

变掺杂变组分 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 反射式光电阴极分辨力特性

邓文娟 朱斌 王壮飞 彭新村 邹继军

Resolution characteristics of varying doping and varying composition $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ reflective photocathodes

Deng Wen-Juan Zhu Bin Wang Zhuang-Fei Peng Xin-Cun Zou Ji-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 157901 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220244

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220244>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光源光谱特性对空间相机调制传递函数检测的影响

Influence of spectral characteristics of light sources on measuring space camera modulation transfer function

物理学报. 2021, 70(13): 134208 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201575>

一种新型的液闪阵列成像屏空间分辨特性

Spatial resolution of novel liquid scintillating capillary array

物理学报. 2020, 69(6): 062801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191545>

外电场下含有缔合缺陷的 $\text{ZnO}/\text{-Bi}_2\text{O}_3$ 界面电学性能

Electrical properties of $\text{ZnO}/\text{-Bi}_2\text{O}_3$ interfaces featuring aggregation defect under external electric fields

物理学报. 2022, 71(2): 026801 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20210635>

一种基于毛细管X光透镜的微型锥束CT扫描仪

Micro cone-beam CT scanner based on X-ray polycapillary optics

物理学报. 2022, 71(9): 090701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212195>

分形结构稀疏孔径阵列的成像性能

Imaging performance of fractal structuresparse aperture arrays

物理学报. 2019, 68(19): 199501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190818>

光栅局域调控二维光电探测器

Photogating effect in two-dimensional photodetectors

物理学报. 2021, 70(2): 027801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201325>

变掺杂变组分 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 反射式 光电阴极分辨力特性*

邓文娟¹⁾²⁾ 朱斌²⁾ 王壮飞²⁾ 彭新村¹⁾²⁾ 邹继军^{1)†}

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中心, 南昌 330013)

(2022年2月8日收到; 2022年4月11日收到修改稿)

根据建立的变掺杂变组分反射式 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 光电阴极的分辨力模型以及调制传递函数 (MTF) 理论模型, 仿真了材料中掺杂浓度线性变化、Al 组分线性变化, 掺杂浓度均匀不变、Al 组分线性变化, 掺杂浓度线性变化、Al 组分均匀不变, 掺杂浓度均匀不变、Al 组分均匀不变这 4 种不同结构反射式光电阴极的分辨力特性. 分析了 Al 组分、掺杂浓度、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层厚度、GaAs 层厚度和入射光波长对阴极分辨力的影响. 仿真结果表明, 阴极材料中掺杂浓度梯度变化以及 Al 组分梯度变化都可以提高反射式 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 光电阴极的分辨力, 其中掺杂浓度线性变化的同时, Al 组分线性变化对 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 光电阴极分辨力的影响最为明显. 仿真结果还表明: Al 组分从 0.45 线性变化至 0 时, 阴极分辨力最好; 掺杂浓度从 10^{19} — 10^{18} cm^{-3} 线性变化比保持 10^{19} cm^{-3} 不变, 阴极分辨力更好; 而阴极中 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 、GaAs 层厚度以及入射光波长对 4 种阴极分辨力的影响则有着不同的变化规律.

关键词: 变掺杂变组分, 调制传递函数, 内建电场, 分辨力

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

DOI: 10.7498/aps.71.20220244

1 引言

负电子亲和势 GaAs 基光电阴极是像增强器、光电倍增管以及低能电子显微镜的关键组件^[1-4], 被广泛用于电子源和电子加速器装置^[5-8]. 反射式光电阴极因其量子效率高及工艺简单的特点, 越来越广泛应用于像增强器中^[9]. 对于光电阴极, 人们主要关注其量子效率和能量分布, 而较少关注其分辨力特性, 尤其对于反射式光电阴极分辨力特性的研究更少^[10,11]. 在计算像增强器、光电倍增管等的分辨力时, 光电阴极分辨力对器件总分辨力的影响常被忽略. 然而, 光电阴极中光电子转化时, 会降

低其分辨力, 并将传递给后续像处理器. 因而, 研究光电阴极的分辨力特性, 对于提高像增强器的分辨力是有意义的^[12]. 前期研究显示, 材料中掺杂浓度梯度变化以及 Al 组分梯度变化引起的能带变化形成的器件内建电场, 对 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 光电阴极的量子效率有较大影响^[13,14], 一定程度上影响其分辨力^[15,16]. 而且, 梯度变化的 Al 组分结构比梯度变化的掺杂结构引起的电场变化大得多, 结构变化产生的内建电场促使光生载流子朝阴极表面移动, 从而减少了其横向扩散. 如图 1(a) 所示, 在阴极表面, 点光源照射产生的弥散圆斑, Al 组分梯度变化结构的最小, 掺杂浓度梯度变化掺杂结构其次, Al 组分为 0 掺杂均匀不变结构的最大.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61961001, 11875012, 62061001, 61771245)、江西省自然科学基金 (批准号: 20181BAB202026, 20192ACBL20003, 20202BAB202013, 20203BBE53030) 和江西省“双千计划” (批准号: jxsq2019201053) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jizou@ecut.edu.cn

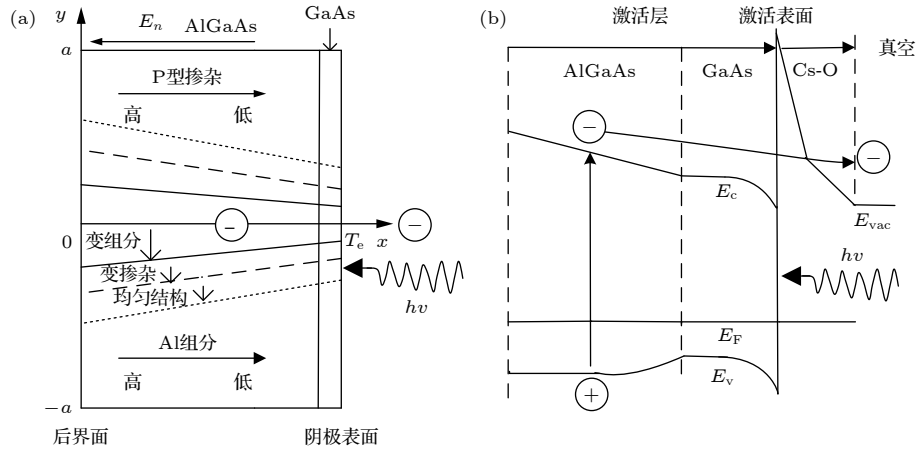


图 1 变掺杂变组分 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 反射式光电阴极结构示意图 (a) 结构及电场影响图; (b) 能带图 (E_c 为导带底, E_v 为价带顶, E_{vac} 为真空能级, E_F 为费米能级, T_e 为激活层厚度)

Fig. 1. Structure diagram of varying doping and varying composition reflection-mode $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ photocathodes: (a) Structure and electric field effect diagram; (b) band structure (E_c is the conduction band minimum, E_v is the valence band peak level, E_{vac} is the vacuum level, E_F is the Fermi level, T_e is the thickness of active layer).

Al 组分变化形式、掺杂变化形式对反射式光电阴极分辨力会有怎样的影响? 根据前期研究, 材料中 Al 组分或掺杂浓度线性变化比指数变化结构对阴极调制传递函数 (MTF) 的影响更大^[17], 因此, 本文讨论掺杂浓度线性变化、Al 组分线性变化, 掺杂浓度均匀不变、Al 组分线性变化, 掺杂浓度线性变化、Al 组分均匀不变, 掺杂浓度均匀不变、Al 组分均匀不变这 4 种结构的 MTF 值, 以及有源层厚度变化, 入射光波长变化等因素对反射式光电阴极分辨力的影响. 为方便描述, 论文中阴极材料掺杂浓度变化称为变掺杂, Al 组分变化称为变组分, 掺杂浓度线性变化称为线性掺杂, 掺杂浓度不变化称为均匀掺杂, Al 组分线性变化称为线性组分, 而 Al 组分为 0 称为均匀组分, 因此以上 4 种结构分别简称为线性掺杂线性组分、均匀掺杂线性组分、线性掺杂均匀组分、均匀组分均匀掺杂反射式 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 光电阴极.

2 变掺杂变组分反射式光电阴极的分辨力模型

反射式 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 光电阴极结构图及能带图如图 1 所示. 光从 GaAs 层入射, 电子也从 GaAs 面发射. 变组分为从 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层到 GaAs 层方向 Al 组分逐渐降低, 变掺杂为从 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层到 GaAs 层方向掺杂浓度逐渐降低, GaAs 层均匀掺杂; 均匀结构则为从 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层到 GaAs 层组分为 0 或者掺杂不变.

当一束强度为 $I(y, f) = \frac{\phi}{2}[1 + \cos(2\pi fy)]$ 的光从阴极表面垂直照射进入变掺杂变组分反射式光电阴极, 光电子在二维变掺杂变组分材料中经过产生、漂移、扩散、复合等过程到达阴极表面并发射出去, 其所遵循的二维连续方程为

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

式中, 光电子产生函数为

$$G(x) = \alpha(x) I(y, f) [1 - R(x)] \exp[-\alpha(x)x]; \quad (2)$$

边界条件为

$$n(0, y) = n(x, -a) = n(x, a) = n(T_e, y) = 0. \quad (3)$$

这里, $D_n(x)$ 为电子扩散系数, $n(x, y)$ 为电子浓度, $\mu_n(x)$ 为电子迁移率, $E(x, y)$ 为内建电场强度, $U(x)$ 为载流子总复合, $G(x)$ 为光电子产生, T_e 为阴极厚度, $\alpha(x)$ 为光子吸收系数, $I(y, f)$ 为入射光强度, $R(x)$ 为反射率.

空间频率为 f 的信号在相面上的对比度 $C_o(f)$ 与物面上的对比度 $C_i(f)$ 的比值, 即为 MTF:

$$\text{MTF} = C_o(f)/C_i(f). \quad (4)$$

对于一定空间频率的余弦光栅成像, 物面上的对比度为 1, 反射式光电阴极像面上对比度实际为发射电流密度的对比度. 仿真中用到的其他材料参数包括: 电子迁移率 $2000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 空穴迁移率

150 cm²·V⁻¹·s⁻¹; 室温下本征电子寿命 10 ns, 本征空穴寿命 30 ns [18–21].

3 反射式光电阴极 MTF 值及其影响因素

3.1 Al 组分变化

空间频率范围为 0—2400 lp/mm 时, 不同结构 Al_xGa_{1-x}As/GaAs 光电阴极的 MTF 值如图 2 所示, 设定空间频率 $f = 0$ 时, 阴极 MTF 值为 1. 图 2(a) 中 Al 组分分别从 0.45, 0.35, 0.25, 0.15 线性变化至 0, 而 Al 组分为 0 则为 GaAs 结构. 随着 Al 组分增加, 阴极 MTF 值增大, 如空间频率 $f = 400$ lp/mm, Al 组分为 0.45, 0.35, 0.25, 0.15, 0 时的 MTF 值分别为 0.93, 0.92, 0.90, 0.86, 0.69. 然而并不是 Al 组分越大越好, 当 Al 组分超过 0.45 时, AlGaAs 材料变成间接带隙, 其材料特性变化较大, 需要另外建模讨论. 此外, 随着空间频率的增加, 阴极 MTF 值都减小, 且 Al 组分越高, 其 MTF 值减小越缓慢. 如空间频率 $f = 400$ lp/mm, Al 组分为 0.45, 0.35, 0.25, 0.15 和 0 时的阴极分辨率与 $f = 0$ lp/mm 时相比, 分别下降了 7%, 8%, 10%, 14% 和 31%; 当 $f = 1600$ lp/mm 时, 各 Al 组分相对应的阴极分辨率与 $f = 0$ lp/mm 时相

比, 分别下降了 51%, 54%, 57%, 61% 和 68%.

3.2 掺杂浓度变化

图 2(b) 仿真了掺杂浓度分别从 10¹⁹—10¹⁸ cm⁻³ 线性变化和保持 10¹⁹ cm⁻³ 不变两种情况对阴极 MTF 值的影响. 随着空间频率增加, 阴极 MTF 值都减小, 如空间频率 $f = 400$ lp/mm 时, 以上两种结构阴极分辨率与 $f = 0$ lp/mm 时相比, 分别下降了 5% 和 7%; 当 $f = 1600$ lp/mm 时, 两种结构阴极分辨率与 $f = 0$ lp/mm 时相比, 分别下降了 44% 和 51%. 掺杂浓度从 10¹⁹—10¹⁸ cm⁻³ 线性变化时的阴极 MTF 值更大, 这是因为掺杂浓度梯度变化时产生的内建电场加速了载流子的定向收集, 但掺杂浓度变化所产生的电场较小, 因而其 MTF 值变化不大.

3.3 四种不同结构的反射式光电阴极 MTF 值

为了更好地讨论变掺杂和变组分不同组合下的阴极 MTF 值, 本文基于 3.1 节和 3.2 节讨论的 Al 组分变化范围和掺杂浓度变化范围, 对 4 种不同结构反射式 Al_xGa_{1-x}As/GaAs 光电阴极进行了仿真, 所采用的组分及掺杂如表 1 所列.

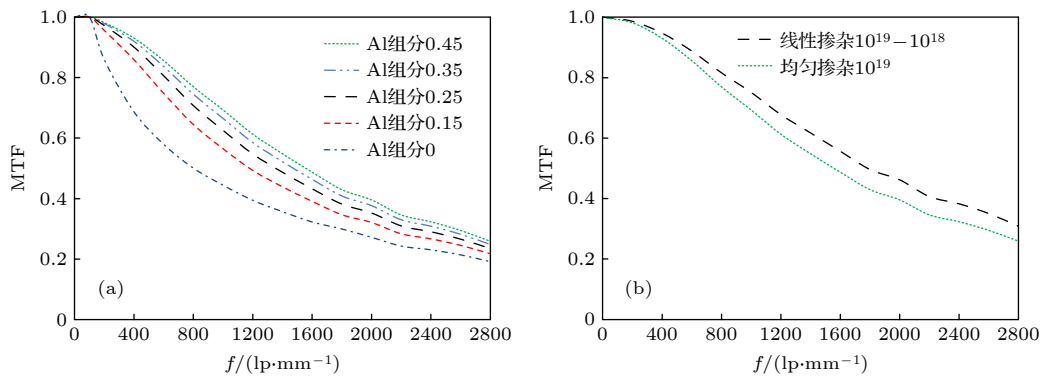


图 2 (a) 变组分及 (b) 变掺杂反射式 Al_xGa_{1-x}As/GaAs 光电阴极的 MTF 值 (a) 均匀掺杂 (掺杂浓度 10¹⁹ cm⁻³), 不同 Al 组分变化; (b) 变掺杂, 组分从 0.45—0 线性变化 (结构中 Al_xGa_{1-x}As 厚度为 1 μm, GaAs 厚度为 10 nm, 入射光波长 λ 为 600 nm)

Fig. 2. MTFs of (a) varying composition and (b) varying doping reflection-mode Al_xGa_{1-x}As/GaAs photocathodes: (a) Uniform doping (doping concentration of 10¹⁹ cm⁻³), varying Al composition; (b) different doping styles, Al linearly changed from 0.45 to 0 (The thickness of Al_xGa_{1-x}As is 1 μm, the thickness of GaAs is 10 nm, and the incident light wavelength λ is 600 nm).

表 1 四种不同结构反射式 Al_xGa_{1-x}As/GaAs 光电阴极参数

Table 1. Parameters of four different reflection-mode Al_xGa_{1-x}As/GaAs photocathodes.

阴极结构	Al 组分	掺杂浓度/cm ⁻³
均匀掺杂均匀组分	0	保持 10 ¹⁹ 不变
均匀掺杂线性组分	从 0.45—0 线性变化	保持 10 ¹⁹ 不变
线性掺杂均匀组分	0	从 10 ¹⁹ —10 ¹⁸ 线性变化
线性掺杂线性组分	从 0.45—0 线性变化	从 10 ¹⁹ —10 ¹⁸ 线性变化

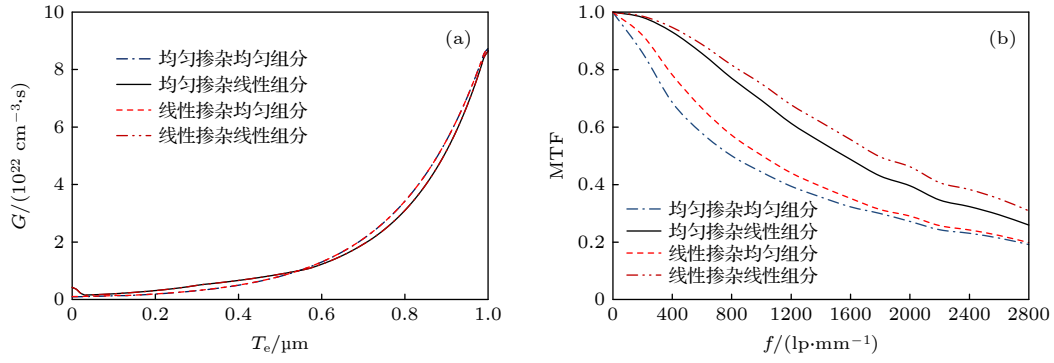


图 3 四种不同结构反射式 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 光电阴极 (a) 光子产生 ($f = 400 \text{ lp/mm}$); (b) 不同空间频率下的 MTF 值 (结构中 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 厚度为 $1 \mu\text{m}$, GaAs 厚度为 10 nm , $\lambda = 600 \text{ nm}$)

Fig. 3. Four types reflection-mode $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ photocathodes: (a) Photons generation ($f = 400 \text{ lp/mm}$); (b) MTFs with the different special frequency (The thickness of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ is $1 \mu\text{m}$, the thickness of GaAs is 10 nm , and $\lambda = 600 \text{ nm}$).

图 3(a) 为材料中光子的产生情况, 由仿真结果可知, 光从阴极表面进入体内产生的光电子浓度指数下降, 主要在发射面附近. 光电子产生后在材料体内经过扩散、漂移、复合最终到达阴极表面并发射. 其中内建电场对光电子的运输影响较大. 表 2 列出了 4 种结构在图 3 和表 1 参数时的内建电场, 在该电场作用下, 光电子能较快速输运至阴极表面, 因而均匀掺杂均匀组分结构阴极 MTF 值最小、线性掺杂线性组分结构阴极 MTF 值最大. 图 3(b) 比较了 4 种反射式 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 阴极随空间频率变化的 MTF 值. 当 $f = 400 \text{ lp/mm}$ 时, 线性掺杂线性组分、均匀掺杂线性组分、线性掺杂均匀组分以及均匀掺杂均匀组分结构阴极分辨率分别为 0.95, 0.93, 0.78, 0.69; 当 $f = 1600 \text{ lp/mm}$ 时, 以上 4 种结构阴极分辨率分别为 0.56, 0.49, 0.35, 0.32, 其中线性掺杂线性组分结构阴极的 MTF 值最高.

表 2 四种不同结构反射式 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 光电阴极内建电场

Table 2. Built-in field of four types reflection-mode $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ photocathodes.

阴极结构类型	$E/(\text{V} \cdot \text{cm}^{-1})$
均匀掺杂均匀组分	0
均匀掺杂线性组分	2099
线性掺杂均匀组分	600
线性掺杂线性组分	2106

3.4 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 厚度及 GaAs 厚度

图 4(a) 显示了 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层厚度对反射式 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 光电阴极 MTF 值的影响. 随着

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层厚度的增加, 内建电场变弱, 电子运行到阴极面的距离增大, 电子的横向扩散增加, 变掺杂变组分结构阴极的 MTF 值都缓慢减小, 其中变组分结构的影响更明显. 以 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层厚度从 $1 \mu\text{m}$ 增加到 $3 \mu\text{m}$ 为例, 线性掺杂线性组分结构 MTF 值减小了 16.9%, 均匀掺杂线性组分结构 MTF 值减小了 17.6%, 线性掺杂均匀组分结构的 MTF 值减小了 4.4%. 然而, 均匀掺杂均匀组分结构阴极的 MTF 值却稍有增大, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层厚度从 $1 \mu\text{m}$ 增加到 $3 \mu\text{m}$ 时, 其 MTF 值增加了 4.9%. 这是因为随着阴极厚度的增加, 在后界面附近产生的光生载流子输运到阴极表面的过程中复合增大, 更少的电子能扩散到阴极表面, 其横向扩散减小, 使得阴极 MTF 值增大.

图 4(b) 为 GaAs 层厚度变化时, 不同结构阴极的 MTF 值. 从仿真结果可知, 随着 GaAs 层厚度增加, 变掺杂变组分结构阴极的 MTF 值都缓慢减小, 其中变组分结构的影响更明显. 以 GaAs 层厚度从 10 nm 增加到 $0.6 \mu\text{m}$ 为例, 线性掺杂线性组分结构 MTF 值减小了 40.7%, 均匀掺杂线性组分结构阴极 MTF 值减小了 36.5%, 线性掺杂均匀组分结构阴极 MTF 值减小了 16%; 然而, 均匀掺杂均匀组分结构阴极 MTF 值随着 GaAs 层厚度从 10 nm 增加到 $0.6 \mu\text{m}$ 稍有增加. 分析其原因, 变组分 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层的内建电场较大^[16], 光生载流子在内建电场下被迅速漂移至 GaAs 层, 随着 GaAs 层厚度增加, 在 GaAs 层载流子横向扩散增加, 因而其分辨率减小. 然而, 均匀掺杂均匀组分结构阴极不存在内建电场, 后界面复合影响使更少的电子能输运到阴极表面, 其横向扩散减小, 使得

阴极 MTF 值微弱增大. 阴极分辨力特性与其量子效率有时是相互矛盾的特性参数, 分辨力的增加可能会伴随量子效率的减小^[9], 因而结构设计中需要合理设计阴极各层厚度.

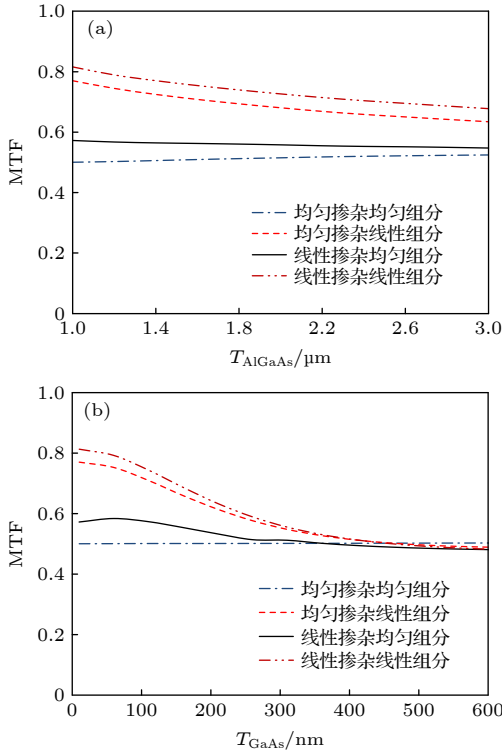


图 4 变掺杂变组分反射式 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 光电阴极的 MTF 值 (a) 将 GaAs 层厚度固定为 10 nm, 改变 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 厚度; (b) 将 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 厚度固定为 1 μm , 改变 GaAs 层厚度 ($\lambda = 600 \text{ nm}$, $f = 800 \text{ lp/mm}$)

Fig. 4. MTFs of varying doping and varying composition reflection-mode $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ photocathodes: (a) GaAs layer thickness is fixed at 10 nm, changing $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ thickness; (b) $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ layer thickness is fixed at 1 μm , changing GaAs thickness ($\lambda = 600 \text{ nm}$, $f = 800 \text{ lp/mm}$).

3.5 入射光波长变化

入射波长不同时, 变掺杂变组分 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 反射式光电阴极 MTF 值如图 5 所示. 由图 5 可知, 4 种结构阴极截止波长均约为 870 nm. 均匀掺杂均匀组分、线性掺杂均匀组分结构随着波长增大, 其 MTF 值减小, 这是因为这两种结构中没有内建电场或内建电场很小. 波长变化为影响阴极 MTF 值的主要因素, 长波的吸收系数小, 光子在更远离表面的材料内部吸收, 光电子输运到电子表面的横向扩散增大, 因而其 MTF 值减小. 线性掺杂线性组分及均匀掺杂线性组分阴极的 MTF 值变化则不一样, 波长从 400 nm 增加到 650 nm 时,

其 MTF 值都随着波长增加而减小; 但是波长从 650 nm 增加至 870 nm 时, 其 MTF 值随着波长增大而增大.

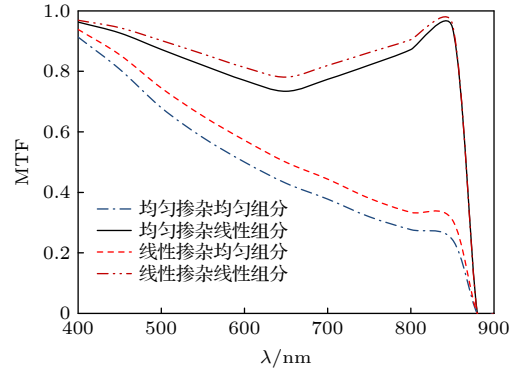


图 5 不同波长入射时, 变掺杂变组分反射式 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 光电阴极 MTF 值 ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层厚度为 1 μm , GaAs 层厚度为 10 nm, $f = 800 \text{ lp/mm}$)

Fig. 5. MTFs of varying doping and varying composition reflection-mode $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ photocathodes with different incident light wavelength (The thickness of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ is 1 μm , the thickness of GaAs is 10 nm, $f = 800 \text{ lp/mm}$).

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料的能带表达式为

$$\begin{cases} E_g = 1.424 + 1.247x, & x \leq 0.45, \\ E_g = 1.9 + 0.125x + 0.143x^2, & x > 0.45. \end{cases} \quad (5)$$

由 (5) 式可知, 当入射光波长较短时, 光在材料中都能被吸收, 此时变组分结构阴极 MTF 值随波长增加而减小的原因与均匀组分结构阴极一样, 也是受长波吸收系数小的影响. 但是随着波长增加, 入射光只在越靠近发射面的低 Al 组分区域吸收 (如 Al 组分为 0.45 时, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料的截止波长为 625 nm; Al 组分为 0.35 时, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料的截止波长为 666 nm). 此时, 光电子输运到阴极表面距离更短, 其横向扩散更小, 因而其 MTF 值开始慢慢增大直至截止波长. 然而, 这个转折点可能受阴极结构、Al 组分大小、掺杂浓度、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层以及 GaAs 层厚度等因素影响, 需要根据不同结构来具体分析.

4 结论

本文通过建立的变掺杂变组分 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 反射式光电阴极分辨力模型, 仿真了线性掺杂线性组分、均匀掺杂线性组分、线性掺杂均匀组分以及均匀掺杂均匀组分 4 种结构 MTF 值, 讨论了 Al 组分变化、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层厚度、GaAs 层厚

度、入射光波长等因素对上述 4 种结构 MTF 值的影响. 仿真结果显示: Al 组分从 0.45 线性变化至 0 时, 阴极分辨率最好; 掺杂浓度线性下降比保持均匀掺杂, 阴极 MTF 值越大; 随 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层厚度或 GaAs 层厚度增大, 变掺杂或变组分阴极的 MTF 值都减小, 而均匀掺杂均匀组分结构阴极 MTF 值均稍有变大; 随着入射光波长增大, 组分不变结构阴极 MTF 值减小, 但变组分阴极 MTF 值则在 400—650 nm 变化区间; 随着波长增大而减小, 在 650—870 nm 变化区间随着波长增大而增大.

参考文献

- [1] Chanlek N, Herbert J D, Jones R M, Jones L B, Middleman K J 2015 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48** 375102
- [2] Kim J, Kim J, Oh H, Meyyappan M, Han J W, Lee J S 2016 *J. Vac. Sci. Technol. B* **34** 042201
- [3] Liu Z, Sun Y, Peterson S, Pianetta P 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 3042
- [4] Zou J J, Chang B K, Yang Z, Qian J L, Zeng Y P 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 1721021
- [5] Karkare S, Dimitrov D, Schaff W, Cultrera L, Bartnik A 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 104904
- [6] Orlov D A, Krantz C, Wolf A, Jaroshevich A S, Kosolobov S N, Scheibler H E, Terekhov A S 2009 *J. Appl. Phys.* **106** 054907
- [7] Yang Y, Yang W Z, Sun C D 2015 *Sol. Energ. Mat. Sol. C.* **132** 410
- [8] Hao G H, Han P Y, Li X H, Li Z P, Gao Y J 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 108501 (in Chinese) [郝光辉, 韩攀阳, 李兴辉, 李泽鹏, 高玉娟 2020 物理学报 **69** 108501]
- [9] Wang H G, Qian Y S, Du Y J, Xu Y, Lu L B, Chang B K 2014 *Appl. Opt.* **53** 335
- [10] Zou J J, Zhang Y J, Peng X C, Deng W J, Feng L, Chang B K 2012 *Appl. Opt.* **51** 7662
- [11] Zhang Y J, Chang B K, Niu J, Zhao J, Zou J J, Shi F, Cheng H C 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 101104
- [12] Wang H G, Fu X Q, Ji X H, Du Y J, Liu J, Qian Y S, Chang B K 2014 *Appl. Opt.* **53** 6230
- [13] Zou J J, Chang B K, Yang Z 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2992 (in Chinese) [邹继军, 常本康, 杨智 2007 物理学报 **56** 2992]
- [14] Zou J J, Zhang Y J, Deng W J, Peng X C, Jiang S T, Chang B K 2015 *Appl. Opt.* **54** 8521
- [15] Niu J, Yang Z, Chang B K, Qiao J L, Zhang Y J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5002 (in Chinese) [牛军, 杨智, 常本康, 乔建良, 张益军 2009 物理学报 **58** 5002]
- [16] Deng W J, Zou J J, Peng X C, Feng L, Zhu Z F, Wang W L, Zhang Y J, Chang B K 2015 *Appl. Opt.* **54** 1414
- [17] Deng W J, Zhang D L, Zou J J, Peng X C, Wang W L, Zhang Y J, Chang B K 2015 *Proceedings of the 2th Photo-electronic Technology Committee Conferences Changchun, China, July 22–24, 2015* p97951X
- [18] Goldberg Y A 1999 *Handbook Series on Semiconductor Parameters (Vol. 2)* (London: World Scientific) pp1–36
- [19] Zarem H A, Lebens J A, Nordstrom K B, Serce P C, Sanders S, Eng L E, Yariv A, Vahala K J 1989 *Appl. Phys. Lett.* **55** 2622
- [20] Timmons M L, Colpitts T S, Venkatasubramanian, Keyes B M, Dunlavy D J, Ahrenkiel R K 1990 *Appl. Phys. Lett.* **56** 1850
- [21] Aspnes D E, Kelso S M, Logan R A, Bhat R 1986 *J. Appl. Phys.* **60** 754

Resolution characteristics of varying doping and varying composition $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ reflective photocathodes*

Deng Wen-Juan¹⁾²⁾ Zhu Bin²⁾ Wang Zhuang-Fei²⁾
 Peng Xin-Cun¹⁾²⁾ Zou Ji-Jun^{1)†}

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

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

(Received 8 February 2022; revised manuscript received 11 April 2022)

Abstract

According to the established resolution model and modulation transfer function (MTF) of varying doping and varying composition reflection-mode (r-mode) $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ photocathode, the resolutions of four types of r-mode photocathodes, i.e. linearly varying doping and linearly varying Al composition, uniform doping and linearly varying Al composition, linearly varying doping and uniform Al composition, uniform doping and uniform Al composition structures, are simulated, and the effects of Al composition, the types of doping, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ layer thickness, GaAs layer thickness, and incident light wavelength on the resolution of cathodes are analyzed. The simulation results indicate that the varying doping and varying band-gap structures can also upgrade the resolution for r-mode $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ photocathodes, and the effect of linearly varying doping and linearly varying composition structure are more pronounced. The simulation results also show that the MTFs of the cathodes with the Al composition varying from 0.45 to 0 linearly declining are highest. The MTFs of the cathodes with the linearly varying doping from 10^{19} – 10^{18} cm^{-3} are higher than that with uniform 10^{19} cm^{-3} doping. With the increase of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ thickness, GaAs thickness and incident light wavelength, the MTFs of four types photocathode have different regularities.

Keywords: varying doping and varying composition, modulation transfer function, built-in electric field, resolution

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

DOI: 10.7498/aps.71.20220244

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61961001, 11875012, 62061001, 61771245), the Natural Science Foundation of Jiangxi Province, China (Grant Nos. 20181BAB202026, 20192ACBL20003, 20202BAB202013, 20203BBE53030), and the Jiangxi “Double Thousand Plan”, China (Grant No. jxsq2019201053).

† Corresponding author. E-mail: jjzou@ecut.edu.cn