

透射式 GaAs(Cs,O)光电阴极发射 电子横向能量的研究*

闫金良 朱长纯

(西安交通大学电信学院, 陕西, 西安, 710049)

向世明

(西安应用光学研究所, 陕西, 西安, 710100)

TN 201
TN 144

摘要 制备了透射式 GaAs 阴极组件, 测量了 GaAs 阴极激活过程中阴极光电灵敏度和发射电子平均横向能量随激活时间的变化, 用扫描电镜观察 GaAs(Cs,O) 阴极表面形貌, 结果表明: GaAs(Cs,O) 阴极发射电子横向能量取决于 GaAs 晶格温度、阴极表面形貌和电子在能带弯曲区的多次散射, 与 (Cs,O) 激活层无关。

关键词 光电发射, 像增强器, 外延, 散射。

透射式 发射电子, 能量,

TRANSVERSE ENERGY OF PHOTOELECTRONS EMITTED FROM TRANSMISSION MODE GaAs(Cs,O) PHOTOCATHODES*

YAN Jing-Liang ZHU Chang-Chun

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

XIANG Shi-Ming

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an, Shaanxi 710100, China)

Abstract A GaAs transmission photocathode structure was prepared. The variations of the cathode photosensitivity and mean transverse energy through the course of typical activations were measured systematically in the photocathode activation and imaging system. The GaAs(Cs,O) photocathode surface was examined by scanning electron microscope. It was concluded that the transverse energy of photoelectrons emitted from GaAs(Cs,O) photocathodes, which is largely independent of the (Cs,O) activation layer, is determined by the GaAs lattice temperature, photocathode surface roughness and multiple scattering processes in the band-bending region.

Key words photoemission, image intensifier, epitaxy, scattering.

引言

1965 年, 一种新型光电发射体 GaAs:Cs 出现在光电发射领域, 它以理论模型的概念新颖及发射体本身量子效率高, 暗发射小, 光电子能量分布和角分布集中等特点, 在这个领域引起了深刻变化, 从此 GaAs 负电子亲和势光电发射材料成为广泛的研究课题。然而, 不同研究者给出的 GaAs(Cs,O) 光电阴极发射电子的平均横向能量差异较大, 数值从 1meV 到 100

meV^[1,2,3]。迄今为止, 人们对 GaAs(Cs,O) 阴极发射电子横向能量的产生机理尚未清楚。

本文制备透射式 GaAs 阴极组件, 测量了阴极激活过程中光电灵敏度和电子平均横向能量随激活时间的变化, 用扫描电镜观察了 GaAs(Cs,O) 阴极的表面形貌, 讨论了 GaAs(Cs,O) 阴极发射电子横向能量的产生机制。本工作有益于深入理解 GaAs(Cs,O) 阴极发射电子横向能量的产生机理, 为高质量 GaAs(Cs,O) 阴极的研制奠定了基础。

* 国防科技重点基金(编号: 2. 2. 3. 1) 和中国博士后科学基金(编号: 1999. 17) 资助项目
稿件收到日期 1999-07-15, 修改稿收到日期 2000-03-06

* The project supported by the Fund of Science and Technology of National Defense (No. 2. 2. 3. 1) and Postdoctoral Science Foundation of China (1999. 17).
Received 1999-07-15, revised 2000-03-06

1 实验

用 MOCVD 技术在 GaAs 衬底上外延生长 GaAlAs/GaAs/GaAlAs 结构,在顶层的 GaAlAs 钝化层上沉积 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 钝化增透膜,将钝化层 GaAlAs 和 Corning 7056 玻璃视窗热粘结,分别用选择性腐蚀液去掉 GaAs 衬底和 GaAlAs 层,得到 GaAs/GaAlAs/ $(\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2)$ /玻璃结构,即透射式 GaAs 阴极组件.阴极组件的发射层 GaAs(100)是 P 型重掺杂(掺杂剂 Zn),掺杂浓度为 $7 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$,厚度为 $2 \mu\text{m}$.阴极组件的钝化层 $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ 是 P 型掺杂,掺杂浓度为 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$,厚度为 $1.5 \mu\text{m}$.

透射式 GaAs 光电阴极的激活和测量是在制造 III 代微光管的多功能超高真空设备中进行的.磁力机械手在真空装置中灵活地完成阴极在激活和成像室之间的传递.阴极组件在激活前先在高纯 N_2 气氛中进行除油和化学清洗,在真空中热清洁.阴极组件的发射层 GaAs 表面获得原子级清洁后,立即转移至激活位置,并进行 Cs、O 交替激活,即“YO-YO 激活”^[4].激活过程用光电流的升降来控制.把色温 2854K 的钨丝白炽灯光源的光聚焦成一个直径 0.5mm 的光斑照射在 GaAs 阴极上,用电位差计监测光电流.经过多轮的 Cs、O 交替激活,光电流可达到最大值而不再上升. GaAs(Cs,O) 阴极发射电子横向能量的测定采用标准鉴别率板和平行光管经聚焦成象于 GaAs(Cs,O) 阴极,用读数显微镜目视荧光屏上的鉴别率板图象获得的.为了研究 GaAs(Cs,O) 阴极表面形貌对阴极发射电子横向能量的影响,待阴极激活、测试完毕后用扫描电镜观察 GaAs(Cs,O) 阴极表面的微观形貌.

2 透射式 GaAs(Cs,O) 阴极光电发射过程的分析

为了详细研究 GaAs(Cs,O) 光电阴极发射电子的横向能量,我们首先分析透射式 GaAs(Cs,O) 阴极光电发射过程.图 1 示出了透射式 GaAs(Cs,O) 阴极能带图. GaAs(Cs,O) 阴极发射层价带顶部电子吸收入射光子跃迁进入导带成为光电子,光电子从产生处向 GaAs/(Cs,O) 界面扩散过程中,由于各种散射而损失掉高于导带底的能量.由于扩散长度较大,不同初始能量的光电子到达 $X=X_d$ 时,光电子的能量都接近导带底部,分布在 k 空间的 Γ_1 能谷,光电子的能量分布遵循玻耳兹曼分布.用导带底附近状态密度对玻耳兹曼分布加权,则电子在 $X=X_d$ 处的能量分布可以用下式表示^[5]:

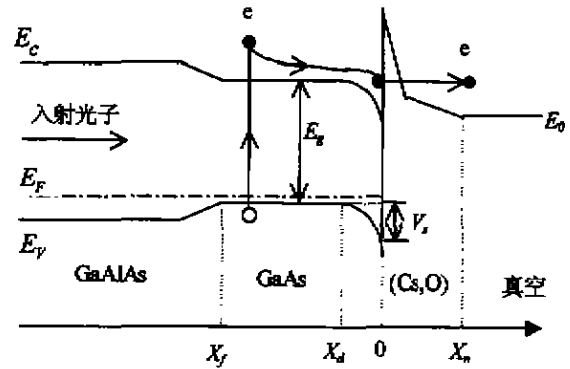


图 1 透射式 GaAs(Cs,O) 阴极能带结构
Fig. 1 Energy band structure of transmission mode GaAs(Cs,O) photocathodes

$$n_d(E) \propto E^{1/2} \exp(-E/kT), \quad (1)$$

式(1)中 E 是高于 $k=0$ 处导带极小值 E_c 的能量.电子的平均能量高于 $E_c + 3kT/2$.光电子运动到能带弯曲区 ($X_d < X < 0$) 时,由于受到表面电场的影响,光电子成为“热”电子,其能量高于导带底.所以,光电子在向 GaAs/(Cs,O) 界面运动过程中,光电子受到散射,其中一部分光电子可从电场中获得足够的能量而开始转移到 X_1 能谷中,发生能谷间的散射.光电子到达 GaAs/(Cs,O) 界面后,其能量呈一定分布,能量高于真空能级的电子以能量相关的透射几率穿过 (Cs,O) 层向真空逸出.

3 测试结果和分析

图 2 和图 3 分别表示了透射式 GaAs 阴极组件激活过程中积分灵敏度和阴极发射电子平均横向能量的变化曲线.曲线分为 4 个区域:

区域 1 ($0 < t < 13 \text{min}$)

GaAs 阴极在 Cs 的激活下出现光电响应,阴极积分灵敏度随激活时间增加缓慢,13min 后出现第一个 Cs 峰.表明阴极的电子亲和势由激活前 $\chi = 4 \text{eV}$ 减小到 $\chi_{eff} = 0$ ^[6]. GaAs 阴极发射电子的能量高于体 GaAs 导带极值 E_c ,阴极发射电子的平均横向能量变化很小,平均横向能量约为 29meV.

区域 2 ($13 \text{min} < t < 50 \text{min}$)

GaAs 阴极积分灵敏度随激活时间增加很快,阴极的电子亲和势由零电子亲和势降为负电子亲和势. GaAs 阴极发射电子由能量高于体 GaAs 导带极小值 E_c 的电子和能量低于体 GaAs 导带极小值 E_c 的电子组成.随着阴极激活,阴极的电子亲和势下降, GaAs (Cs,O) 界面高于真空能级的低能量电子数增加,阴极

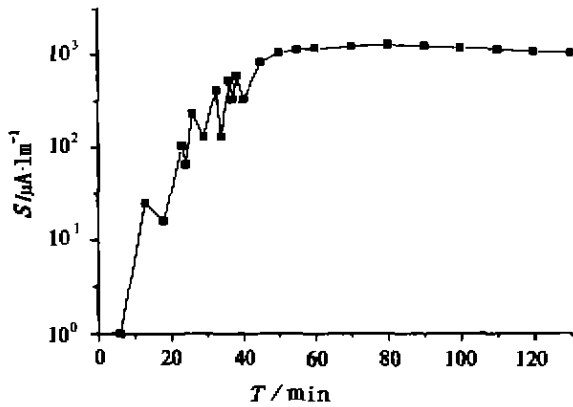


图 2 阴极激活过程中积分灵敏度变化曲线

Fig. 2 Variation of the cathode integral photosensitivity during activation

积分灵敏度增加迅速. 在这期间, GaAs(Cs,O) 阴极发射电子平均横向能量增加迅速, 由 29meV 增至 100meV. 表明 GaAs(Cs,O) 阴极发射电子横向能量的增加是由于阴极发射电子中低能量电子数增加所致, 阴极发射电子能量越低, 电子的横向能量越大. 电子在能带弯曲区遭受散射是电子能量损耗的主要因素, 是导致电子横向能量增加的主要原因. GaAs(Cs,O) 阴极的负电子亲和势绝对值 $|\chi_{\text{eff}}|$ 越大, GaAs(Cs,O) 阴极发射电子平均横向能量越高.

区域 3 (50min < t < 80min)

GaAs(Cs,O) 阴极积分灵敏度上升幅度逐渐趋于零, 用 Cs 和 O₂ 交替激活阴极积分灵敏度不再发生变化, 积分灵敏度稳定在最大值, 表明 GaAs(Cs,O) 阴极的负电子亲和势随 Cs、O₂ 激活下降很小, 最终稳定在一极值. 在此区域, GaAs(Cs,O) 阴极发射电子平均横

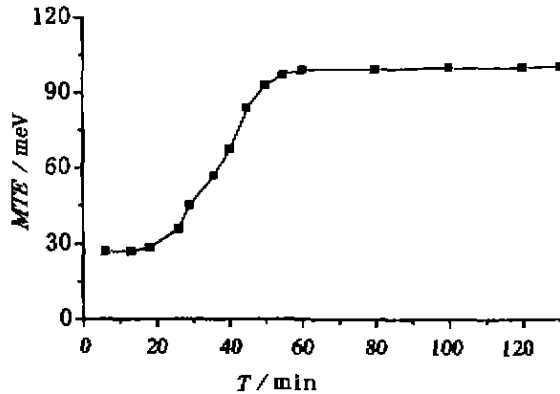


图 3 阴极激活过程中平均横向能量变化曲线

Fig. 3 Variation of the mean transverse energy during activation

向能量略有上升.

区域 4 (80min < t < 130min)

GaAs(Cs,O) 阴极积分灵敏度和发射电子平均横向能量随激活时间没有明显的变化, 表明 (Cs,O) 激活层厚度在最佳值附近区域对阴极积分灵敏度和阴极发射电子的平均横向能量影响较小, 因此, 高量子效率 GaAs(Cs,O) 阴极的 (Cs,O) 激活层对电子的散射不是导致阴极发射电子平均横向能量增加的主要因素.

如果我们假设理想的半导体-真空界面, 电子的总能量和平行于界面的动量守恒, 电子在真空中的横向能量 E_{T_0} 同电子在半导体中的横向能量 E_T 有下列关系:

$$E_{T_0} = (m^* m_0) E_T = \frac{m^*}{m_0} kT, \quad (2)$$

室温下, GaAs(Cs,O) 阴极发射电子来自 Γ_1 能谷电子的平均横向能量 $E_{T_0} = 1.75 \text{ meV}$, GaAs(Cs,O) 阴极发射电子来自 X_1 能谷电子的平均横向能量 $E_{T_0} = 22 \text{ meV}$. 在能带弯曲区, Γ_1 能谷电子可从电场中获得足够的能量而开始转移到 X_1 能谷, 发生能谷间的散射. GaAs(Cs,O) 阴极发射电子几乎全部来自 X_1 能谷电子^[7], 因此, 晶格温度对 GaAs(Cs,O) 阴极发射电子平均横向能量贡献为 22meV.

透射式 GaAs 光电阴极是通过外延方法在晶格匹配或近似匹配的衬底上生长, 外延方法导致了特征形貌, 化学腐蚀工艺会导致形貌变形, 激活工艺中热清洗工艺可产生凸点或热腐蚀坑, 因此 III-V 化合物光电阴极表面不可能绝对平坦, 不平整的阴极表面形貌是导致阴极面产生高横向能量的原因. 近贴聚焦高电场在不平整阴极表面附近产生畸变电场, 电子在阴极表面获得横向能量, 我们称这种现象为“场失真效应”. 粗糙阴极表面也可产生同电场无关的横向能量增加, 我们

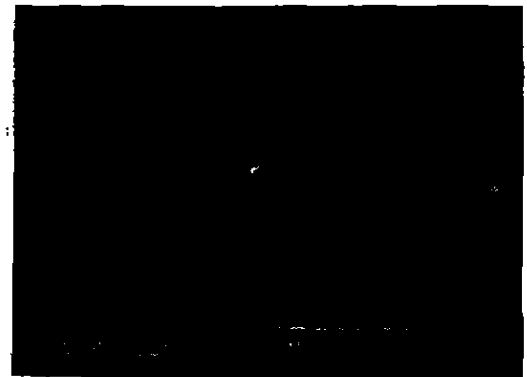


图 4 GaAs(Cs,O) 阴极表面形貌照片
Fig. 4 Scanning electron micrograph of GaAs(Cs,O) photocathode surface

称这种现象为“坡度效应”。阴极表面发射电子的速度可分解为平行于发射点局部面的速度分量和垂直于发射点局部面的速度分量。这些垂直速度分量在粗糙表面的平均面上的速度分量对电子平均横向能量有贡献,它不依赖于电场。我们用扫描电镜观察了 GaAs (Cs,O) 阴极的形貌,阴极面凸点直径小于 $1\mu\text{m}$ (见图 4)。由文献[8,9]的电子横向能量表达式可计算出阴极表面形貌引起的平均横向能量增量小于 7meV 。

4 结语

高灵敏度 GaAs(Cs,O) 光电阴极发射电子由能量高于体 GaAs 导带最小值的电子和能量低于体 GaAs 导带最小值的电子组成。能量高于体 GaAs 导带最小值的电子的横向能量取决于 GaAs 晶格温度和阴极表面形貌,能量低于体 GaAs 导带最小值的电子的横向能量取决于 GaAs 晶格温度、阴极表面形貌和电子在能带弯曲区的多次散射。GaAs(Cs,O) 阴极的负电子亲和势对在能带弯曲区遭受不同散射次数的电子起低通滤波器的作用。负电子亲和势绝对值 $|\chi_{eff}|$ 越大,在能带弯曲区遭受散射次数多的电子逸出的越多,量子效率越高,平均横向能量越大。减少阴极表面缺陷,降低 GaAs(Cs,O) 阴极的工作温度和选用低负电子亲和势绝对值 $|\chi_{eff}|$ 的阴极是降低 GaAs(Cs,O) 阴极发射电子平均横向能量的主要途径。

REFERENCES

- [1] Vergara G, Herrera-Gomez A, Spicer W E. Electron transverse energy distribution in GaAs negative electron affinity cathodes: calculations compared to experiments, *J. Appl. Phys.*, 1996, **80**(3): 1809-1815
- [2] Howorth J R, Holtom R, Hawton A, *et al.* Exploring the limits of performance of third generation image intensifiers, *Vacuum*, 1980, **30**(1112): 551-555
- [3] Rodway D C, Allenson M B. *In situ* surface study of the activating layer on GaAs(Cs,O) photocathodes, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1986, **19**: 1353-1371
- [4] Naoi Y, Ito K, Uehara Y, *et al.* Very high resolution photoelectron spectra of NEA GaAs, *Surface Science*, 1993, **283**: 457-461
- [5] Vergara G, Gomez L J, Capmany J, *et al.* Influence of the dopant concentration on the photoemission in NEA GaAs photocathode, *Vacuum*, 1997, **48**(2): 155-160
- [6] Scheer J J, Van Laar J. GaAs-Cs: A new type of photoemitter, *Solid State Communications*, 1965, **3**: 189-193
- [7] GUO Li-Hui, HOU Xun. Analysis of photoelectron emission of transmission mode NEA GaAs photocathodes, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1989, **22**: 348-353
- [8] Bradley D J, Allenson M B, Holeman B R. The transverse energy of electrons emitted from GaAs photocathodes, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1977, **10**: 111-125
- [9] Dennis G Fisher, Ramon U Martinelli. Negative electron affinity materials for imaging devices, *Advances in Image Pickup and Display*, 1974, **1**: 71-162