J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0906002.
- 11 Zou J J, Yang Z, Qiao J L, *et al.* Activation experiments and quantum efficiency theory on gradient-doping NEA GaAs photocathodes[C]. SPIE, 2007, 6782: 67822R.
- 12 Zhang Y J, Niu J, Zou J J, *et al.* Variation of spectral response for exponential-doped transmission-mode GaAs photocathodes in the preparation process[J]. Appl Opt, 2010, 49(20): 3935-3940.
- 13 Chen L, Qian Y S, Zhang Y J, *et al.* Comparative research for transmission-mode GaAs photocathodes of different doping structures on surface photovoltage[J]. Opt Commun, 2011, 284(19): 4520-4524.
- 14 Farsakoglu O F, Zengin D M, Kocabas H. Determination of some main parameters for quantum values of GaAlAs/GaAs

- transmission-mode photocathodes in near-ir region[J]. *Opt Eng*, 1993, 32(5): 1105-1113.
- 15 Zhang Y J, Niu J, Zhao J, *et al.* Influence of exponential-doping structure on photoemission capability of transmission-mode GaAs photocathodes[J]. *J Appl Phys*, 2010, 108(9): 093108.
  - 16 Niu J, Zhang Y J, Chang B K, *et al.* Influence of exponential doping structure on the performance of GaAs photocathodes [J]. *Appl Opt*, 2009, 48(29): 5445-5450.
  - 17 Zhao J, Chang B K, Xiong Y J, *et al.* Spectral transmittance and module structure fitting for transmission-mode GaAs photocathode[J]. *Chinese Phys B*, 2011, 20(4): 047801.
  - 18 Antypas G A, Escher J S, Edgcombe J, *et al.* Broadband GaAs transmission photocathode[J]. *J Appl Phys*, 1978, 49 (7): 4301.
  - 19 Sun Y, Liu Z, Pianetta P, *et al.* Formation of cesium peroxide and cesium superoxide on InP photocathode activated by cesium and oxygen[J]. *J Appl Phys*, 2007, 102 (7): 074908.