

〈微光技术〉

非均匀高掺杂对透射式光电阴极光电发射性能影响研究

罗美娜², 白廷柱², 任 彬¹, 曲晓霞², 彭岔霞¹, 郭 晖¹

(1. 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065; 2. 北京理工大学光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要: 研究分析了高掺杂浓度下幂函数掺杂阴极发射层内部形成恒定电场情况, 探讨了光电阴极发射层材料内部形成恒定电场对提高透射式光电阴极量子效率中有效电子输运长度、表面电子逸出几率等参量的影响。结合掺杂浓度不同带来的光电子散射问题, 对比讨论了传统的均匀掺杂、指数掺杂、幂函数掺杂情况下发射层材料量子效率情况。

关键词: 透射式光电阴极; 幂函数掺杂; 量子效率; 微光夜视

中图分类号: O462.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2014)05-0419-05

Research on the Photoemission Performance
of the Non-uniform High-doping Transmissive Photocathode

LUO Mei-na², BAI Ting-zhu², REN Bin¹, QU Xiao-xia², PENG Cha-xia¹, GUO Hui¹

(1. Low-light-lever Night Vision Laboratory, Shaanxi Xi'an 710065, China;

2. Key Laboratory of Photoelectric Imaging Technology and System, Ministry of Education of China,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: It is studied that the photocathode emitter layer with high doping concentration of power-function-doping forms the constant electric field. And the paper discussed the improvement of effective electron transport length、surface electron escape probability and other parameters of transmissive photocathode quantum efficiency resulted from such constant electric field. Considering about the problem of photoelectron scattering caused by the different doping concentrations, the quantum efficiency of three kinds of emission layers which were uniform-doping, exponential-doping and the power function-doping are discussed.

Key words: transmissive photocathode, power-function-doping, quantum efficiency, night vision

0 引言

在光电阴极发射层材料内部形成恒定电场是提高光电阴极光电发射量子效率的重要途径, 文献[1]对轻掺杂浓度条件下透射式光电阴极发射层材料内部形成恒定电场进行了研究并构建了指数掺杂方式。但对发射层材料掺杂浓度比较高情况下形成恒定内建电场时掺杂方式的研究比较少。高掺杂浓度时, 材料能带会出现简并情况, 因此发射层材料内部恒定电场的建立需从简并化的角度讨论掺杂方式。

根据相关理论可知强简并条件下须通过幂函数掺杂方式才能使发射层材料内部形成恒定电场。恒定

内建电场的建立有利于光电子的逸出, 提高材料有效电子输运长度, 进而提高光电发射的量子效率。但在强简并条件下, 材料有较高的掺杂浓度, 因而会使载流子输运过程中的散射作用增强, 因此, 需要同时讨论恒定内建电场和散射机制对载流子输运特性的影响。

邹继军^[1]等人对透射式 GaAs 光电阴极轻掺杂情况下基于玻尔兹曼统计分布构建了指数掺杂方式实现恒定内建电场的建立; 对透射式 GaAs 光电阴极重掺杂情况, 本文基于费米统计分布构建了幂函数掺杂方式实现材料内部恒定电场的建立。最后, 仿真并比较了均匀掺杂、指数掺杂和幂函数掺杂三种掺杂方式

收稿日期: 2014-01-02; 修订日期: 2014-02-10.

作者简介: 罗美娜 (1987-), 女, 黑龙江省双鸭山市, 硕士研究生, 主要研究方向为微光夜视技术。E-mail: lmnxagydx@163.com.

通讯作者: 白廷柱 (1955-), 男, 北京, 教授, 主要研究方向为光电成像技术、光电检测技术、图像信息处理技术。E-mail: tzhubai@bit.edu.cn.

基金项目: 微光夜视技术重点实验室基金项目, 项目编号: J20110108.

下透射式 GaAs 光电阴极的光电性能。

1 高掺杂浓度下掺杂方式研究

1.1 高掺杂浓度下载流子的费米统计分布

对于 P 型 GaAs 材料而言，当载流子浓度 $p>8.1\times10^{18}$ 时可认为材料能带将发生简并^[2-6]。为了计算方便，讨论材料内部能带弯曲量时采用强简并时能带弯曲模型。

在强简并条件下，费米能级与掺杂浓度 p 的关系为^[2-3]：

$$E_v - E_F = 16.9 \left(\frac{m_0}{m} \right) \left(\frac{P}{10^{19} / \text{cm}^3} \right)^{2/3} \tag{1}$$

设 P 型 GaAs 阴极发射层后界面处初始掺杂浓度为 N_{A0} ，发射层处最终掺杂浓度为 N_A ， x 为发射层内某点离后界面的距离，在这种掺杂浓度下后界面处和发射层处费米能级与掺杂浓度的关系可以表示为：

$$E_{v1} - E_{F1} = 16.9 \left(\frac{m_0}{m} \right) \left(\frac{N_{A0}}{10^{19} / \text{cm}^3} \right)^{2/3} \tag{2}$$

$$E_{v2} - E_{F2} = 16.9 \left(\frac{m_0}{m} \right) \left(\frac{N_A}{10^{19} / \text{cm}^3} \right)^{2/3} \tag{3}$$

在热平衡状态下，费米能级处于统一位置，即 $E_{F1}=E_{F2}$ ，两式相减可得到由于掺杂浓度不同在两区域引起的能带弯曲量为：

$$E_{v1} - E_{v2} = 16.9 \left(\frac{m_0}{m} \right) \left[\left(\frac{N_{A0}}{10^{19} / \text{cm}^3} \right)^{2/3} - \left(\frac{N_A}{10^{19} / \text{cm}^3} \right)^{2/3} \right] \tag{4}$$

令 $16.9(m_0/m)\times(10^{-19})^{2/3}$ 为常数 C ，上式可改写为：

$$E_{v1} - E_{v2} = C \left[(N_{A0})^{2/3} - (N_A)^{2/3} \right] \tag{5}$$

1.2 掺杂方式设计及内建电场的形成

为构建一个恒定内建电场，p 型阴极发射层掺杂浓度按下式(6)所计算的幂函数掺杂方式进行掺杂：

$$N_A = N_{A0} (1 - Ax)^{3/2} \tag{6}$$

式中： N_{A0} 为初始浓度， x 为发射层内某点距光电阴极后界面的距离。将上式带入式(5)可得能带弯曲量为：

$$E_{v1} - E_{v2} = CAxN_{A0}^{2/3} \tag{7}$$

设缓冲层处的电势为 0，发射层厚度为 T ，发射层内点 x 处的电势为：

$$V(x) = CAxN_{A0}^{2/3} / q \tag{8}$$

可以看出电势与 x 呈线性关系，则内建电场可表示为：

$$E(x) = - \frac{dV(x)}{dx} = - \frac{CAN_{A0}^{2/3}}{q} \tag{9}$$

由上式可看出内建电场是一个与变量 x 无关的恒定数值，故可在发射层材料内部形成恒定的内建电场。掺杂方式由体内到表面浓度由高到低按幂函数的方式进行掺杂来满足表面能带弯曲区域宽度对掺杂浓度的要求。

2 恒定内建电场对阴极光电性能的影响

透射式光电阴极光电转换的光电发射“三步模型”为：（1）阴极价带中的电子吸收入射光子能量，激发到导带成为自由电子；（2）导带中的光电子向阴极表面输运，输运过程中经历各种弹性与非弹性碰撞损失能量；（3）到达阴极表面的光电子隧穿表面势垒发射到真空中^[7]。

2.1 低掺杂浓度均匀掺杂阴极结构参数

均匀掺杂阴极有效电子输运长度。传统的均匀掺杂发射层材料体内不存在能带弯曲，光电子在向阴极表面运动的过程中只有扩散运动一种形式，可以认为有效电子输运长度等于电子扩散长度。表达式如下式所示：

$$L_D = \sqrt{D_n \tau} \tag{10}$$

2.2 低掺杂浓度指数掺杂阴极结构参数

指数掺杂阴极有效电子输运长度。阴极发射层 p 型掺杂浓度由高到低按指数掺杂时发射层材料能够从体内到表面发生向下的能带弯曲，即材料内部存在电场，光电子同时具有扩散和漂移两种运动形式，有效电子输运长度为电子扩散和电子牵引共同作用的结果。表达式如下式所示^{[6][19]}：

电子牵引长度与内建电场关系如下式所示：

$$L_E = E \mu \tau \tag{11}$$

电子输运长度计算。电子输运长度与电子牵引长度 L_E 和电子扩散长度 L_D 关系如下式所示：

$$L_{DE} = \frac{1}{2} (\sqrt{L_E^2 + 4L_D^2} + L_E) \tag{12}$$

由上讨论可知，内建电场引入了电子牵引长度。与均匀掺杂方式相比，电子牵引长度的引入使光电子有效电子输运长度增大。

2.3 高掺杂时幂函数掺杂阴极材料结构参数

2.3.1 幂函数掺杂阴极有效电子输运长度

阴极发射层 P 型高掺杂浓度由高到低按幂函数掺

杂时，发生载流子简并化，发射层材料从体内到表面发生向下的能带弯曲，即材料内部存在电场，光电子同时具有扩散和漂移两种运动形式，有效电子输运长度为电子扩散和电子牵引共同作用的结果。表达式如上式(11)(12)所示，同理可知光电子有效电子输运长度应为电子扩散长度和电子牵引长度共同作用的结果。

高掺杂浓度使材料能带发生弯曲，有利于光电子的漂移运动，但高掺杂浓度也较轻掺杂浓度相比散射作用增强，影响光电子的迁移长度，所以需要考虑散射作用与高掺杂浓度之间的关系。

2.3.2 高掺杂浓度下光电子散射分析

在发射层材料内部，光电子做扩散和漂移运动的同时也不断地遭到散射，使光电子的运动方向不断地改变。材料散射机制对光电子输运特性的影响，可以从迁移率的角度进行讨论。

1) 阴极体内非平衡载流子的电离杂质散射。从掺杂浓度角度考虑，因重掺杂较轻掺杂发射层材料原子浓度增大，结构单元中原子密度增多，光电子向阴极表面输运过程中受到电离受主杂质离子散射的次数也会增多，即电离受主杂质散射增强。在温度一定时，浓度为 N_i 的电离杂质和载流子的散射概率关系式如下所示：

$$P_i \propto N_i T^{-3/2} \tag{13}$$

2) 阴极体内非平衡载流子的晶格振动散射。晶格振动的散射中声学波和光学波对载流子散射作用如下所示：

声学波散射概率：

$$P_s \propto T^{3/2} \tag{14}$$

光学波散射概率：

$$P_o \propto \frac{(\hbar\omega_l)^{3/2}}{(k_0T)^{1/2}} \left[\frac{1}{\exp(\frac{\hbar\omega_l}{k_0T}) - 1} \right] \frac{1}{f(\frac{\hbar\omega_l}{k_0T})} \tag{15}$$

从式(14)和式(15)可以看出，晶格振动的散射概率

主要与温度呈比例关系，掺杂浓度的变化对晶格振动带来的散射影响很小。

综上所述，考虑重掺杂时发射层材料的散射机制主要考虑电离杂质散射对光电子输运过程的影响。

2.3.3 电离杂质散射对光电子扩散长度的影响

式(16)为光电子迁移率与掺杂浓度的近似关系：

$$\mu \propto \frac{T^{3/2}}{m^{3/2} N_i} \tag{16}$$

在给定温度时，电子迁移率与掺杂浓度成反比，掺杂浓度越高，电子迁移率越低。又迁移率、扩散系数与电子扩散长度关系如下面式(17)所示，结合公式(10)讨论可以得出掺杂浓度升高引起的电离杂质散射最终导致电子扩散长度变小。

$$D = \left(\frac{k_0T}{q} \right) \mu \tag{17}$$

由以上讨论可知，高掺杂浓度幂函数掺杂方式时发射层材料内部形成恒定电场，与指数掺杂方式相比，高掺杂浓度使光电子散射作用增强，影响光电子迁移率；与均匀掺杂方式相比，引入了电子牵引长度，散射作用的增强又影响光电子迁移率，二者共同影响光电子的有效电子输运长度^[2-6]。

3 三种掺杂方式阴极光电性能仿真

3.1 结构参量设定及计算

引用文献[1]仿真透射式 GaAs 光电阴极指数掺杂时对一些参数的设定值，通过数学积分法求解出阴极发射层厚度为 1.5 μm 时均匀掺杂对应的等效掺杂浓度，然后计算出均匀掺杂对应的结构参量值。同时设定幂函数掺杂浓度范围为 $1 \times 10^{19} \sim 10 \times 10^{19}$ ，掺杂浓度表达式如下式所示：

$$N_A = N_{A0} (1 - 0.523x)^{3/2} \tag{18}$$

计算出 3 种掺杂方式下光电阴极对应的结构参量，可得电子输运长度及掺杂浓度如下表 1 所示。

表 1 电子输运长度		Table 1 Electron transport length	
	均匀掺杂	指数掺杂	幂函数掺杂
掺杂浓度/cm ⁻³	2.91×10 ¹⁸	1×10 ¹⁸ ~1×10 ¹⁹	1×10 ¹⁹ ~10×10 ¹⁹
发射层厚度/μm	1.5	1.5	1.5
能带弯曲量/eV	0	0.06	0.131
电子扩散长度/μm	3	3	1.095
电子牵引长度/μm	0	13.815	4.029
电子输运长度/μm	3	14.44	4.31

3.2 仿真结果

邹继军等人^[1]在考虑恒定内建电场作用下通过求解一维连续方程得到的量子效率模型，公式如(20)式所示：

$$Y_{\text{透}}(h\nu) = \frac{P(1-R)\alpha_{hy}L_D}{\alpha_{hy}^2L_D^2 + \alpha_{hy}L_E - 1} \cdot \left[\frac{N(S + \alpha_{hy}D_n)\exp(L_E T_e / 2L_D^2)}{M} - \frac{Q\exp(-\alpha_{hy}T_e)}{M} - \alpha_{hy}L_D \exp(-\alpha_{hy}T_e) \right] \quad (19)$$

式中： $L_E = \mu|E|\tau = \frac{q|E|}{\kappa_0 T} L_D^2$ ， $N = \sqrt{L_E^2 + 4L_D^2}$ ， $S = S_V + \mu|E|$ ， $M = (ND_n/L_D)\cosh(NT_e/2L_D^2) + (2SL_D - D_nL_E/L_D)\sinh(NT_e/2L_D^2)$ ， $Q = SN \cosh(NT_e/2L_D^2) + (SL_E + 2D_n)\sinh(NT_e/2L_D^2)$

均匀掺杂^[4]阴极量子效率模型为：

$$Y_T = \frac{P(1-R)\alpha L_D}{\alpha^2 L_D^2 - 1} \times \left\{ \frac{(\alpha D_n + S_V) - e^{(-\alpha L_D)} \left[S_V \cosh\left(\frac{T_e}{L_D}\right) + (D_n/L_D) \sinh\left(\frac{T_e}{L_D}\right) \right]}{(D_n/L_D) \cosh\left(\frac{T_e}{L_D}\right) + S_V \sinh\left(\frac{T_e}{L_D}\right)} - \alpha L_D e^{(-\alpha L_D)} \right\} \quad (20)$$

引用文献[1]及表1中数据，幂函数掺杂和指数掺杂代入公式(19)，均匀掺杂代入公式(20)，可得仿真结果如图1所示。

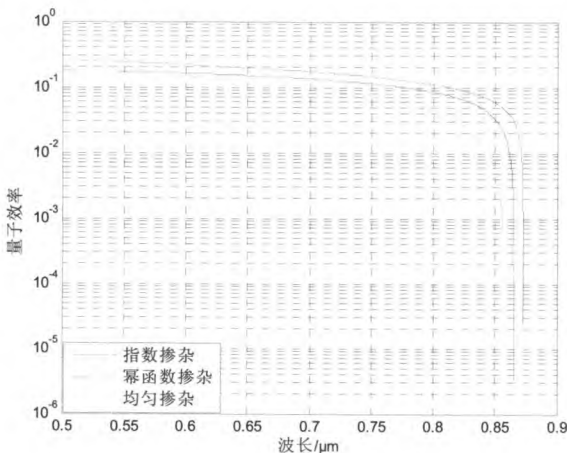


图1 量子效率仿真结果

Fig.1 The simulation results of quantum efficiency

图1为仿真的3种掺杂阴极理论量子效率曲线。从上图中可以看出，低掺杂浓度下指数掺杂阴极的量子效率

子效率较均匀掺杂阴极有明显的提高，对于幂函数掺杂和均匀掺杂，幂函数掺杂阴极量子效率高于均匀掺杂阴极。可见采用幂函数掺杂可以通过引入内建电场来提高阴极的量子效率，这对高掺杂浓度下讨论提高量子效率的掺杂方式具有重要的意义。

4 结论

仿真结果显示幂函数掺杂光电阴极较均匀掺杂光电阴极量子效率得到提高，且通过幂函数掺杂方式形成内建电场式的光电阴极能带弯曲量大，更有利于形成负电子亲和势。幂函数掺杂阴极虽没有指数掺杂阴极量子效率高，但是从载流子统计分布知识可知，P型GaAs材料，当载流子浓度 $p > 8.1 \times 10^{18}$ 时可认为材料能带发生简并，指数掺杂时掺杂浓度范围有载流子进入简并情况发生，但讨论载流子统计分布时仍是基于玻尔兹曼统计分布讨论的，讨论高浓度掺杂情况恒定内建电场的建立幂函数掺杂更准确一些。

此外考虑重掺杂情况下半导体材料发生禁带宽度变窄效应，禁带宽度变窄后，光电发射“三步模型”中阴极材料价带的电子吸收入射光子能量激发到导带的电子比非简并条件下阴极价带跃迁的光电子具有更高跃迁几率。

鉴于目前实际条件的限制，本文还不能通过实验来验证量子效率实际结果，上述分析供同行参考。目前的MBE外延生长最高掺杂浓度可以达到 $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ，对发射层材料实现重掺杂还有较大难度，但如能实现对光电阴极发射层进行重掺杂下幂函数掺杂，其良好的性能和应用前景非常可观，值得尝试。

参考文献：

[1] 邹继军, 常本康, 杨智. 指数掺杂GaAs光电阴极量子效率的理论计算[J]. 物理学报, 2007, 56(5):2992-2997.
[2] 叶良修. 半导体物理学上册[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2007.
[3] 叶良修. 半导体物理学下册[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2009.
[4] 刘元霞, 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.
[5] 邹异松, 刘玉凤, 白廷柱. 光电成像原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.
[6] 刘恩科, 朱秉升, 罗晋生. 半导体物理学[M]. 7版, 北京: 电子工业出版社, 2008.
[7] 李辉. GaAs光电阴极材料光电谱测试技术研究[D]. 南京理工大学, 2008:1-61.
[8] J.S. Escher, P.E. Gregory, S.Y. Hyder, et al. Photoelectric Imaging in the 0.9-1.6 Micron Range[J]. IEEE Electron Device Letters, 1981, EDL-2(5): 123-125.
[9] Estrera, S.Lambert, K.T.Passmore, D.L.Phillips. et al. Development of a 1 to 1.7um image intensifier Tube using a Generation III configuration[C]//Proc.of SPIE, 1952: 258-266.
[10] 周立伟. 夜视像增强器(蓝光延伸与近红外延伸光电阴极)的近期进展[J]. 光学技术, 1998(3): 18-27.
[11] V. Sachno, A. Dolgyh, V. Loctionov. Image Intensifier Tube(I²) with

1.06μm InGaAs-photocathode[C]//18th International Conference on Photoelectronics and Night Vision Devices.Proc of SPIE, 2005, 5834.

[12] Bin Ren, Feng Shi, Hong-chang Cheng, et al. Development of a near infrared image intensifier using a generation III configuration[C] //Proc.SPIE. 2011, 8194: 81943A.

[13] 邹继军, 高频, 杨智, 等. 发射层厚度对反射式 GaAs 光电阴极性能的影响[J]. 光子学报, 2008, 37(6): 1112-1115.

[14] Hamid Z. Fardi and Gita Alaghband. Simulation of hot electron effect in negative-electron-affinity GaN pn junction diodes[C]//Physics and Simulation of Optoelectronic Devices X, Proceedings of SPIE, 2002, 4646.

[15] zoujijun. Gradient-doping negative electron affinity GaAs photo-cathodes[J]. Optical Engineering, 2006, 45(5): 054001-1- 054001-5.

[16] 杜晓晴, 常本康. 利用梯度掺杂获得高量子效率的 GaAs 光电阴极[J]. 光学学报, 2005, 25(10): 1411-1414.

[17] 任玲, 常本康, 侯瑞丽, 等. 均匀掺杂 GaAs 材料光电子的输运性能研究[J]. 物理学报, 2011, 60(8): 087202-1-087202-7.

[18] 杨智, 邹继军. 透射式指数掺杂 GaAs 光电阴极最佳厚度研究[J]. 物理学报, 2010, 59(6): 4290-4295.

[19] 高频, 张益军. 不同结构的反射式 GaAs 光电阴极的光谱特性比较[J]. 红外技术, 2011, 33(07): 429-432.

昆明物理研究所 2014 年研究生招生简章

昆明物理研究所始建于 1958 年，是国内最早从事红外科学与技术研究的高新技术研究所之一，隶属于中国兵器工业集团公司。所区本部占地 156 亩，位于昆明市五华区，光电子产业基地占地 250 亩，位于昆明市经济技术开发区，两区建筑面积 12 万平方米，资产总额 10 亿余元。现有在职员工千余人，围绕红外热成像技术的发展，主要研究开发与生产领域包括红外探测器材料、红外探测器、杜瓦瓶、微型制冷、红外特种加工工艺、电子信号处理、光学系统、热成像系统以及相关的红外测试与检测技术。

我们的目标是建设高科技兵器事业，打造有抱负、负责任、受尊重的兵器团队。我所拥有光学工程硕士、博士一级学科学位授予权和博士后科研工作站。硕士研究生招生报名、考试时间与全国研究生招生报名、考试时间同步；博士研究生每年 1 月预报名，2 月初正式报名，5 月在昆明本部进行初试和复试；博士后进站工作随时进行。2014 年昆明物理研究所硕士研究生招生计划 8 名，博士研究生招生计划 4 名。欢迎广大考生报考！

单位代码：83104

联系部门：人力资源部

联系人：李 萍

电 话：0871-65105242

传 真：0871-65152601

	专业代码、名称及研究方向	招生人数	考 试 科 目	
硕 士 招 生	080300 光学工程	8		
	01 光电系统工程		①101 思想政治理论②201 英语一③301 数学一④801 光电信号处理	
	02 光电子技术		①101 思想政治理论②201 英语一③301 数学一④802 半导体物理	
	03 光电材料		①101 思想政治理论②201 英语一③301 数学一④803 固体物理	
	04 制冷及低温工程		①101 思想政治理论②201 英语一③301 数学一④804 低温制冷技术	
	05 光学计量与测试		①101 思想政治理论②201 英语一③301 数学一④805 光学计量与测试	
	06 光电信息工程		①101 思想政治理论②201 英语一③301 数学一④806 电子电路基础	
	专业代码、名称及研究方向	指导教师	招生人数	考 试 科 目
博 士 招 生	080300 光学工程		4	
	01 光电技术	兰 戈 01		①1001 英语②2002 光电成像技术③3004 光电技术
	02 光电系统工程	苏君红 02		①1001 英语②2002 光电成像技术③3004 光电技术
	03 光电子技术	史衍丽 03		①1001 英语②2005 高等固体物理学③3006 半导体材料与器件
	04 光电材料与器件	姬荣斌 04		①1001 英语②2005 高等固体物理学③3006 半导体材料与器件
	05 制冷及低温工程	陈晓屏 05		①1001 英语②2007 低温制冷原理③3008 高等传热学
	06 模拟及混合信号集成电路设计	姚立斌 06		①1001 英语②2008 模拟电路③3004 光电技术
	07 微光夜视技术	郭 晖 07		①1001 英语②2002 光电成像技术③3003 应用光学

注：考生报考时请仔细查阅当年的招生简章，报考内容以教育部最后公布的内容为准。