

透射式 GaAs 光电阴极性能提高以及结构优化

吕行¹⁾ 富容国^{1)†} 常本康¹⁾ 郭欣²⁾ 王芝³⁾

1) (南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

2) (昆明物理研究所, 昆明 650221)

3) (西安应用光学研究所, 西安 710065)

(2023 年 9 月 21 日收到; 2023 年 10 月 12 日收到修改稿)

为了提高透射式 GaAs 光电阴极性能, 将国内与美国 ITT 公司的透射式 GaAs 光电阴极量子效率曲线进行对比, 可知我国透射式光电阴极积分灵敏度已经达到 2130 $\mu\text{A}/\text{lm}$, 美国 ITT 达到了 2330 $\mu\text{A}/\text{lm}$. 利用修正后的量子效率、光学性能以及积分灵敏度的理论模型, 分别对两者进行光学结构拟合. 结果表明, 国内光电阴极在窗口层和发射层的厚度、电子扩散长度以及后界面复合速率等方面均与 ITT 有一定差距. 为了缩短两者的差距, 优化阴极结构参数, 具体研究了电子扩散长度和发射层厚度对量子效率的影响, 结果表明如果均匀掺杂透射式 GaAs 光电阴极发射层厚度为 1.3 μm 、电子扩散长度为 7 μm , 则积分灵敏度可以达到 2800 $\mu\text{A}/\text{lm}$ 以上.

关键词: GaAs 光电阴极, 透射式, 结构优化, 光学性能, 光电发射性能**PACS:** 78.40.Fy, 78.66.Fd, 78.20.Ci**DOI:** 10.7498/aps.73.20231542

1 引言

透射式 GaAs 光电阴极具有量子效率高、长波响应大的特点, 因而三代像增强器采用 GaAs 光电阴极^[1-3]. 目前大家更多关注透射式 GaAs 光电阴极光电发射性能的研究, 对比国内外的研究成果, 国内实验室制备的透射式 GaAs 光电阴极积分灵敏度为 2130 $\mu\text{A}/\text{lm}$, 而美国 ITT 研制生产的透射式 GaAs 光电阴极积分灵敏度高达 2330 $\mu\text{A}/\text{lm}$. 关于光学性能的研究, 杜晓晴^[4]介绍了 GaAs 光电阴极中发射层吸收系数与量子效率的关系, 张益军^[5]在讨论变掺杂 GaAs 光电阴极相关计算公式时, 提到了对吸收系数的处理方法. 邹继军^[6]在推导反射式 GaAs 光电阴极量子效率公式时研究了电子吸收光子在不同能谷间激发的影响. 关于光电发射性能的研究; 张益军^[5]推导了包含 GaAs 衬底层产生光电子项的反射式指数掺杂 GaAs 光电阴极量子

效率公式, 以及包含 GaAlAs 窗口层产生光电子项的透射式指数掺杂 GaAs 光电阴极量子效率公式. 在这些量子效率公式中都将光学性能的影响看作定值, 没有考虑反射率随组件结构、光子波长的变化. 关于光学性能和光电发射性能之间的研究, 赵静^[7]对量子效率公式进行了光学性能的修正, 同时分析了表征光学性能的吸收率与表征光电发射性能的量子效率之间的关系, 研究了光学性能对光电发射性能的影响. 但是研究光学性能时, 将窗口层的 GaAlAs 和发射层的 GaAs 作为不掺杂的材料考虑, 只是定性地研究了掺杂浓度的影响趋势, 本文对此进行完善, 进一步研究掺杂浓度对光学性能和光电发射性能的影响, 有利于完善透射式 GaAs 光电阴极光学与光电发射性能的研究.

本文开展了对 GaAs 光电阴极光学性能和光电发射性能方面的研究, 考虑光学性能中窗口层的厚度、Al 组分以及发射层的厚度、掺杂浓度对阴极量子效率的影响, 对量子效率公式进行修正. 利用

† 通信作者. E-mail: frguo@njust.edu.cn

光学性能、修正后的量子效率和积分灵敏度的理论模型, 仿真了两者的量子效率曲线, 分析了两者的结构参数和性能参数上的差异. 在此研究基础上, 优化阴极组件结构设计, 提高阴极灵敏度.

2 理论计算

透射式 GaAs 光电阴极结构包括 Si_3N_4 增透层、 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 窗口层、GaAs 发射层, 在研究光在各膜层的传播过程中, 考虑到光在每层膜上的吸收、反射、透射, 采用图 1 所示的矩阵法求解三层膜^[7], 图中 E_0^+ 和 E_0^- 分别表示光在玻璃中入射界面上的正向和反向传播电场分量, E_1^+ 和 E_1^- 分别表示光在增透层中入射界面上的正向和反向传播电场分量, E_2^+ 和 E_2^- 分别表示光在窗口层中入射界面上的正向和反向传播电场分量, E_3^+ 和 E_3^- 分别表示光在发射层中入射界面上的正向和反向传播电场分量, E_4 表示光在真空中传播电场分量.

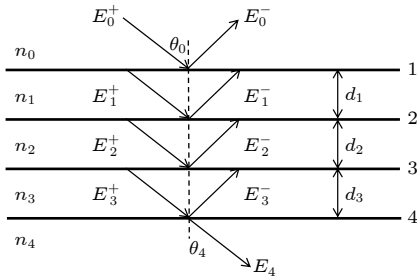


图 1 求解三层膜的矩阵法
Fig. 1. Matrix method for solving three film.

透射式 GaAs 光电阴极结构中, Si_3N_4 层、 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 层和 GaAs 层分别用一个包含该膜层参数的矩阵表示, 在膜层 1 和 2 上应用边界条件可以得到

$$\begin{bmatrix} E_0 \\ H_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta_2 & \frac{i}{\eta_2}\sin\delta_2 \\ i\eta_2\sin\delta_2 & \cos\delta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{22} \\ H_{22} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

在膜层 2 和 3 上, 膜层 3 和 4 上分别应用边界条件得到

$$\begin{bmatrix} E_{12} \\ H_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta_2 & \frac{i}{\eta_2}\sin\delta_2 \\ i\eta_2\sin\delta_2 & \cos\delta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{33} \\ H_{33} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} E_{23} \\ H_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta_3 & \frac{i}{\eta_3}\sin\delta_3 \\ i\eta_3\sin\delta_3 & \cos\delta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_4 \\ H_4 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

这里, H_0 为玻璃的厚度, E_{12} 为增透层材料的弹性模量, H_{12} 为增透层的厚度, E_{22} 和 E_{23} 为窗口层材料的弹性模量, H_{22} 和 H_{23} 为窗口层的厚度, E_{33} 为发射层材料的弹性模量, H_{33} 为发射层的厚度, H_4 为真空层的厚度. 由于各膜层上具有连续的切向分量, 即 $\begin{bmatrix} E_{j-1,j} \\ H_{j-1,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{j,j} \\ H_{j,j} \end{bmatrix}$, 经过连续的线性变换, 可得到透射式 GaAs 光电阴极膜系组合的矩阵方程式:

$$\begin{bmatrix} E_0 \\ H_0 \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^3 \begin{bmatrix} \cos\delta_j & \frac{i}{\eta_j}\sin\delta_j \\ i\eta_j\sin\delta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} E_4 \\ H_4 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

由于膜层和基底组合的导纳 $Y = H_0/E_0$, 且基底中只有正向波, 没有反向波, $H_{K+1}/E_{K+1} = \eta_{K+1}$, 代入 (4) 式得

$$E_0 \begin{bmatrix} 1 \\ Y \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^3 \begin{bmatrix} \cos\delta_j & \frac{i}{\eta_j}\sin\delta_j \\ i\eta_j\sin\delta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_4 \end{bmatrix} E_4. \quad (5)$$

可得到上述膜系的特征矩阵为

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^3 \begin{bmatrix} \cos\delta_j & \frac{i}{\eta_j}\sin\delta_j \\ i\eta_j\sin\delta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} + \eta_4 a_{12} \\ a_{21} + \eta_4 a_{22} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

这里 δ_j 为膜层的相位厚度; $n_j = n_j - ik_j$ 为膜层光学常数, n_j , k_j 分别是第 j 层膜的折射率和消光系数; d_j 是膜层的几何厚度; θ_j 是第 j 层膜的折射角.

透射式 GaAs 光电阴极膜系组合的理论反射率 R_{the} 计算为

$$R_{\text{the}} = \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right)^* = \left[\frac{\eta_0(a_{11} + \eta_4 a_{12}) - (a_{21} + \eta_4 a_{22})}{\eta_0(a_{11} + \eta_4 a_{12}) + (a_{21} + \eta_4 a_{22})} \right]^2. \quad (7)$$

由 (6) 式和 (7) 式可得, 透射式 GaAs 光电阴极膜系组合的反射率会随着膜层的几何厚度以及光学常数的变化而变化.

对均匀掺杂透射式 GaAs 光电阴极, 其量子效率为^[8]

$$Y_{TC}(h\nu) = \frac{P(1-R)}{a_{h\nu}^2 L_D^2 - 1} \times \left\{ \frac{a_{h\nu} D_n + S_V}{(D_n/L_D) \cosh(T_e/L_D) + S_V \sinh(T_e/L_D)} - \frac{\exp(-a_{h\nu} T_e) [S_V \cosh(T_e/L_D) + (D_n/L_D) \sinh(T_e/L_D)]}{(D_n/L_D) \cosh(T_e/L_D) + S_V \sinh(T_e/L_D)} - a_{h\nu} L_D \exp(-a_{h\nu} T_e) \right\}. \quad (8)$$

式中 S_V 为后界面复合速率; T_e 为阴极发射层厚度; L_D 为电子扩散长度; P 为电子逸出概率; D_n 为电子扩散系数; $a_{h\nu}$ 为阴极对入射光的吸收系数; R 为阴极对入射光的反射率, R 一般为定值, 取为 0.2; h 为普朗克常数; ν 为光的频率. 然而由文献 [8,9] 可知, 反射率会随着光电阴极窗口层、发射

层以及波长变化, 是个变值. 因而在原先量子效率公式的基础上, 将定值 R 替换成 $R_{thc}(h\nu)$. 此外考虑光子在窗口层的吸收, 加入短波约束因子 $\exp(-\beta_{h\nu} T_w)$.

修正后的均匀掺杂透射式 GaAs 光电阴极量子效率公式可写为

$$Y_{TC}(h\nu) = \frac{P(1-R_{thc}(h\nu)) \exp(-\beta_{h\nu} T_w)}{a_{h\nu}^2 L_D^2 - 1} \times \left\{ \frac{a_{h\nu} D_n + S_V}{(D_n/L_D) \cosh(T_e/L_D) + S_V \sinh(T_e/L_D)} - \frac{\exp(-a_{h\nu} T_e) [S_V \cosh(T_e/L_D) + (D_n/L_D) \sinh(T_e/L_D)]}{(D_n/L_D) \cosh(T_e/L_D) + S_V \sinh(T_e/L_D)} - a_{h\nu} L_D \exp(-a_{h\nu} T_e) \right\}. \quad (9)$$

式中, $\beta_{h\nu}$ 为窗口层的吸收系数, T_w 为窗口层的厚度. 从修正后的量子效率公式 (9) 可知, 若考虑光学性能对量子效率的影响, 则量子效率的影响因素又包括发射层和窗口层的厚度、窗口层的 Al 组分以及发射层的掺杂浓度, 其中 Al 组分是通过影响折射率和消光系数来影响光电阴极的量子效率, 掺杂浓度是通过影响吸收系数来影响光电阴极的量子效率.

图 2 为 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 层的折射率和消光系数随 Al 组分的变化. 消光系数和折射率通过影响反射

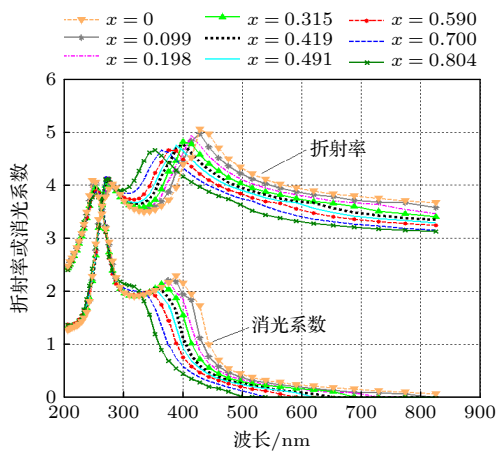


图 2 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 光学常数随 Al 组分的变化 [10]

Fig. 2. Variation of the $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ optical constant with the Al component [10].

率, 从而对光电阴极的量子效率有影响, 图 3 为量子效率随 Al 组分的变化, 可以看出, 随 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 层 Al 组分的增加, 400—700 nm 波段上的量子效率增加, 870 nm 以后波段量子效率不变.

图 4 为 GaAs 层掺杂浓度对材料吸收系数的影响. 根据吸收系数 $a_{h\nu}$ 与消光系数 k 的关系 $a_{h\nu} = 4\pi k/\lambda$ [11-13] 可知, 掺杂浓度通过影响消光系数从而对光电阴极的量子效率有影响, 其中 λ 为波长. 图 5 为量子效率随掺杂浓度的变化, 可以看出, 870 nm 之前, 量子效率随着掺杂浓度的增加而减小; 870 nm 之后, 量子效率随着掺杂浓度的增加而增大.

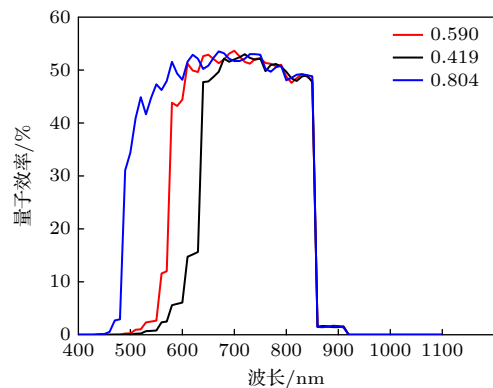


图 3 量子效率随 Al 组分的变化

Fig. 3. Variation of the quantum efficiency with the Al components.

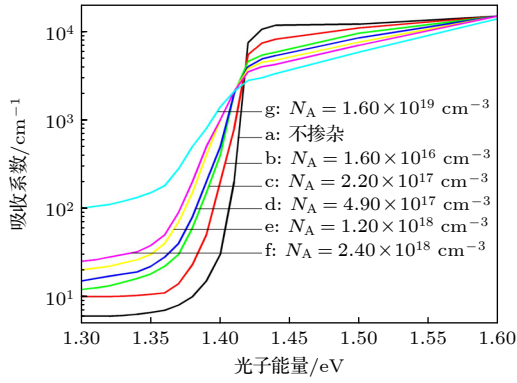


图 4 GaAs 层掺杂浓度对材料吸收系数的影响

Fig. 4. Effect of GaAs-layer doping concentration on the absorption coefficient of materials.

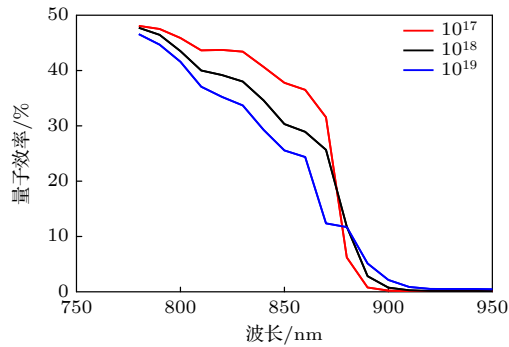


图 5 量子效率随掺杂浓度的变化

Fig. 5. Variation of quantum efficiency with the doping concentration.

考虑影响光谱响应参数的因素,包括发射层和窗口层的厚度、窗口层的 Al 组分、发射层的掺杂浓度、电子扩散长度、表面逸出概率以及后界面复合速率.设计透射式 GaAs 光电阴极光学结构软件,通过改变各个光学结构参数得到最大光谱响应值.

3 实验曲线

图 6 为国产和 ITT 典型 GaAs 光电阴极的量子效率曲线.从整个波段可以产出,国产透射式阴极与 ITT 之间差距不大,短波段和长波段略低于 ITT,量子效率峰值略高于 ITT,两条量子效率曲线的具体光谱响应参数对比如表 1 所列.

子效率曲线.从整个波段可以产出,国产透射式阴极与 ITT 之间差距不大,短波段和长波段略低于 ITT,量子效率峰值略高于 ITT,两条量子效率曲线的具体光谱响应参数对比如表 1 所列.

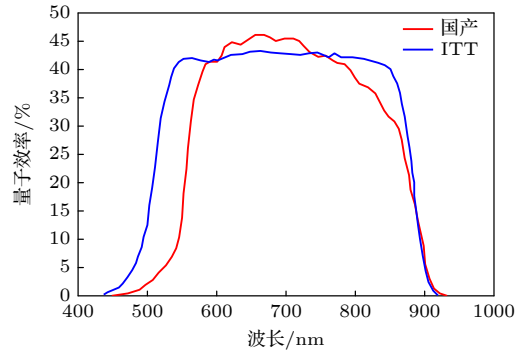


图 6 国产与 ITT 光电阴极量子效率对比 [14,15]

Fig. 6. Comparison of domestic and ITT photoelectric cathode quantum efficiency [14,15].

为了进一步研究 ITT 光电阴极的光学结构,对其量子效率曲线进行拟合仿真,仿真过程中考虑光学性能对量子效率的影响因素以及修正后的量子效率公式,拟合计算得到光电阴极的性能参数,列入表 2 中.

从表 2 可以看出,ITT 电子扩散长度要比国内的大,电子扩散长度越大,产生光电子的有效面积越大,到达阴极表面的光电子数目越多,量子效率越大 [16].变掺杂发射层设计会使体内产生内建电场,可以使电子扩散长度更大 [17-19].在发射层厚度方面,国内外光电阴极相差不大.对于不同结构的光电阴极,存在一个最佳发射层厚度使得量子效率最大.国内由于设备以及制作工艺不完善,无法对阴极膜层厚度进行精确控制,导致了光谱响应短波段的差异.在后界面复合速率方面,国内均匀掺杂光电阴极的后界面速率只能达到 10^5 cm/s,而国外光电阴极后界面复合速率已经达到小于 10^4 cm/s,

表 1 国内外透射式 GaAs 光电阴极光谱响应参数对比

Table 1. Comparison of response parameters of transmitted GaAs photocathode spectrum at home and abroad.

曲线	起始波长/nm	截止波长/nm	峰值波长/nm	量子效率峰值/%	积分灵敏度/($\mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$)
国内	450	930	710	45	2130
ITT	440	920	660	43	2330

表 2 透射式光电阴极性能参数的对比

Table 2. Comparison of the performance parameters of the transmitted photocathode.

类型	表面逸出概率	电子扩散长度/ μm	后界面复合速率/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	发射层厚度/ μm	窗口层厚度/ μm	窗口层 Al 组分	阴极灵敏度/($\mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$)
国内	0.52	2.5	100000	1.5	0.4	0.7	2130
ITT	0.52	3.5	10000	1.3	0.4	1.3	2330

国内通过变组分^[20]窗口层设计可以使后界面速率降到与 ITT 同样的数量级水平,在一定变化范围内后界面复合速率值对量子效率没有太大影响。

4 讨论

在上述我国与 ITT 量子效率的对比中,可以看出两者还存在一定差距,为了缩短差距,通过仿真分析发射层厚度和电子扩散长度对透射式 GaAs 光电阴极积分灵敏度的影响。

基于阴极修正后的量子效率公式以及光学性能对量子效率的影响因素,对阴极的理论灵敏度进行研究分析,从而优化和指导阴极的结构设计. 假设初始的 Si_3N_4 层厚度 $T_a = 0.1 \mu\text{m}$, 折射率 2.06, $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 层厚度 $T_w = 0.4 \mu\text{m}$, 组分 $x = 0.7$, $P = 0.52$, $S_V = 10^5 \text{ cm/s}$ 和 $D_n = 120 \text{ cm}^2/\text{s}$. 计算时单独改变发射层厚度或电子扩散长度,研究其对阴极积分灵敏度或量子效率的作用。

4.1 阴极积分灵敏度仿真分析

当电子扩散长度一定时,阴极积分灵敏度随阴极发射层厚度的变化如图 7 所示. 可以看出,当电子扩散长度 $L_d = 3 \mu\text{m}$ 时,透射式阴极获得最高灵敏度的发射层厚度为 $1.2 \mu\text{m}$,而当 $L_d = 4 \mu\text{m}$ 时,最佳厚度为 $1.5 \mu\text{m}$. 随着电子扩散长度的增加,阴极达到最高灵敏度的发射层厚度也在增加,即最佳发射层厚度增加. 这主要是由于电子扩散长度越大,光电子的有效区域越大,发射层厚度也就越大。

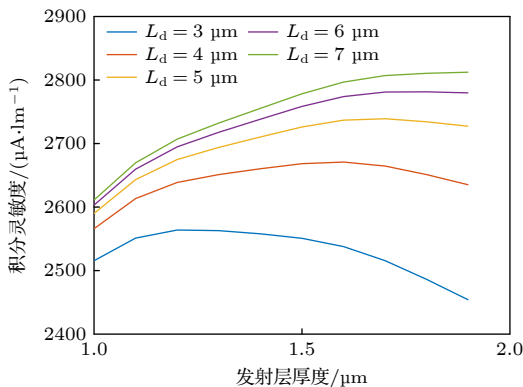


图 7 透射式阴极理论灵敏度随 T_e 的变化

Fig. 7. Variation of the sensitivity of the transmission cathode theory with T_e .

当改变电子扩散长度而保持阴极发射层厚度不变时,可得到如图 8 所示的计算结果. 可以看出,

随着电子扩散长度的增加,透射式阴极的灵敏度也在逐步增加. 电子扩散长度较小时,阴极发射层厚度越大,灵敏度越小;且随着电子扩散长度的增加,发射层厚度大的阴极增加幅度最大,灵敏度可达到 $2800 \mu\text{A}/\text{lm}$.

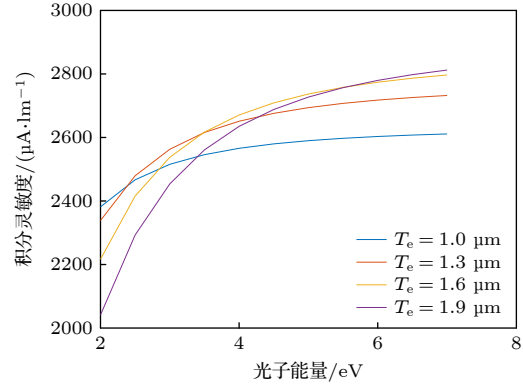


图 8 透射式阴极理论灵敏度随 L_d 的变化

Fig. 8. Variation of the theoretical sensitivity of the transmission cathode with L_d .

4.2 阴极量子效率曲线仿真分析

当电子扩散长度一定时,阴极量子效率随阴极发射层厚度的变化如图 9 所示. 可以看出,随着厚度的增加,短波响应不变,长波响应不断提高. 厚度增加,发射层吸收光子增多,从而激发的光电子也增多,量子效率提高. 当发射层厚度大于一定值时,吸收的光子不能激发光电子,量子效率下降。

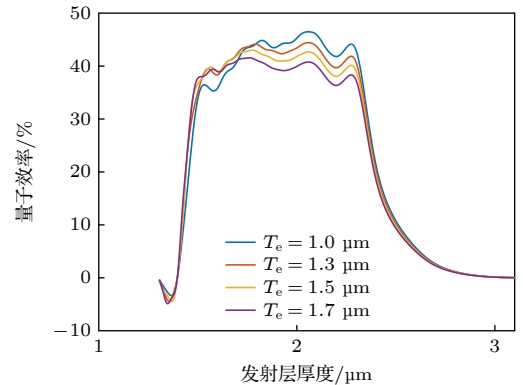


图 9 透射式阴极理论量子效率随 T_e 的变化

Fig. 9. Variation of quantum efficiency of transmission cathode theory with T_e .

当改变电子扩散长度而保持阴极发射层厚度不变时,可得到如图 10 所示的计算结果. 可以看出,随着电子扩散长度的增加,短波响应不变,长波响应部分提高. 这是因为电子扩散长度越大,到

达阴极表面的光电子数目将增加,量子效率也就越大,量子效率可达 50%。

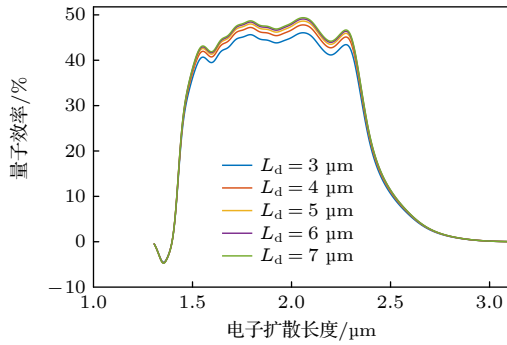


图 10 透射式阴极理论量子效率随 L_d 的变化

Fig. 10. Variation of quantum efficiency of transmission cathode theory with L_d .

5 结 论

透射式 GaAs 光电阴极结构中包含 3 个膜层,在研究光在各膜层的传播过程中,考虑到光在每层膜上的吸收、反射、透射,通过矩阵法求解三层膜,得到透射式 GaAs 光电阴极膜系组合的理论反射率,基于均匀掺杂透射式 GaAs 光电阴极量子效率公式,将定值 R 替换成变值 R_{the} ,同时加入短波约束因子,对量子效率公式进行修正,得到修正后的均匀掺杂透射式 GaAs 光电阴极量子效率公式.同时也仿真了量子效率随 Al 组分和掺杂浓度的变化而变化,可得到量子效率值最大时的 Al 组分值和掺杂浓度.在此基础上,为了缩短与国外之间的差距,研究了国产以及 ITT 透射式光电阴极的光学性能以及光电发射特性.国内阴极灵敏度能达到 $2130 \mu\text{A}/\text{lm}$,而国外能达到 $2330 \mu\text{A}/\text{lm}$,通过对美国 ITT 公司量子效率曲线的拟合,反推出 ITT 阴极组件的性能参数,与国内性能参数对比后得出主要是电子扩散长度以及发射层厚度的差距.设计透射式 GaAs 光电阴极光学结构软件,进一步具体分析电子扩散长度和发射层厚度对光电阴极量子效率的影响,从而优化阴极结构,结果表明电子扩散长度为 $7 \mu\text{m}$,发射层厚度为 $1.5 \mu\text{m}$ 时,透射式 GaAs 光电阴极灵敏度能达到 $2800 \mu\text{A}/\text{lm}$ 以上.然而大的电子扩散长度对阴极材料和制备水平具有很高的要求,导致我国与国内差距的原因一方面是阴极材料生长工艺不成熟,另一方面是阴极制备设备的落后.本文研究了 GaAs 光电阴极光学性能和光电发射性能之间的关系,进一步对阴极组件结

构设计进行优化,这对提高阴极量子效率以及像增强器的水平有一定的指导意义。

参考文献

- [1] Li X F, He Y B, Xu C P, Li J S, Zhang Q D 2022 *Infrared Technol.* **44** 1249 (in Chinese) [李晓峰, 何雁彬, 徐传平, 李金沙, 张勤东 2022 *红外技术* **44** 1249]
- [2] Zhang Y J 2022 *Infrared Technol.* **44** 778 (in Chinese) [张益军 2022 *红外技术* **44** 778]
- [3] Li X D, Jiang Z G, Gu Q, Zhao M H, Guo L 2020 *Chin. Phys. Lett.* **37** 012901
- [4] Du X Q 2005 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University of Science and Technology) (in Chinese) [杜晓晴 2005 博士学位论文 (南京: 南京理工大学)]
- [5] Zhang Y J 2012 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University of Science and Technology) (in Chinese) [张益军 2012 博士学位论文 (南京: 南京理工大学)]
- [6] Zou J J 2007 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University of Science and Technology) (in Chinese) [邹继军 2007 博士学位论文 (南京: 南京理工大学)]
- [7] Zhao J 2013 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University of Science and Technology) (in Chinese) [赵静 2013 博士学位论文 (南京: 南京理工大学)]
- [8] 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]
- [9] Yang Z, Zou J J, Chang B K 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4290 (in Chinese) [杨智, 邹继军, 常本康 2010 *物理学报* **59** 4290]
- [10] Liu E K, Zhu B S, Luo J S 2008 *Semiconductor Physics* (Beijing: Press of Electronic Industry) (in Chinese) [刘恩科, 朱秉升, 罗晋生 2008 *半导体物理学* (北京: 电子工业出版社)]
- [11] Neamen D A (translated by Zhao Y Q, Yao S Y, Xie X D) 2005 *Semiconductor Physics and Devices* (Beijing: Electronic Industry Press) (in Chinese) [唐纳德·内曼著 (赵毅强, 姚素英, 解晓东 译) 2005 *半导体物理与器件* (北京: 电子工业出版社)]
- [12] Zhang G 2021 *M. S. Thesis* (Nanjing: Nanjing University of Science and Technology) (in Chinese) [张嘎 2021 硕士学位论文 (南京: 南京理工大学)]
- [13] Zhao J, Zhang Y J, Chang B K, Xiong Y J, Zhang J J, Shi F, Cheng H C, Cui D X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 107802 (in Chinese) [赵静, 张益军, 常本康, 熊雅娟, 张俊举, 石峰, 程宏昌, 崔东旭 2011 *物理学报* **60** 107802]
- [14] Shi F, Zhao J, Cheng H C, Zhang Y J, Xiong Y J, Chang B K 2012 *Spectrosc. Spectral Anal.* **32** 297 (in Chinese) [石峰, 赵静, 程宏昌, 张益军, 熊雅娟, 常本康 2012 *光谱学与光谱分析* **32** 297]
- [15] 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]
- [16] Guo X Y 2011 *M. S. Thesis* (Nanjing: Nanjing University of Science and Technology) (in Chinese) [郭向阳 2011 硕士学位论文 (南京: 南京理工大学)]
- [17] Feng C, Zhang Y J, Qian Y S, et al. 2016 *Opt. Commun.* **369** 50
- [18] Feng C, Zhang Y J, Qian Y S, Chang B K, Shi F, Jiao G C 2015 *Opt. Express* **194** 7888
- [19] Feng C, Zhang Y J, Qian Y S 2015 *Chin. Sciencepaper* **10** 1916 (in Chinese) [冯琰, 张益军, 钱芸生 2015 *中国科技论文* **10** 1916]
- [20] Feng C 2018 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University of Science and Technology) (in Chinese) [冯琰 2018 博士学位论文 (南京: 南京理工大学)]

Improvement and structure optimization of transmission-mode GaAs photocathode performance

Lü Xing¹⁾ Fu Rong-Guo^{1)†} Chang Ben-Kang¹⁾ Guo Xin²⁾ Wang Zhi³⁾

1) (*Institute of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of*

Science & Technology, Nanjing 210094, China)

2) (*Kunming Institute of Physics, Kunming 650221, China*)

3) (*Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China*)

(Received 21 September 2023; revised manuscript received 12 October 2023)

Abstract

In order to improve the performance of transmitted GaAs photoelectric cathode, the quantum efficiency curve of Chinese transmitted GaAs photoelectric cathode is compared with that of the product of American ITT company, showing that the integration sensitivity of Chinese transmitted photoelectric cathode is 2130 $\mu\text{A}/\text{lm}$, and the American ITT company's reaches 2330 $\mu\text{A}/\text{lm}$. Through the matrix method to solve the three membranes, the theoretical reflectivity is obtained. Based on the uniform doping transmission GaAs photocathode quantum efficiency formula, by replacing the fixed value R with variable value R_{the} , adding the short wave constraint factor, and modifying the quantum efficiency formula, a modified uniform doping transmission GaAs photocathode quantum efficiency formula is obtained. Using the revised quantum efficiency, optical performance and integral sensitivity theory model, through fitting the quantum efficiency curve of American ITT company product, introducing the ITT cathode component performance parameters, comparing the performance parameters of Chinese product, the results show that the Chinese photocathode in the window layer, the thickness of the emission layer, electron diffusion length and rear interface composite rate has a certain gap with ITT's. In order to shorten the gap between the two and optimize the cathode structure parameters, the transmission GaAs photocathode optical structure software is designed to further analyze the influence of the electron diffusion length and the emission layer thickness on the quantum efficiency of the photocathode. The results show that with an electron diffusion length of 7 μm and emission layer thickness of 1.5 μm , the transmitted GaAs photocathode sensitivity can be more than 2800 $\mu\text{A}/\text{lm}$. However, the large electron diffusion length has high requirements for cathode materials and preparation level. The reasons responsible for the performance gap between Chinese product and other country's are that in China the growth process of cathode materials is not yet mature and the cathode preparation equipment is out of date. In this paper, we study the relationship between GaAs photocathode optical performance and photoemission performance, and further optimize the structural design of cathode components, which has certain guiding significance for improving the cathode quantum efficiency and the level of image intensifier.

Keywords: GaAs photocathode, transmission-mode, optimum structure, optical performance, photoemission performance

PACS: 78.40.Fy, 78.66.Fd, 78.20.Ci

DOI: 10.7498/aps.73.20231542

† Corresponding author. E-mail: frguo@njust.edu.cn



透射式GaAs光电阴极性能提高以及结构优化

吕行 富容国 常本康 郭欣 王芝

Improvement and structure optimization of transmission-mode GaAs photocathode performance

Lü Xing Fu Rong-Guo Chang Ben-Kang Guo Xin Wang Zhi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 037801 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231542

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231542>

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

真空沟道结构GaAs光电阴极电子发射特性

The electron emission characteristics of GaAs photocathode with vacuum-channel structure

物理学报. 2020, 69(10): 108501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191893>

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

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

物理学报. 2022, 71(15): 157901 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220244>

基于流体模型的碳纳米管电离式传感器的结构优化方法

Structure optimization of carbon nanotube ionization sensor based on fluid model

物理学报. 2021, 70(9): 090701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201828>

钡钨阴极优化与热电子发射性能

Improvement of barium tungsten cathode and investigation of thermionic emission performance

物理学报. 2022, 71(4): 047901 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211684>

离子束表面处理对光电阴极发射的影响

Effect of ion-beam surface treatment on photocathode emission

物理学报. 2021, 70(21): 218503 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210587>

基于V形超表面的透射式太赫兹线偏振转换器

Transmission polarization converter based on V-shaped metasurface in terahertz region

物理学报. 2022, 71(23): 230701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221259>