

变组分 AlGaAs/GaAs 透射式光电阴极 分辨力特性分析*

邓文娟¹⁾²⁾ 彭新村²⁾ 邹继军^{1)2)†} 江少涛²⁾
郭栋²⁾ 张益军³⁾ 常本康³⁾

1) (东华理工大学, 核技术应用教育部工程研究中心, 南昌 330013)

2) (东华理工大学, 江西省新能源工艺及装备工程技术研究中心, 南昌 330013)

3) (南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

(2014年3月1日收到; 2014年4月29日收到修改稿)

建立了变组分 AlGaAs/GaAs 光电阴极二维载流子输运连续性方程. 在一定的边界条件下, 利用数值计算方法对此方程进行求解, 得到了变组分 AlGaAs/GaAs 光电阴极调制传递函数 (MTF) 理论计算模型. 利用该模型计算了透射式变组分和均匀组分阴极的理论 MTF, 分析了分辨力与 Al 组分变化范围、入射光子波长、AlGaAs 和 GaAs 层厚度的关系. 计算结果表明, 变组分阴极与均匀组分阴极相比, 阴极分辨力显著提高. 当空间频率 f 在 $100\text{--}500\text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 区间时, 分辨力的提高最为明显, 如当 $f = 200\text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 时, 一般可提高 $150\%\text{--}260\%$. 变组分阴极分辨力的提高是内建电场作用的结果, 但内建电场太大时, 也会由于 Al 组分含量过高而影响阴极的长波响应.

关键词: 变组分, 内建电场, 分辨力, 调制传递函数

PACS: 79.60.-i, 42.30.Lr, 73.50.Gr, 73.61.Ey

DOI: 10.7498/aps.63.167902

1 引言

负电子亲和势 (NEA) GaAs 光电阴极是当前最灵敏的辐射探测材料之一, 在微光成像等领域中得到了广泛的应用^[1-6]. 而变组分 AlGaAs/GaAs 光电阴极是在 GaAs 光电阴极基础上发展而来的, 它是通过生长从 AlGaAs 到 GaAs 发射层 Al 组分逐渐降低的变组分 AlGaAs 层, 构建从缓冲层到发射层的内建电场. 该内建电场非常有利于 AlGaAs 缓冲层中光电子向 GaAs 发射层输运, 对提高光电发射性能很有效. 具有相同材料厚度的变组分 AlGaAs/GaAs 光电阴极与普通 NEA GaAs 光电阴极相比, 具有量子效率与成像分辨力更高、响应速度更快、光谱响应范围更宽等众多优点, 在真空电子

源、电子加速器、蓝延伸微光探测及高速摄影等领域有着更为广阔的应用前景^[7-11].

在 GaAs 光电阴极的研究中, 人们对于其量子效率、能量分布、角度分布以及稳定性机理等方面的研究较多, 而较少关注阴极的分辨力, 然而, 阴极分辨力对于成像器件分辨力具有重要影响. 本课题组在阴极分辨力方面开展过一些研究, 文献^[11]仿真分析了变掺杂 GaAs 光电阴极的分辨力特性, 但变组分 AlGaAs/GaAs 光电阴极的内建电场远高于变掺杂阴极, 而且两者的材料光电特性也不尽相同, 因而其阴极分辨力将具有自身特点. 光电子在向发射面输运过程中的横向扩散是造成阴极分辨力下降的主要原因, 如果有一个促进电子向发射面输运的内建电场, 则可以在一定程度上减轻这种扩散的影响. 图 1 反映了这种影响, 可以看出, 在由于

* 国家自然科学基金 (批准号: 61067001, 61261009, 61301023)、教育部科学技术研究重点项目 (批准号: 212090)、江西省自然科学基金 (批准号: 20114BAB202009) 和江西省教育厅科技项目 (批准号: GJJ11491) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: jjzhou@ecit.cn

变组分导致的内建电场作用下, 点光源照射产生的电子输运到阴极发射面(实线)时与 Al 组分为 0 的无内建电场阴极(虚线)相比弥散圆斑半径更小. 因此, 变组分有利于阴极分辨力提高, 但提高程度以及阴极分辨力与发射层厚度、组分比例、入射光子波长等参数的关系, 则需要进行理论上的计算及仿真分析.

变组分 AlGaAs/GaAs 阴极分辨力特性可采用调制传递函数(MTF)法进行分析, MTF 最初用于描述纯光学系统的成像特性, 是傅里叶光学的重要指标之一^[12]. 在一定条件下, 光学成像系统的物和像都可以看成是不同空间频率的正弦光强分布的集合. 阴极中虽然没有类似的光学系统, 但作为一个电子输运过程, 也可以利用 MTF 的原理分析和评价阴极的分辨力特性^[13,14]. 本文以透射式变组分 AlGaAs/GaAs 阴极为例探讨变组分阴极材料分辨力特性.

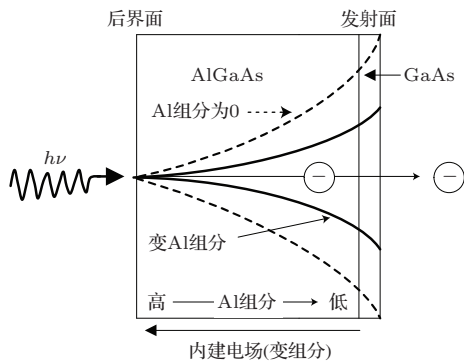


图1 电场作用对光电阴极分辨力的影响

2 变组分 AlGaAs/GaAs 透射式阴极 MTF 模型

变组分 AlGaAs/GaAs 透射式光电阴极结构如图 2 所示, 光从 AlGaAs 层入射, 电子从 GaAs 面发射, 从 AlGaAs 层到 GaAs 层 Al 组分逐渐降低, 从而在变组分 AlGaAs 层中形成内建电场. 根据载流子在二维变组分材料中产生与复合情况, 以及漂移与扩散机理, 可得到透射式变组分 AlGaAs/GaAs 阴极中电子与空穴所遵循的二维连续性方程为

$$D_n(x) \left[\frac{\partial^2 n(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n(x, y)}{\partial y^2} \right] + \mu_n(x) E(x, y) \frac{\partial n(x, y)}{\partial x} - U(x) + G(x) = 0 \quad (1)$$

$(x \in [0, T_e], y \in [-a, a]),$

$$D_p(x) \left[\frac{\partial^2 p(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p(x, y)}{\partial y^2} \right] - \mu_p(x) E(x, y) \frac{\partial p(x, y)}{\partial x} - U(x) + G(x) = 0 \quad (2)$$

$(x \in [0, T_e], y \in [-a, a]);$

光电子产生函数

$$G(x) = \alpha(x) I(y, f) [1 - R(x)] \exp[-\alpha(x)x]. \quad (3)$$

这里, $n(x, y)$ 和 $p(x, y)$ 分别为电子浓度和空穴浓度; $E(x, y)$ 为内建电场强度; μ_n, μ_p 分别为电子迁移率、空穴迁移率; D_n, D_p 分别为电子扩散系数空穴扩散系数; $R(x)$ 为反射率; $\alpha(x)$ 为光子吸收系数; $I(y, f)$ 为入射光强度; T_e 为阴极发射层厚度; $U(x)$ 为载流子总复合(包括直接复合和 SRH 复合).

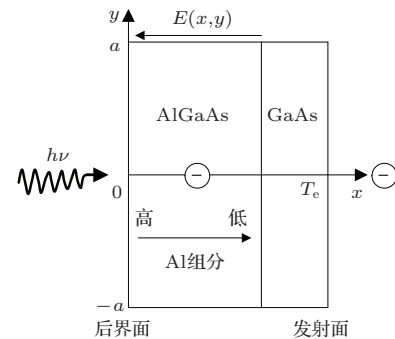


图2 变组分 AlGaAs/GaAs 光电阴极结构示意图

设 AlGaAs/GaAs 材料在 $x = T_e$ 的发射面为发射边界, 其余 3 个接触面为欧姆边界, 当半导体 p 型掺杂浓度 N_a 很高时, 电子与空穴所满足的连续性方程边界条件可分别简化为

$$n(0, y) = n(x, -a) = n(x, a) = n(T_e, y) = 0, \quad (4)$$

$$p(0, y) = p(x, -a) = p(x, a) = p(T_e, y) = N_a. \quad (5)$$

在变组分 AlGaAs 光电阴极材料中, 除了电场和能带结构会发生变化以外, 光子吸收系数、扩散系数、迁移率和载流子复合等参数都会随 Al 组分的变化而改变, 因而变组分材料中光电子输运所满足的连续性方程非常复杂, 不可能得到解析解. 为了解决这一问题, 本文利用有限体积法数值求解所满足的方程, 建立理论模型, 从而解决任意变组分阴极材料的光电发射理论问题.

在建立上述数值计算模型后, 可以从 MTF 定义出发得到阴极的 MTF 计算方法. 根据 MTF 的定义, 空间频率为 f 的信号在像面上的对比度 $C_o(f)$ 与其在物面上的对比度 $C_i(f)$ 的比值即为 MTF. 其

中对比度的定义为

$$C(f) = \frac{N_{\max}(f) - N_{\min}(f)}{N_{\max}(f) + N_{\min}(f)}, \quad (6)$$

式中, $N_{\max}(f)$ 和 $N_{\min}(f)$ 分别为信号强度的最大值和最小值.

设一束强度为 $I(y, f) = \frac{\phi}{2}[1 + \cos(2\pi fy)]$ 的光垂直照射在 AlGaAs 材料上, 产生的电子输运到阴极面后发射到真空中. 根据对比度的定义可知, 物面上入射光强的对比度 $C_i(f)$ 为 1, 这时像面上发射电流密度的对比度 $C_o(f)$ 即为 MTF 值.

$$\text{MTF} = \frac{C_o(f)}{C_i(f)} = C_o(f). \quad (7)$$

3 MTF 仿真结果分析

依据上述模型和仿真方法可计算透射式变组分和均匀组分 AlGaAs/GaAs 阴极的理论 MTF, 从而对两者的分辨力特性进行对比分析, 并讨论分辨力与 Al 组分变化范围、入射光子波长、AlGaAs 和 GaAs 层厚度等参数的关系.

计算时设定温度为室温, AlGaAs 层和 GaAs 层的掺杂浓度均为 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 计算中用到的迁移率、载流子寿命、折射率等参数是取自文献 [15—18] 或对文献数据进行拟合获得, 当 $0 < x < 0.45$ (x 为 Al 组分含量) 时, 迁移率

$$\mu_n = \frac{(8000 - 22000x + 10000x^2)}{2}$$

($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) (由于本文材料 p 型掺杂浓度较高, 电子迁移率只取了原有数据的 1/2), $\mu_p = 370 - 970x + 740x^2$ ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$); 载流子寿命

$$\tau_n = 29.142 + \frac{4.444 - 29.142}{1 + e^{\frac{x-0.3443}{0.00468}}} \text{ (ns)},$$

$$\tau_p = 1.241 + \frac{1342.735 - 1.241}{1 + e^{\frac{x-0.035}{0.022}}} \text{ (ns)}.$$

仿真时分别改变 Al 组分变化范围、入射光子波长、AlGaAs 厚度和 GaAs 厚度, 固定其他参数, 计算得到的变组分和均匀组分 AlGaAs/GaAs 阴极理论 MTF 曲线如图 3 所示. 这里变组分阴极 AlGaAs 层中的 Al 组分由 AlGaAs 往 GaAs 方向线性下降到 0, 而均匀组分阴极则相当于传统的透射式 AlGaAs/GaAs 光电阴极, 只考虑了 GaAs 层中的光电发射. 为了具有可比性, 仿真时设定均匀组分阴极 GaAs 层厚度 T 等于变组分阴极 AlGaAs 层厚度 T_{AlGaAs} 与 GaAs 层厚度 T_{GaAs} 之和.

图 3(a) 中变组分阴极中 Al 组分线性变化范围为 $0 \leq x \leq 0.4$ 和 $0 \leq x \leq 0.2$; 图 3(b)—(d) 中变组

分阴极中 Al 组分线性变化范围均为 $0 \leq x \leq 0.4$. 从图 3 可以看出, 在变组分情况下, 阴极 MTF 均有较明显提高. 当 $f = 100\text{—}500 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 时, MTF 的提高最为明显, 如空间频率 $f = 200 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 时, 提高 150%—260%. MTF 的具体变化由光电子产生及其输运过程所决定, MTF 随着 f 的增加而减小, 这主要与电子向阴极发射面输运时的横向扩散有关.

改变 Al 组分变化范围对阴极 MTF 具有显著影响. 如图 3(a) 所示, 当 $f = 200 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 时, Al 组分由 0.4 下降至 0 的变组分阴极 MTF 为 0.77, Al 组分由 0.2 变化至 0 的阴极 MTF 为 0.53, 而均匀组分阴极的 MTF 为 0.21. 由此可知, Al 组分越大, 阴极分辨力越高, 这与 Al 组分变化越大引起的内建电场越大有关. 但 Al 组分也并非越大越好, 随着 Al 组分的增大, 禁带宽度也随之增加, 部分长波光子的吸收系数小, 更多的光电子在靠近阴极发射面处产生, 它们输运到发射面的距离短, 因而横向扩散小. 而且, 随波长的增大, 变组分阴极 MTF 提高得更为明显, 这主要是由于长波光子的能量小, 在靠近入射面的高 Al 组分材料中没有吸收, 从而靠近发射面产生的光电子比例更高, 再加上电场的作用, 使得变组分阴极 MTF 增长更快. 通过对更多不同波长下阴极 MTF 进行仿真 (图中仅给出了部分结果), 发现入射波长在 750 nm 附近时, 变组分阴极 MTF 提高最为明显, 随后增加的幅值缓慢下降. 这是因为当入射波长在 750 nm 附近时变组分材料的吸收系数下降得较快, 从而近表面电子浓度比例增长得更快.

入射光子波长的改变同样影响 MTF, 如图 3(b) 所示, 随着波长的增大, 变组分和均匀组分阴极的 MTF 都有提高. 这是由于长波光子的吸收系数小, 更多的光电子在靠近阴极发射面处产生, 它们输运到发射面的距离短, 因而横向扩散小. 而且, 随波长的增大, 变组分阴极 MTF 提高得更为明显, 这主要是由于长波光子的能量小, 在靠近入射面的高 Al 组分材料中没有吸收, 从而靠近发射面产生的光电子比例更高, 再加上电场的作用, 使得变组分阴极 MTF 增长更快. 通过对更多不同波长下阴极 MTF 进行仿真 (图中仅给出了部分结果), 发现入射波长在 750 nm 附近时, 变组分阴极 MTF 提高最为明显, 随后增加的幅值缓慢下降. 这是因为当入射波长在 750 nm 附近时变组分材料的吸收系数下降得较快, 从而近表面电子浓度比例增长得更快.

当变组分阴极 AlGaAs 厚度或均匀组分阴极 GaAs 层厚度减小时, 两者的 MTF 都有提高, 这是由于光电子输运到发射面的平均距离减小导致的. 如图 3(c) 所示, 当空间频率 $f < 300 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 时, 均匀组分阴极 MTF 提高更显著, 而当 $f > 300 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 后, 变组分阴极 MTF 提高更明显. 这是因为 AlGaAs 厚度减小时, 电子横向扩散距离减小, 分辨力整体会上会提高, 但是当空间频率较小时, MTF 较大, 内建电场作用体现不充分, 而随着空间频率的增大, 内建电场的作用逐渐显现出来.

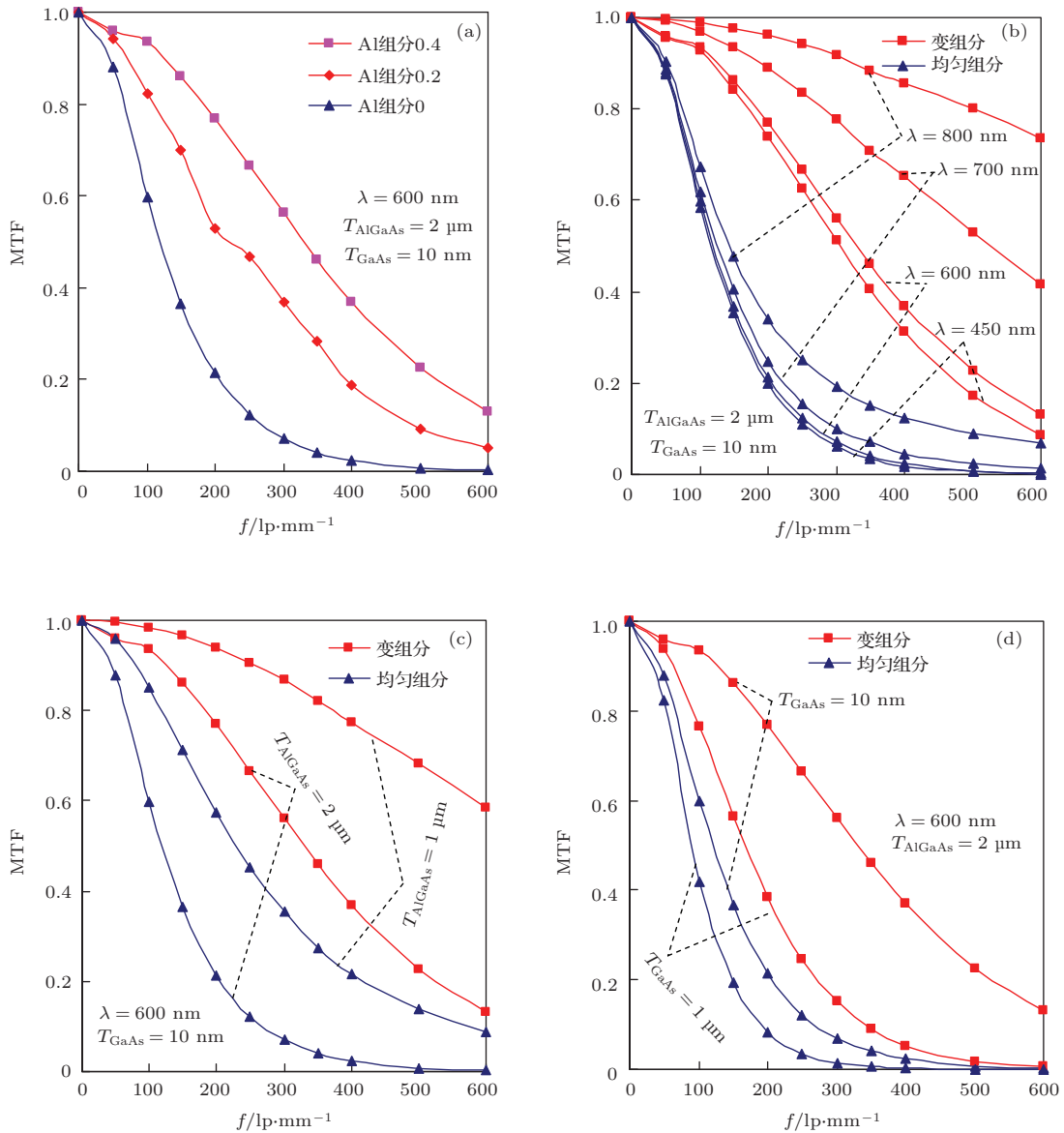


图3 不同条件下, 变组分与均匀组分 AlGaAs/GaAs 光电阴极 MTF 曲线 (a) Al 组分不同; (b) 光子波长不同; (c) AlGaAs 厚度不同; (d) GaAs 厚度不同

当 GaAs 层厚度减小时, 变组分与均匀组分阴极的 MTF 都有提高, 这是因为发射层厚度减小, 光电子发射所需的输运距离减小所致. 如图 3(d) 所示, 随着 GaAs 层厚度的减小, 变组分阴极 MTF 比均匀组分阴极 MTF 提高更显著, 这是由于 GaAs 层中没有内建电场, 当 GaAs 层减小后, 变组分阴极 AlGaAs 层中的内建电场就能更好地发挥作用, 而由于均匀阴极中没有内建电场, 因而 MTF 提高较为有限.

综上所述, 变组分 AlGaAs/GaAs 光电阴极具有远高于均匀组分 GaAs 阴极的分辨力, 这种分辨力提高是通过增强电子在电场作用下向阴极发射面定向运动, 从而减小横向扩散所致. 增大 Al 组分变化范围可以提高阴极分辨力, 但 Al 组分过大

会影响阴极的长波光谱响应; 提高入射光子波长可增加阴极分辨力, 但材料的禁带宽度对波长也提出了相应要求; 减小阴极发射层厚度能提高阴极分辨力, 但厚度太小会影响到阴极的量子效率. 因此在具体应用变组分阴极时, 需要综合考虑各种因素, 兼顾分辨力与量子效率之间的平衡.

4 结 论

通过对变组分 AlGaAs/GaAs 光电阴极 MTF 的建模与仿真, 本文系统研究了阴极分辨力与 Al 组分变化范围、入射光子波长、AlGaAs 或 GaAs 层厚度之间的关系, 并与均匀组分阴极进行了对比分析, 发现采用变 Al 组分能显著提高阴极分辨力, 但

阴极分辨力与多种因素有关, 具体应用时需要综合考虑. 如果结构设计合理, 采用变组分结构在提高阴极分辨力的同时还能提高阴极的量子效率和积分灵敏度, 这在蓝延伸微光探测、高速摄影、电子束平面曝光、真空电子发射等领域中具有很好的应用前景.

参考文献

- [1] Turnbull A A, Evans G B 1968 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **1** 155
- [2] Reng L, Shi F, Guo H, Cui D X, Shi J F, Qian Y S, Wang H G, Chang B K 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 014206 (in Chinese) [任玲, 石峰, 郭晖, 崔东旭, 史继芳, 钱芸生, 王洪刚, 常本康 2013 物理学报 **62** 014206]
- [3] Zhou L W, Li Y, Zhang Z Q, Monastyrski M A, Schelev M Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3591 (in Chinese) [周立伟, 李元, 张智诠, Monastyrski M A, Schelev M Y 2005 物理学报 **54** 3591]
- [4] Estrera J P, Bender E J, Giordana A, Glesener J W, Iosue M, Lin P P, Sinor T W 2000 *Proc. SPIE* **4128** 46
- [5] Zhao J, Chang B K, Zhang Y J, Zhang J J, Shi F, Cheng H C, Cui D X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 037803 (in Chinese) [赵静, 常本康, 张益军, 张俊举, 石峰, 程宏昌, 崔东旭 2012 物理学报 **61** 037803]
- [6] Beauvais J, Chautemps J, Groot P D 1986 *Adv. Electron. Electron Phys.* **64A** 267
- [7] Sinor T W, Estrera J P, Phillips D L, Rector M K 1995 *Proc. SPIE* **2551** 130
- [8] Chen X L, Zhao J, Chang B K, Xu Y, Zhang Y J, Jin M C, Hao G H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 037303 (in Chinese) [陈鑫龙, 赵静, 常本康, 徐源, 张益军, 金睦淳, 郝广辉 2013 物理学报 **62** 037303]
- [9] Zutic I, Fabian J, Sarma S D 2004 *Rev. Mod. Phys.* **76** 323
- [10] Cai Z P, Yang W Z, Tang W D, Hou X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 187901 (in Chinese) [蔡志鹏, 杨文正, 唐伟东, 侯洵 2012 物理学报 **61** 187901]
- [11] Zou J J, Chang B K, Yang Z, Zhang Y J, Qiao J L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5842 (in Chinese) [邹继军, 常本康, 杨智, 张益军, 乔建良 2009 物理学报 **58** 5842]
- [12] Qi X J, Lin B, Cao X Q, Chen Y Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2854 (in Chinese) [戚巽骏, 林斌, 曹向群, 陈钰清 2008 物理学报 **57** 2854]
- [13] Yan J L, Zhao Y N, Zhu C C 1999 *Semicond. Optoelectron.* **20** 252 (in Chinese) [闫金良, 赵银女, 朱长纯 1999 半导体光电 **20** 252]
- [14] Ren L, Chang B K 2011 *Chin. Phys. B* **20** 087308
- [15] Levinshtein M, Rumyantsev R, Shur M 1999 *Handbook Series on Semiconductor Parameters* (Vol.2) (London: World Scientific) pp1-36
- [16] Zarem H A, Lebens J A, Nordstrom K B, Sercel P C, Sanders S, Eng L E, Yariv A, Vahala K J 1989 *Appl. Phys. Lett.* **55** 2622
- [17] Timmons M L, Hutchby J A, Ahrenkiel R K, Dunlavy D J 1988 *GaAs and Related Compounds* (Ser. 96) (Bristol and Philadelphia: Institute of Physics) pp289-294
- [18] Aspnes D E, Kelso S M, Logan R A, Bhat R 1986 *J. Appl. Phys.* **60** 754

Resolution characteristic of graded band-gap AlGaAs/GaAs transmission-mode photocathodes*

Deng Wen-Juan¹⁾²⁾ Peng Xin-Cun²⁾ Zou Ji-Jun^{1)2)†} Jiang Shao-Tao²⁾
Guo Dong²⁾ Zhang Yi-Jun³⁾ Chang Ben-Kang³⁾

1) (*Engineering Research Center of Nuclear Technology Application, Ministry of Education, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China*)

2) (*Engineering Research Center of New Energy Technology and Equipment of Jiangxi Province, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China*)

3) (*School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China*)

(Received 1 March 2014; revised manuscript received 29 April 2014)

Abstract

The modulation transfer function (MTF) of graded band-gap AlGaAs/GaAs transmission-mode photocathodes is numerically solved from the two-dimensional continuity equations. According to the MTF model, we calculate the theoretical MTF of graded band-gap and uniform band-gap transmission-mode photocathodes, and analyze the effects of Al composition, wavelength of incident photon, and thickness values of AlGaAs and GaAs layer on the resolution. The calculated results show that compared with the uniform band-gap photocathode, the graded band-gap structure can increase the resolution of photocathode evidently. If the spatial frequency f ranges from 100 to 500 lp-mm⁻¹, the increase of resolution is more pronounced. Let $f = 200$ lp-mm⁻¹, the resolution of graded band-gap photocathode generally increases 150%–260%. The resolution improvement of graded band-gap photocathode is attributed to the built-in electric field. While too high built-in electric field will influence the spectral response of long-wavelength photons due to higher Al composition in the AlGaAs/GaAs photocathodes.

Keywords: graded band-gap, built-in electric field, resolution, modulation transfer function

PACS: 79.60.-i, 42.30.Lr, 73.50.Gr, 73.61.Ey

DOI: 10.7498/aps.63.167902

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61067001, 61261009, 61301023), the Key Program of Science and Technology Research of Ministry of Education, China (Grant No. 212090), the Natural Science Foundation of Jiangxi Province, China (Grant No. 20114BAB202009), and the Science and Technology Foundation of Education Bureau of Jiangxi Province, China (Grant No. GJJ11491).

† Corresponding author. E-mail: jjzou@ecit.cn