

文章编号:1004-4213(2011)07-1008-5

发射层厚度对透射式 GaAs 光电阴极 表面光电压谱的影响

陈亮^{1,2}, 钱芸生¹, 常本康¹

(1 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

(2 中国计量学院 光学与电子科技学院, 杭州 310018)

摘 要:通过求解一维稳态少子扩散方程, 推导了含有后界面复合速率和发射层厚度的透射式 GaAs 光电阴极表面光电压谱理论方程. 通过对发射层厚度分别为 1.6 μm 和 2.0 μm , 掺杂浓度为 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的 GaAs 透射式阴极样品测试, 理论曲线和实验曲线基本一致. 通过引入表面光电压谱积分灵敏度公式, 仿真探讨了表面光电压谱在一定体材料参量条件下, 积分灵敏度受发射层厚度的影响; 发现在体材料参量一定条件下, 透射式 GaAs 光电阴极具有最佳厚度, 同时最佳厚度受后界面复合速率的影响更大, 同时 GaAlAs 窗口层也能很好降低发射层后界面复合速率.

关键词:GaAs 光电阴极; 表面光电压谱; 电子扩散长度; 发射层厚度; 后界面复合速率

中图分类号: TN214

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114007.1008

0 引言

具有负电子亲和势 (Negative Electron Affinity, NEA) 的 GaAs 光电阴极作为一种量子效率高、发射电子能量分布集中、响应阈值可调的高效冷电子发射源, 在高性能微光像增强器、高能物理、空间技术、自旋电子学等众多领域获得了广泛的应用, 而 GaAs 光电阴极的性能主要取决于两个方面: GaAs 阴极材料和 Cs-O 激活工艺. 在以前对 GaAs 光电阴极材料性能的测试评价主要依靠材料激活后的光谱响应曲线, 但是光谱响应曲线受到 Cs-O 激活工艺和电子隧穿表面势垒层的电子溢出几率的影响, 因此利用光谱响应曲线很难对诸如电子扩散长度、后界面复合速率、材料体内电场等与材料体性能相关的参量进行较准确的测量^[1]. 为了能够在阴极材料激活前对材料性能进行测量评价而不受激活工艺的影响, 我们引入表面光电压谱对阴极材料进行激活前的性能参量测量. 表面光电压谱能够对半导体表面性质进行快速测量, 在分析半导体材料的光生电荷跃迁和扩散过程等方面具有独特的优势.

本文在分析 GaAs 透射式光电阴极的一维少子稳态扩散方程的基础上, 结合双极管理论, 推导了透射式 GaAs 光电阴极的表面光电压谱方程, 并通过

对不同发射层厚度透射式 GaAs 光电阴极的表面光电压谱测量和仿真拟合, 探讨了发射层厚度对 GaAs 光电阴极的表面光电压谱的影响. 利用表面光电压谱对阴极材料的性能参量进行测量相较于之前的利用激活后的光谱响应曲线进行测量的方法具有更高的准确性, 同时形成对阴极材料激活前和激活后的闭环对比研究, 使得阴极材料性能在激活前就能够得到较准确的评价, 为 GaAs 光电阴极材料的结构设计和激活工艺的改进提供了更好的研究手段和测量方法.

1 透射式 GaAs 光电阴极表面光电压谱理论推导

NEA 光电阴极一般采用 p 形重掺杂 (掺杂浓度一般在 $10^{17} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的 IV 族或 III-IV 族半导体材料 (如 Si, GaAs, GaN 等) 作为光电发射材料, 在超高真空系统中通过对光电发射材料表面进行低功函数材料 (如 Cs 或 Cs/O) 的激活与吸附来获得真空能级低于体内导带能级, 由于表面为 NEA 状态, 很容易通过隧道效应穿越由激活层构成的表面势垒而进入真空, 然后被施加了电压的阳极收集后作为光电流输出. 通常把 p 型掺杂浓度保持一致的阴极称为均匀掺杂 GaAs 光电阴极, 均匀掺杂透射式 GaAs

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60678043, No. 60801036) 资助

第一作者: 陈亮 (1981-), 男, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为微光与红外成像器件与系统及相关测试技术. Email: sunembed@yahoo.com.cn

导师 (通讯作者): 钱芸生 (1968-), 男, 教授, 主要研究方向为微光与红外成像器件与系统及相关测试技术. Email: yshqian@mail.njust.edu.cn

收稿日期: 2011-01-01; 修回日期: 2011-04-09

光电阴极的能带结构图如图 1, 体内的光电发射过程分为如下四个步骤: 1) 光电子激发, 即价带中的电子吸收光子能量, 跃迁进入导带成为光生电子并很快在导带热化; 2) 激发的光电子通过扩散运动输运到表面能带弯曲区 (Band-Bending Region, BBR); 3) 到达 BBR 的光电子在能带弯曲区内建电场的作用下以扩散加漂移的方式输运到表面势垒层, 在这个运动过程中, 光电子散射增强最终引起光电子能量快速衰减, 同时高能量的电子会从低能谷散射到高能谷从而发生谷间散射; 4) 到达表面的光电子通过隧道效应越过表面势垒而逸出进入真空. 由于表面光电压谱体现了由于光生电子输运引起的体内电荷分离造成的电容效应, 因此可以通过推导 GaAs 阴极材料的一维稳态少子扩散方程获得表面光电压谱的理论方程^[2].

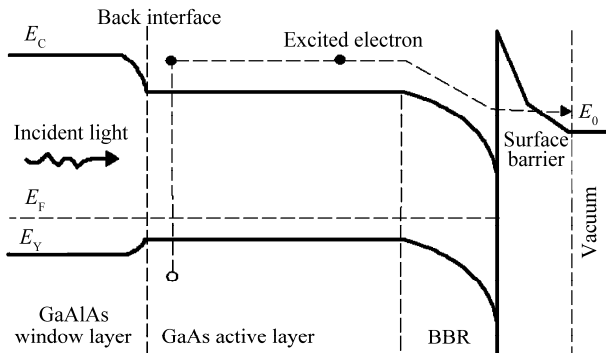


图 1 透射式均匀掺杂 GaAs 光电阴极能带结构图
Fig. 1 Band structure for transmission-mode GaAs photocathodes

如果辐照被测样品的是单色光, 则在小注入条件下的少数载流子一维稳态扩散方程可表示为

$$D_n \frac{d^2 n(x)}{dx^2} - \frac{n(x)}{\tau} + \alpha_{hv} I_0 (1-R) \cdot \exp(-\alpha_{hv} x) = 0, x \in [0, T_e] \quad (1)$$

式中 $D_n d^2 n(x)/dx^2$ 为扩散项, $n(x)/\tau$ 为复合项, $\alpha_{hv} I_0 (1-R) \exp(-\alpha_{hv} x)$ 为光生函数项; 则对透射式均匀掺杂 GaAs 光电阴极, 边界条件为

$$D_n \frac{dn(x)}{dx} = S_V n(x) |_{x=0}, n(T_e) = 0 \quad (2)$$

式中 D_n 为 GaAs 阴极材料电子的扩散系数, $n(x)$ 为扩散电子浓度, I_0 为入射光强度, R 为阴极表面对入射光的反射率, α 为阴极对入射光的吸收系数, τ 为光电子寿命, S_V 为后界面复合速率. 根据双极理论, GaAs 光电阴极的表面光电压与光生电流的关系式可表示为

$$\Delta V = \frac{KT}{q} \ln(1 + \frac{j_w}{c}), j_w = D_n \frac{dn(x)}{dx} |_{x=T_e} \quad (3)$$

$$\Delta V = \frac{KT}{qc} \cdot \frac{I_0 (1-R) \cdot \alpha_{hv} L_D}{\alpha_{hv} L_D^2 - 1} \times \left\{ \frac{\alpha_{hv} D_n + S_V}{N} - \right.$$

$$\left. \frac{\exp(-\alpha_{hv} T_e) \cdot M}{N} - \alpha_{hv} L_D \cdot \exp(-\alpha_{hv} T_e) \right\} \quad (4)$$

$$M = S_V \cdot \cosh\left(\frac{T_e}{L_D}\right) + \left(\frac{D_n}{L_D}\right) \cdot \sinh\left(\frac{T_e}{L_D}\right)$$

$$N = \left(\frac{D_n}{L_D}\right) \cdot \cosh\left(\frac{T_e}{L_D}\right) + S_V \cdot \sinh\left(\frac{T_e}{L_D}\right)$$

式中 ΔV 为材料的表面光生电压, J_w 为扩散到表面势垒区的光生电流密度. 则通过方程(1)-(3)可求得均匀掺杂的透射式 GaAs 光电阴极的表面电压谱的理论方程如式(4)所示, 式中 S_V 是后界面复合速率, 是指透射式阴极缓冲层与发射层界面处的光电子复合速率, T_e 是阴极发射层的厚度, L_D 是阴极材料电子扩散长度. 从中可以看出阴极材料的表面光电压谱与材料的相关体性能参量都有紧密联系^[3-5].

2 实验

为了验证发射层厚度对透射式 GaAs 光电阴极表面光电压的影响, 我们用 MBE 设备生长了两个不同发射层厚度的阴极材料, 首先在 GaAs 衬底材料上生长一层 GaAs 缓冲层, 然后生长阻挡层 $Al_x Ga_{1-x} As$, 并且使其 Al 质含量 ≤ 0.4 , 再在阻挡层上生长一定厚度的高浓度 p 型掺杂 GaAs 发射层, 掺杂浓度为 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 最后在发射层上生长 $Al_x Ga_{1-x} As$ 窗口层, 其中 Al 质含量为 0.63; 在窗口层上生长 $Si_3 N_4$ 增透膜, 将制备好复合增透膜的 GaAs 光电阴极外延片与清洗干净的光学玻璃窗在真空炉中通过加温加压的方法最终对位粘接在一起; 最后通过化学腐蚀工艺, 将衬底和阻挡层剥离, 并在 GaAs 发射层边缘通过磁控溅射的方法加上导电电极; 两个阴极部件的发射层厚度分别为 $1.6 \mu\text{m}$ 和 $2 \mu\text{m}$, 整体阴极部件的结构如图 2^[6].

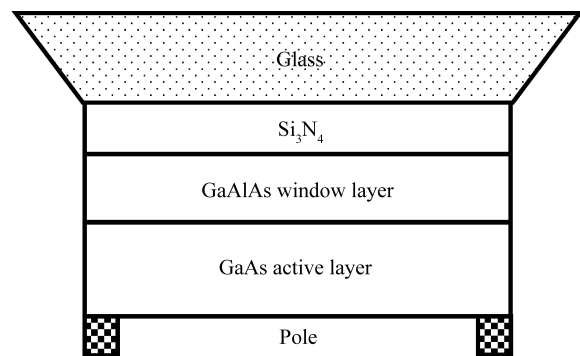


图 2 透射式 GaAs 光电阴极部件结构
Fig. 2 Component structure for transmission-mode GaAs photocathodes

由于 GaAs 发射层很容易被氧化, 为了去除氧化层, GaAs 光电阴极部件必须经过丙酮、氢氟酸、无水乙醇进行各 5 min 的超声清洗, 从而最终得到

光滑洁净的 GaAs 阴极表面,然后阴极材料被放入我们自己设计的表面光电压谱测试系统中进行表面光电压曲线的测量,两个阴极部件的表面光电压曲线如图 3.

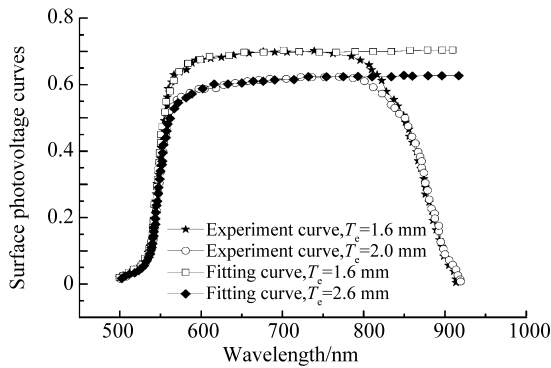


图 3 两种不同发射层厚度透射式 GaAs 光电阴极的实验和理论拟合表面光电压谱曲线

Fig. 3 Experiments and theoretical fitting curves on surface photovoltage spectroscopy for transmission mode GaAs photocathodes of different active layer depth

从图 3 中可以看出,按式(4)拟合的理论曲线和实验曲线在 750 nm 以下波长具有较高的拟合准确度,而长波段拟合较差,这主要由于 GaAlAs 窗口层长波段透射率较低,而且在 550 nm 以下的短波高能波段表面光电压谱衰减很快,这主要由于 GaAlAs 窗口层对高能段的吸收较高.虽然两个不同发射层厚度的材料具有相同的拟合电子扩散长度 $L_D = 2 \mu\text{m}$,后界面复合速率 $S_r = 10^3 \text{cm/s}$,但是 1.6 μm 发射层厚度阴极材料的表面光电压谱幅值仍然比 2 μm 发射层厚度阴极材料幅值大,可见对透射式 GaAs 光电阴极在一定电子扩散长度和后界面复合速率的条件下,仍然存在一个最佳发射层厚度^[7].

在实验测试中,Al 质含量为 0.63 的 GaAlAs 窗口层的吸收系数如图 4.

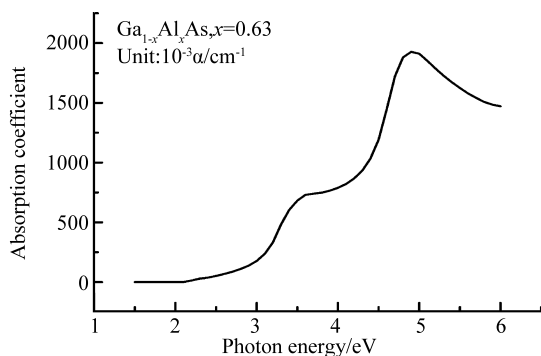


图 4 GaAlAs 窗口层吸收系数曲线

Fig. 4 Absorption coefficient of GaAlAs window layer

3 仿真与分析

为了更好地对不同厚度和不同体材料参量的透射式光电阴极的表面光电压谱进行比较,我们参照

阴极材料激活后的光谱响应积分响应灵敏度公式,进行阴极材料激活前的表面光电压谱积分响应灵敏度评价,积分响应灵敏度如式(5).

$$S_V = \frac{V}{\Phi_\gamma} = \frac{\sum_0^\infty S_V(\lambda) W(\lambda) \Delta\lambda}{683 \sum_{380}^{780} V(\lambda) W(\lambda) \Delta\lambda} \quad (5)$$

式中 S_V 表示阴极的表面光电压积分灵敏度, V 为阴极所发出的表面光电压, Φ_γ 为标准光源的光通量, $V(\lambda)$ 表示人眼的光谱光视效率, $W(\lambda)$ 表示标准入射光源的辐射光谱分布, $S_V(\lambda)$ 是光电阴极的表面光电压谱.

理论仿真时设定温度为室温, $D_n = 120 \text{cm}^2/\text{s}$, $R = 0.3$, 通过仿真计算阴极在不同的电子扩散长度 L_D 和后界面复合速率 S_r 设定值时,不同发射层厚度对表面光电压谱积分灵敏度的影响,从图 5 可以看出,后界面复合速率的降低可以增加阴极响应灵敏度在不同发射层厚度下的幅值,电子扩散长度的增长不仅可以增加阴极响应灵敏度在不同发射层厚度下的幅值,同时可以延缓阴极响应灵敏度随厚度增加的降低趋势.同时阴极的最佳发射层厚度受后界面复合速率的影响更大,只有在 $L_D = 3 \mu\text{m}$ 和 $S_r = 10^0 \text{cm/s}$ 值时,最佳发射层厚度才增长为 1.5 μm ,而在 $S_r = 10^0 \text{cm/s}$ 时,最佳发射层厚度与在 $L_D = 3 \mu\text{m}$ 和 $L_D = 1.5 \mu\text{m}$ 时的最佳发射层厚度同样为 1 μm .这主要由于透射式阴极主要的光生电子式是在接近后界面处产生的,后界面复合速率的大小直接决定了能够进行体内电子扩散的电子的数量^[8].

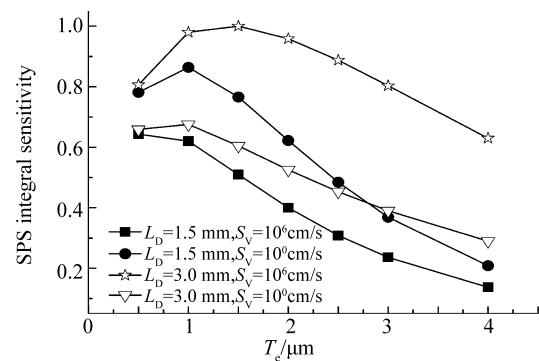


图 5 透射式 GaAs 光电阴极在不同体材料参量下表面光电压谱积分灵敏度随发射层厚度的变化

Fig. 5 Variations on surface photovoltage spectroscopy integral sensitivity for transmission mode GaAs photocathodes of different body material parameters

从图 3 所示的表面光电压谱的实验曲线可以看出,表面光电压谱随厚度的变化与仿真的结果基本一致,同时我们可以看到材料的表面光电压谱相对于理论曲线在 高能段具有很强的衰减,这主要是由于 GaAlAs 窗口层的吸收系数和禁带宽度的影响,

GaAlAs 材料的禁带宽度为^[8-10]

$$E_g(\text{GaAlAs}) = 1.424 + 1.247x + 1.147(x - 0.45)^2 \quad (6)$$

式中 x 为 Al 质含量, 则材料在 $x = 0.63$ 时的禁带宽度大约为 2.247 eV, 而 550 nm 波长一下的能量都大于 2.247 eV, 所以窗口层会对高能短波入射光具有较强的吸收, 但他们大多数都不能穿过 GaAlAs 光窗层和 GaAlAs/GaAs 界面势垒, 只有很少的一些能量较高的电子能穿过界面势垒层, 导致短波段入射到发射层的光子急剧减少. 通过之前的研究计算, 我们知道 GaAlAs/GaAs 界面层的能级差大约有 0.8 eV, 这个界面电场与材料能带弯曲区的方向一致, 同时界面电场比体内电场要强很多, 因此 GaAlAs/GaAs 界面能够反射更多的光生电子入射到材料体内, 从而最终降低发射层的后界面复合速率. 因此对透射式 GaAs 光电阴极如何能更好的优化 GaAlAs 窗口层材料设计, 减少窗口层对高能光电子的吸收和降低发射层的后界面复合速率, 从而最终提高透射式 GaAs 光电阴极的最佳发射厚度, 为透射式 GaAs 光电阴极量子效率的提高做出贡献^[11-12].

4 结论

为了减少 Cs-O 激活工艺对透射式 GaAs 光电阴极材料体性能评价的影响, 我们引入表面光电压谱测试对激活前的 GaAs 阴极材料体性能进行评价, 从而为 GaAs 光电阴极材料性能评价提供了更好的手段. 结合一维稳态少子扩散方程, 推导了含有后界面复合速率和发射层厚度的透射式 GaAs 光电阴极表面光电压谱理论方程, 通过引入积分灵敏度的评价公式, 探讨在不同电子扩散长度和后界面复合速率下, 透射式 GaAs 光电阴极材料的表面光电压谱积分灵敏度随发射层厚度增加的变化情况. 通过对不同发射层厚度的透射式 GaAs 光电阴极样品的测试和仿真, 透射式 GaAs 光电阴极确实存在最佳发射层厚度现象, 这与 GaAlAs 光电窗口层能够有效降低发射层的后界面复合速率有很大关系. 这为后续进行透射式 GaAs 光电阴极发射层材料的设计和 GaAlAs 窗口层的设计具有一定的指导意义, 并为相关设计提供了很好的测量评价手段^[13-14].

参考文献

[1] DU Xiao-Qing, ZONG Zhi-Yuan, CHANG Ben-Kang. Spectral response measurement and analysis of stability for GaAs photocathode[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 939-941.

[2] DU Yu-Jie, DU Xiao-Qing, CHANG Ben-Kang, *et al.* Spectral response performance of transmission-mode GaAs photocathode in activation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1792-1794.

[3] ZOU Ji-Jun, CHANG Ben-Kang, *et al.* The effect of Cs/O Activation current ratio on GaAs photocathode [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(10): 1493-1496.

[4] ZOU Ji-Jun, GAO Pin, YANG Zhi, *et al.* Influence of active-layer thickness on reflection-mode GaAs photocathode [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1112-1115.

[5] YANG Zhi, ZOU Ji-Jun, NIU Jun, *et al.* Research on high temperature Cs activated GaAs photocathode [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(8): 2038-2042.

[6] MA Jian-Yi, SUN Jian. Investigation on transmission mode GaAs photocathode[J]. *Optoelectronic Technology*, 2010, **30**(2): 76-79.

[7] NIU Jun, ZHANG Yi-Jun, CHANG Ben-Kang, *et al.* Influence of exponential doping structure on the performance of GaAs photocathodes[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(29): 5445-5449.

[8] ZHANG Yi-Jun, CHANG Ben-Kang, YANG Zhi *et al.* Distribution of carriers in gradient-doping transmission-mode GaAs photocathodes grown by molecular beam epitaxy[J]. *Chinese Physics B*, 2009, **18**(10): 4541-4545.

[9] ZOU Ji-Jun, CHANG Ben-Kang, YANG Zhi, *et al.* Evolution of photocurrent during cordingorption of Cs and O on GaAs (100)[J]. *Chinese Physics Letters*, 2007, **24**(6): 1731-1735.

[10] YANG Zhi, CHANG Ben-Kang, ZOU Ji-Jun, *et al.* Comparison between gradient-doping GaAs photocathode and uniform-doping GaAs photocathode [J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(28): 7035-7040.

[11] ZENG Yi-Ping, CAO X. High quality metamorphic HEMT grown on GaAs substrates by MBE[J]. *J Cryst Growth*, 2001, **210**: 227-228.

[12] IVANOV T S, DONCHEV V, GERMANOVA K, *et al.* A vector model for analysing the surface photovoltage amplitude and phase spectra applied to complicated nanostructures[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2009, **42**(13): 5302-5306.

[13] IVANOV T S, DONCHEV V, ANGELOVA T, *et al.* Characterizations of multi-layer InAs/InP quantum wires by surface photovoltage and photoluminescence spectroscopies [J]. *J Phys: Conf Ser*, 2010, **253**(01): 2043-2048.

[14] DONCHEV V, IVANOV T S, ANGELOVA T, *et al.* Surface photovoltage and photoluminescence spectroscopy of self-assembled InAs/InP quantum wires[J]. *J Phys: Conf Ser*, 2010, **210**(01): 2041-2048.

Reflection on Surface Photovoltage Spectroscopy for Transmission-mode GaAs Photocathodes of Different Active Layer Thickness

CHEN Liang^{1,2}, QIAN Yun-sheng¹, CHANG Ben-kang¹

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

(2 *Institute of Optoelectronics Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China*)

Abstract: Equations for surface photovoltage spectroscopy were deducted, by solving the on-dimensional diffusion equation for equilibrium minority carriers of transmission-mode GaAs photocathode. Through measuring the surface photovoltage curves for GaAs photocathodes with the active layer thickness of 1.6 and 2.0 μm , doping concentration of $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, experiments and fitting curves fit very well. By leading the formulas for integral sensitivity of surface photovoltage spectroscopy, the inflection of active layer thickness for integral sensitivity was analyzed under certain body parameters through emulations. It was found that GaAs photocathodes have a optimal active layer thickness and the back-interface recombination velocity inflects more on optimal thickness than electron diffusion length. Furthermore, GaAlAs window layer could help to well reduce the back-interface recombination velocity for active layer thickness.

Key words: GaAs photocathodes; Surface photovoltage spectroscopy; Electron diffusion length; Active layer thickness; Back-interface recombination velocity