

光 and 电注入变带隙 AlGaAs/GaAs 负电子亲和势阵列阴极理论建模和结构特性分析*

邓文娟¹⁾²⁾ 周甜²⁾ 王壮飞²⁾ 吴粤川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 7 月 5 日收到; 2022 年 8 月 15 日收到修改稿)

为了使具备光 and 电注入 AlGaAs/GaAs 负电子亲和势 (NEA) 阵列阴极获得较高的发射电流效率, 基于变带隙发射阵列中电子输运的二维连续性方程, 利用有限体积法进行数值求解和仿真, 得到发射电流和发射电流效率. 通过仿真得到既适合光注入又合适电注入的各层最佳参数范围. 结果表明, 选择占空比为 2/3 的阵列微纳米柱, 获得光注入阴极的最佳入射光角度范围为 $10^\circ\text{--}30^\circ$; 光注入 (电注入) 情况下 P 型变带隙 AlGaAs 层阵列微纳米柱高度范围为 $0.3\text{--}0.6\text{ }\mu\text{m}$ ($0.1\text{--}0.3\text{ }\mu\text{m}$), N 型变带隙 AlGaAs 层、N 型 AlGaAs 层以及 P 型 AlGaAs 层最佳厚度范围分别为 $0.5\text{--}2.5\text{ }\mu\text{m}$ ($2\text{--}3\text{ }\mu\text{m}$), $0.5\text{--}1.0\text{ }\mu\text{m}$ ($0.8\text{--}1.2\text{ }\mu\text{m}$) 和 $0.2\text{--}0.5\text{ }\mu\text{m}$ ($0.1\text{--}0.3\text{ }\mu\text{m}$); P 型 AlGaAs 层和 N 型 AlGaAs 层最佳掺杂浓度范围分别为 $5\times 10^{18}\text{--}1\times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ ($1\times 10^{18}\text{--}5\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$) 和 $1\times 10^{18}\text{--}5\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ ($5\times 10^{17}\text{--}1\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$). 光注入下发射电流效率最大为 35.04%, 单位长度最大发射电流为 $10.3\text{ nA}/\mu\text{m}$; 电注入下发射电流效率最大为 31.23%, 单位长度最大发射电流 $105.5\text{ }\mu\text{A}/\mu\text{m}$.

关键词: 光注入, 电注入, 阵列阴极, 发射电流效率

PACS: 79.60.-i, 79.75.+g, 73.50.Gr, 73.61.Ey

DOI: 10.7498/aps.71.20221330

1 引言

AlGaAs/GaAs 负电子亲和势 (NEA) 光电阴极因其高发射电流效率、小体积以及良好的长波响应等优点, 被用于新一代电子束曝光机、电子加速器和 X 射线类仪器等一些高端设备仪器中产生低能散、高自旋极化度以及高亮度的高质量电子束^[1-4]. 国内外学者在 GaAs 自旋极化电子发射^[5,6]、NEA 光电阴极的双偶极子表面模型和稳定性机理^[7-9]、表面电荷限制效应^[10]、GaAs 光电阴极制备工艺、稳定性和微光像增强器研制等方面开展了大量研

究工作^[11,12]. 且对于 GaAs 光电阴极及电子源材料的理论研究及结构优化设计, 使 GaAs 电子源的性能得以提高, 扩展了阴极电子源的应用. 本课题组前期研究表明, 线性变组分结构 AlGaAs/GaAs 阴极因其带隙变化形成的内建电场^[13]使得电子的角度分布更加集中并且响应速度更快, 从而提高了阴极发射电流效率及灵敏度^[14,15]; 而阵列阴极微纳米柱则因具有更好的光子捕获效应增大了入射光子的吸收^[16], 以及更短的光电子发射距离提高了光电子发射概率, 从而有效地提高了光电阴极的发射电流效率^[17,18]. 此外, 传统光电阴极电子源都采用驱动激光器照射阴极表面形成电子发射, 此类光阴

* 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)、江西省“双千计划”项目 (批准号: jxsq2019201053) 和江西省教育厅科技项目 (批准号: GJJ170451) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jjzou@ecut.edu.cn

极随使用时间性能逐渐衰减^[19]. 为了使阴极具有较高的平均功率电流, 本课题组提出了电注入阴极结构, 并对电注入阴极各层厚度、Al 组分、掺杂浓度、基极电极宽度和发射面宽度进行了分析^[20].

本文结合线性变组分 AlGaAs/GaAs 阵列光电阴极以及电注入阴极的特点, 提出一种新型可控变带隙 AlGaAs/GaAs NEA 阵列阴极, 既可以通过给 AlGaAs/GaAs NEA 阵列阴极施加正偏驱动电压来形成电子发射, 也可以使用激光驱动器照射阵列阴极形成电子发射, 通过调节入射光波长强度和电压的大小灵活的控制电子发射电流. 将光注入和电注入两种注入方式结合, 可根据特定条件需要选择不同注入方式扩展阴极的使用范围. 建立光和电注入可控变带隙 AlGaAs/GaAs NEA 阵列阴极理论模型, 并分析各层结构参数对阴极发射电流效率的影响, 获得最佳光和电注入可控变带隙 AlGaAs/GaAs NEA 阵列阴极结构. 由于在光注入和电注入两种不同的注入方式下到达阴极阵列发射面的电子电流数量级相差较大, 本文结构设计分别选择使用电注入或光注入方式形成电子发射.

2 理论模型

光和电注入阵列阴极结构如图 1 所示, 由 N 型 GaAs 衬底、AlGaAs/GaAs 外延层和电极组成. AlGaAs/GaAs 外延层依次包括 N-GaAs 过渡层, N 型变带隙 AlGaAs 层, N 型 AlGaAs 层, P 型 AlGaAs 层, P 型变带隙 AlGaAs 层和 P-GaAs 层. 阵列阴极电极包括集电极、基极电极和发射极电极.

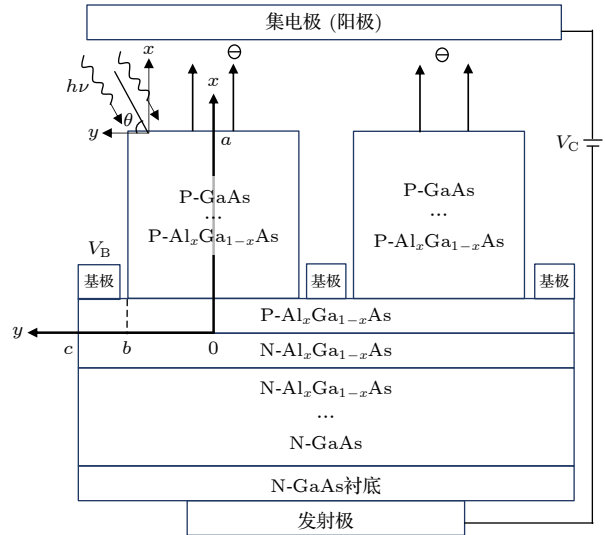


图 1 光和电注入阵列阴极结构

Fig. 1. Optical and electrical injection array cathode structure.

光和电注入阵列阴极光电发射过程和能带结构如图 2 所示, 其中 E_g 为禁带宽度, E_F 为费米能级, $h\nu$ 为光子能量. 光注入时, 入射光以一定角度照射到阵列阴极表面, 在 $h\nu > E_g$ 条件下, P 型 AlGaAs 层和 P 型变带隙 AlGaAs 层价带中的电子吸收光子的能量跃迁到导带, 在 P 型变带隙 AlGaAs 层中 Al 组分由 X_{Al} (P 型 AlGaAs 层上表面) 线性减小到 0 (P-GaAs 层下表面), 导带能带向下弯曲, 会形成有利于电子运输的内建电场^[21], 在内建电场的作用下, 跃迁到导带中的电子经过定向漂移向阴极表面输运. 由于阴极表面电子亲势为负到达表面的电子会隧穿表面势垒跃迁到真空或被集电极收集.

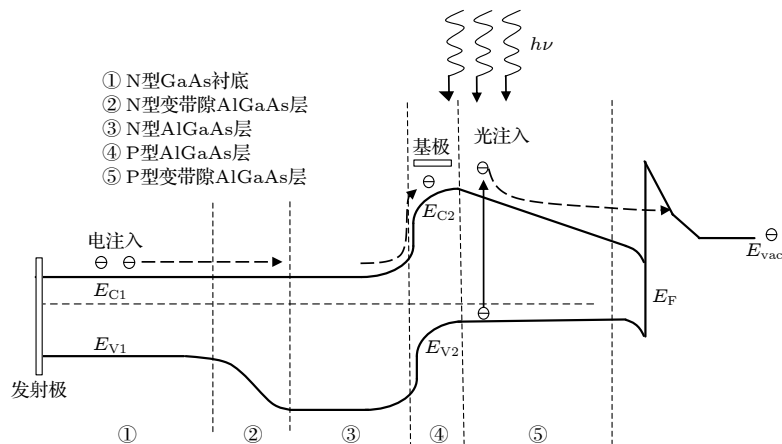


图 2 光和电注入 NEA 阵列阴极光电发射过程和能带结构图

Fig. 2. Photoelectric emission process and band structure diagram of the light and electrical injection NEA array cathode.

电注入时在基极和发射极之间施加正偏驱动电压 (V_B) 形成电子发射. 在 N 型变带隙 AlGaAs 层中, Al 组分由 0 (N-GaAs 过渡层上表面) 线性增加到 Y_{Al} (N 型 AlGaAs 层下表面), 此时 N 型变带隙 AlGaAs 层中的费米能级 E_F 靠近导带底, 由于在热平衡后具有恒定的费米能级, 导带保持恒定, 因此 N 型变带隙 AlGaAs 层的价带会逐渐向下弯曲, 禁带宽度随之变大. N 型 AlGaAs 层的 Al 组分 (Y_{Al}) 均匀分布, 价带能级保持恒定. 在 P 型 AlGaAs 层中费米能级靠近价带顶, N 型 AlGaAs 层和 P 型 AlGaAs 层之间的能带发生突变形成 PN 突变异质结, 因为结构中设置的 P 型 AlGaAs 层的 Al 组分 (X_{Al}) 小于 N 型 AlGaAs 层的 Al 组分 (Y_{Al}), 所以 PN 突变异质结中导带的内建电势小于价带的内建电势 ($\Psi_C < \Psi_V$). 在 P 型变带隙 AlGaAs 层中, 导带能带向下弯曲, 形成有利于电子输运内建电场. 基极电极和发射极电极之间施加正偏驱动电压使 PN 异质结导通, N 型变带隙 AlGaAs 层和 N 型 AlGaAs 层中的多数载流子注入到 P 型 AlGaAs 层和 P 型变带隙 AlGaAs 层.

阵列阴极的顶面作为发射面, 基极电极与 P 型 AlGaAs 层形成欧姆接触, 电注入发射的电子由发射极电极、N 型 AlGaAs 层和 N 型变带隙 AlGaAs 层提供, AlGaAs/GaAs 阵列阴极泊松方程和连续性方程过于复杂没有解析解, 本文使用有限体积法数值求解, 分为光注入和电注入两种情况.

光注入时建立 AlGaAs/GaAs 阵列阴极发射模型, 求解二维阵列泊松方程和连续性方程:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \varepsilon \nabla \psi = -q(p - n + N_d - N_a), \\ \nabla \cdot \mu_n \frac{k_B T}{q} \nabla n - U + G = 0, \\ \nabla \cdot \mu_p \frac{k_B T}{q} \nabla p - U + G = 0, \end{cases} \quad (1)$$

其中 ε 表示介电常数; ψ 为静态电势; p 和 n 为空穴和电子浓度; q 为电子电荷, N_d 和 N_a 为施主和受主浓度; k_B 为玻尔兹曼常数; T 为绝对温度, μ_p 和 μ_n 为空穴和电子迁移率; U 表示载流子复合速率; G 为载流子产生速率.

在模型中, 经过漂移和扩散到达阵列阴极发射面的电子会隧穿表面势垒发射到真空或者与空穴复合, 单根阵列微纳米柱的边界条件表示为

$$\begin{cases} n(x, -b) = n(a, y) = n(x, b) = 0, \\ p(x, -b) = p(a, y) = n(x, b) = N_a, \\ y \in [-b, b], \\ x \in [0, a]. \end{cases} \quad (2)$$

阵列微纳米柱半径为 y (最小半径为 0, 最大半径为 b), 高度为 x (最小高度为 0, 最大高度为 a).

基极电极与阵列阴极之间为欧姆接触, 不会影响材料中平衡载流子浓度, 其边界条件为

$$n(a, y) = \frac{n_i^2}{N_a} \left(y \in \left[-b - \frac{c-b}{2}, -b \right] \cup \left[b, b + \frac{c-b}{2} \right] \right), \quad (3)$$

$$p(a, y) = N_a \left(y \in \left[-b - \frac{c-b}{2}, -b \right] \cup \left[b, b + \frac{c-b}{2} \right] \right), \quad (4)$$

式中, $n(x, y)$, $p(x, y)$, $E_n(x, y)$, $E_p(x, y)$, $D_n(x)$ 和 $D_p(x)$ 分别表示电子和空穴的浓度、导带和价带中电场、电子和空穴的扩散系数.

发射电流效率是光电阴极材料的重要的参数, 其大小与光电阴极材料和入射光波长有关,

$$QE = \frac{Ihc}{qP\lambda} \times 100\%, \quad (5)$$

其中 I , h , c , P 和 λ 分别表示光阴极发射电流、普朗克常量、光速、入射光功率和入射光波长. 入射光的光功率 P 与入射光角度有关, $P = P_0 \times \cos\theta$, θ 表示为入射光的入射角度, P_0 表示激光功率.

由于到达发射面的电子会以一定概率逸出阵列阴极发射面, 所以发射到真空中的电子电流会受到表面逸出概率的影响, 假定阵列阴极表面逸出概率为 P_c , 受到光子能量的影响, 定义电子从发射极输运到阵列阴极发射面的电子电流为 I_c , 从发射面发射出去的电子电流为 I_E , 有

$$I_E = P_c I_c. \quad (6)$$

定义 I_E 与入射光产生的源光电流 I_s 的比值表示为单根 AlGaAs/GaAs 阵列微纳米柱的光注入发射电流效率 α :

$$\alpha = \frac{I_E}{I_s}. \quad (7)$$

电注入时半导体漂移和扩散模型可以由二维连续性方程表示:

$$D_n(x) \left[\frac{\partial^2 n(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n(x, y)}{\partial y^2} \right] + \mu_n(x) E_n(x, y) \left[\frac{\partial n(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial n(x, y)}{\partial y} \right] - U(x, y) = 0, \\ \left(x \in [0, a], y \in \left[-b - \frac{c-b}{2}, b + \frac{c-b}{2} \right] \right), \quad (8)$$

$$D_p(x) \left[\frac{\partial^2 p(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p(x, y)}{\partial y^2} \right] + \mu_p(x) E_p(x, y) \left[\frac{\partial p(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial p(x, y)}{\partial y} \right] - U(x, y) = 0, \\ \left(x \in [0, a], y \in \left[-b - \frac{c-b}{2}, b + \frac{c-b}{2} \right] \right). \quad (9)$$

$E_n(x, y)$, $E_p(x, y)$, $D_n(x)$, $D_p(x)$, $n(x, y)$, $p(x, y)$, $\mu_n(x)$, $\mu_p(x)$ 和 $U(x, y)$ 分别表示导带和价带中电场、电子和空穴扩散系数、电子和空穴浓度、电子和空穴迁移率、载流子复合速率。

求解二维连续性方程获得载流子分布, 沿空间电荷区的边界载流子浓度边界条件为

$$n(0, y) = \frac{n_i^2}{N_a} e^{v(y)/v_T}, \left(y \in \left[-b - \frac{c-b}{2}, b + \frac{c-b}{2} \right] \right), \quad (10)$$

$$p(0, y) = N_a, \left(y \in \left[-b - \frac{c-b}{2}, b + \frac{c-b}{2} \right] \right). \quad (11)$$

$n(x, y)$, $p(x, y)$, n_i , N_a , $v(y)$ 和 v_T 分别表示为电子和空穴浓度、本征载流子浓度、P 型层受主掺杂浓度、施加在空间电荷区上的电压和热电势。注入方式的改变不会影响边界条件, 所以光注入和电注入时在基极电极与阵列阴极之间以及在阵列阴极发射面上都具有相同的边界条件。

光注入和电注入时电子逸出概率均为 P_c , 与光注入不同的是, 定义从发射面发射出去的电子电流 I_E 与流过发射极电流 I_e 比值表示单根 AlGaAs/GaAs 阵列纳米柱的电注入发射电流效率 η :

$$\eta = I_E/I_e. \quad (12)$$

3 仿真分析

利用仿真结果理论分析器件结构、注入方式、入射光波长、入射光角度和驱动电压对阴极发射性能的影响, 为变带隙 NEA 阵列阴极结构和材料参数的优化设计提供理论依据。阵列阴极各层结构参数: P 型变带隙 AlGaAs 层掺杂浓度 (N_a) 和厚度 (T_{cp})、P 型 AlGaAs 层掺杂浓度 (N_a) 和厚度 (T_p)、N 型变带隙 AlGaAs 层掺杂浓度 (N_d) 和厚度 (T_{cn}) 以及 N 型 AlGaAs 层掺杂浓度 (N_d) 和厚度

(T_n)。如图 1 所示, 设定相邻两根微纳米柱组成一个运算单元, 一个单元的总宽度为 6 μm , 其中阵列微纳米柱占空比为 2/3, 基极电极宽度为 0.4 μm , 发射极电极宽度为 6 μm , X_{Al} 和 Y_{Al} 分别固定为 0.25 和 0.45, P_c 设定为 0.5。

3.1 入射光波长和入射光角度

仿真中, 平行光照射至阵列阴极表面, 定义入射光从阵列阴极顶部垂直照射到微纳米柱的角度为 90° 。入射光波长及入射光角度对阵列阴极发射电流效率的影响如图 3 所示。图 3(a) 为发射电流效率随入射光波长变化曲线, 随着波长增加, 其在材料中吸收系数减小, 因而发射电流效率降低; 图 3(b) 为发射电流效率随入射光角度变化曲线, 随着入射角度的增加发射电流效率先增加后减小, 当角度为 15° 时, 发射电流效率达到最大。阵列阴极占空比一定, 不同的入射角度对应不同的光通量, 入射光的入射角度越小, 光通量越小, 被阵列微纳米柱吸收的光子能量越少。但是随着角度的继续增加, 被 P 型 AlGaAs 层吸收的光子数增加, 而 P 型 AlGaAs 层光电子运输到阵列表面时复合率增加, 因而此时阵列阴极的发射电流效率减小。

3.2 电注入正偏驱动电压变化

正偏驱动电压对阵列阴极发射电流及发射电流效率的影响如图 4 所示。当 $V_B < 1.6 \text{ V}$ 时, PN 突变异质结未导通, 此时阵列阴极发射面的发射电流几乎为零, 电压的压降都分布在突变 PN 异质结上。1.6 V $< V_B < 2.1 \text{ V}$, 突变 PN 异质结导通, 此时导带的势垒高度为 0, 导带中的电子不需要克服势垒就能注入到 P 型 AlGaAs 层中, 发射电流迅速增大。此时, P 型 AlGaAs 层和 P 型变带隙 AlGaAs 层中的电子通过扩散和漂移运动到达 P 型变带隙

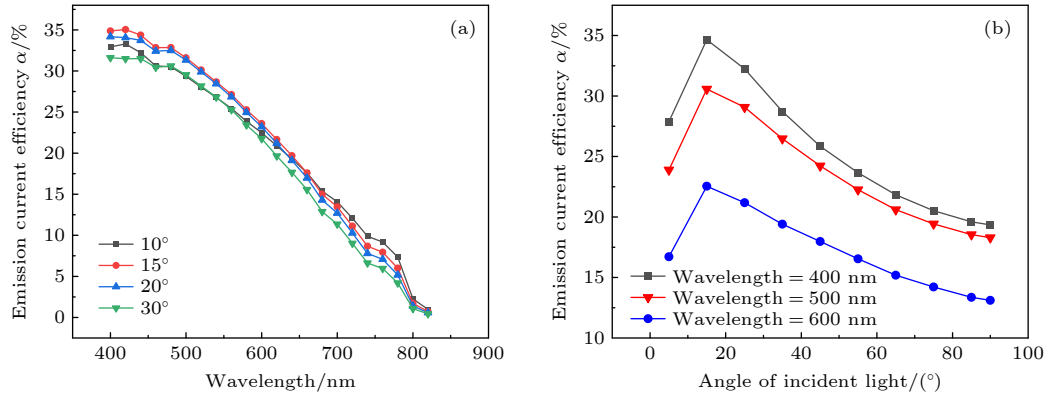


图 3 (a) 发射电流效率 α 随入射光波长变化曲线; (b) 发射电流效率 α 随入射光角度变化曲线, 其中阵列阴极 N_a , N_d , T_{cp} , T_p , T_n 和 T_{cn} 分别为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $0.2 \text{ } \mu\text{m}$, $0.1 \text{ } \mu\text{m}$, $0.3 \text{ } \mu\text{m}$ 和 $1.0 \text{ } \mu\text{m}$

Fig. 3. (a) Emission current efficiency α versus incident wavelength; (b) emission current efficiency α versus incident light angle, where N_a , N_d , T_{cp} , T_p , T_n and T_{cn} of the array cathode are $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $0.2 \text{ } \mu\text{m}$, $0.1 \text{ } \mu\text{m}$, $0.3 \text{ } \mu\text{m}$ and $1.0 \text{ } \mu\text{m}$, respectively.

AlGaAs 层表面或被基极电极收集, 因此发射电流效率随电压的增大迅速增大. 电压为 2.1 V 时发射电流效率最大为 31.23%. 当电压继续增大时, 因为有部分微小的压降分布在 P 型 AlGaAs 层和 P 型变带隙 AlGaAs 层中形成以基极电极为中心的分散型电场增强, 导致一些原本向发射面移动的电子向基极电极处漂移, 从而使发射电流效率减小.

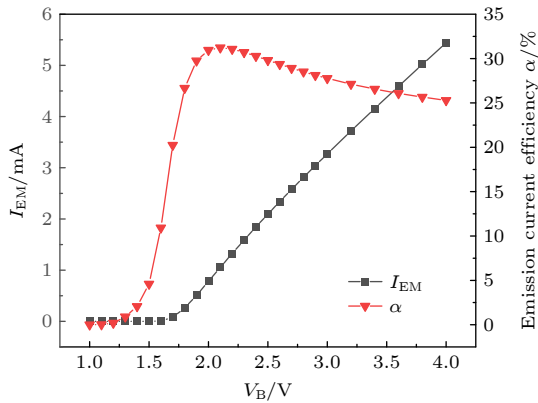


图 4 电注入阵列阴极发射电流和发射电流效率随电压变化曲线. 其中阵列阴极 N_a , N_d , T_{cp} , T_p , T_n 和 T_{cn} 分别为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $0.1 \text{ } \mu\text{m}$, $0.1 \text{ } \mu\text{m}$, $0.3 \text{ } \mu\text{m}$ 和 $1.0 \text{ } \mu\text{m}$

Fig. 4. The cathodic emission current and emission current efficiency of the electrically implanted array vary with voltage. The array cathode N_a , N_d , T_{cp} , T_p , T_n and T_{cn} are $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $0.1 \text{ } \mu\text{m}$, $0.1 \text{ } \mu\text{m}$, $0.3 \text{ } \mu\text{m}$, $1.0 \text{ } \mu\text{m}$, respectively.

3.3 P 型层厚度

P 型变带隙 AlGaAs 层和 P 型 AlGaAs 层厚度对阵列阴极发射电流效率的影响如图 5 所示. 光

注入时, 如图 5(a) 所示, 阵列阴极发射电流效率随着 P 型变带隙 AlGaAs 层 (阵列微纳米柱) 高度增加先增加后减小, 当占空比和入射光角度保持不变, 随着阵列微纳米柱高度的增加, 发射电流效率增加是因为 P 型变带隙 AlGaAs 层对光子的吸收增加, 阵列捕获更多的光子. 然而, 随着微纳米柱高度继续增加, 相邻阵列之间出现阻挡现象, 使得到达 P 型 AlGaAs 层的光子减少, 材料对光子的吸收仅存在于阵列阴极顶端, 并且微纳米柱高度增加会使材料内部产生的内建电场减小不利于电子的输运, 光电子输运距离增加也增大了电子与空穴的复合概率, 更少的光电子到达阴极发射面降低发射电流效率. 根据图 5(a) 获得 P 型变带隙 AlGaAs 层较好厚度 $0.2 \text{ } \mu\text{m}$, 图 5(b) 在此基础上, 改变了 P 型 AlGaAs 层厚度, 结果表明, 随 P 型 AlGaAs 层厚度增加发射电流效率先增加后减小. 这是因为部分未被 P 型变带隙 AlGaAs 层吸收的光子会在这一层中被吸收, 随着厚度继续增加材料对光子的吸收不再增加, 与此相反增加了电子的输运距离, 从而降低发射电流效率. 因为 AlGaAs 材料高 Al 组分在短波区域中有更高的吸收系数, P 型 AlGaAs 层和 P 型变带隙 AlGaAs 层厚度的变化会对短波响应的更大影响.

电注入时, 如图 5(c) 和图 5(d) 所示, 阵列阴极发射电流效率会随 P 型变带隙 AlGaAs 层和 P 型 AlGaAs 层厚度增加而减小. 电子由发射极电极、N 型变带隙 AlGaAs 层以及 N 型 AlGaAs 层提供, 在正偏驱动电压的作用下注入到 P 型 AlGaAs 层

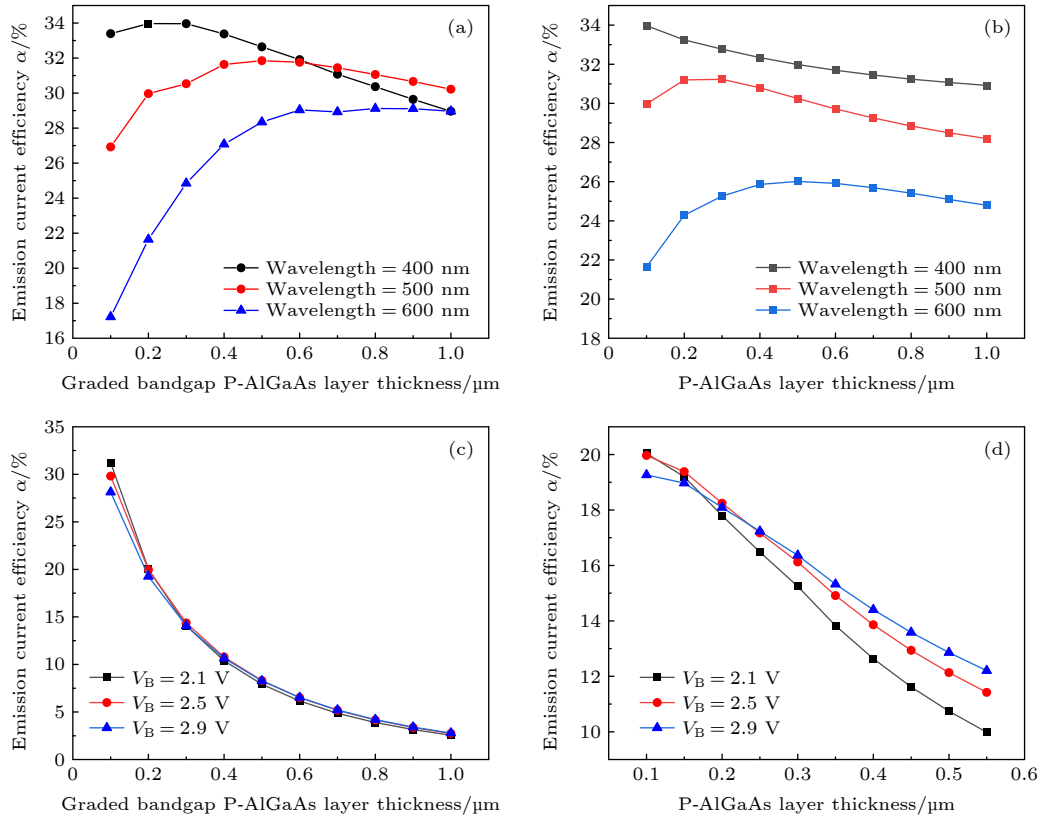


图 5 (a) 光注入时 P 型变带隙 AlGaAs 层厚度变化 (a) 和 P 型 AlGaAs 层厚度变化 (b) 对阵列阴极发射电流效率 α 的影响; 电注入时 P 型变带隙 AlGaAs 层厚度变化 (c) 和 P 型 AlGaAs 层厚度变化 (d) 对阵列阴极发射电流效率的影响. 其中光注入入射光角度为 20° . (a) 和 (c) 中 $T_p = 0.1 \mu\text{m}$, (b) 和 (d) 中 $T_{cp} = 0.2 \mu\text{m}$, (a), (b), (c), (d) 中阵列阴极 N_a , N_d , T_n 和 T_{cn} 分别为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $0.3 \mu\text{m}$ 和 $1.0 \mu\text{m}$

Fig. 5. (a) The effect of the thickness change of P-band gap AlGaAs layer on the emission current efficiency of array cathode during optical injection; (b) the effect of thickness variation of P-type AlGaAs layer on emission current efficiency of array cathode during optical injection; (c) the effect of p-gap AlGaAs layer thickness variation on emission current efficiency of array cathode during electric injection; (d) the effect of thickness variation of P-type AlGaAs layer on emission current efficiency of array cathode during electric injection. The light injection angle is 20° . T_p is $0.1 \mu\text{m}$ in Figure (a) and Figure (c), T_{cp} is $0.2 \mu\text{m}$ in Figure (b) and Figure (d), and array cathode N_a , N_d , T_n and T_{cn} are $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $0.3 \mu\text{m}$ and $1.0 \mu\text{m}$ in Figure (a), (b), (c) and (d), respectively.

并扩散至 P 型变带隙 AlGaAs 层, 在 P 型变带隙 AlGaAs 层内建电场作用下到达发射面. P 型 AlGaAs 层和 P 型变带隙 AlGaAs 层厚度的增加导致运输距离增加, P 型变带隙 AlGaAs 层厚度的增加导致内建电场减小, 不利于电子的输运.

3.4 N 型层厚度

光注入和电注入时 N 型 AlGaAs 层和 N 型变带隙 AlGaAs 层厚度对阵列阴极发射电流效率的影响如图 6 所示. 仿真结果可知 N 型变带隙 AlGaAs 层和 N-AlGaAs 层厚度的变化对光注入 (图 6(a), (b)) 无影响, 电注入 N-AlGaAs 层和 N 型变带隙 AlGaAs 层 (图 6(c), (d)) 厚度增加阵列阴极发射电流效率先增加后趋于稳定. 在 N 型 AlGaAs 层

和 P 型 AlGaAs 层之间形成 PN 突变异质结, 因为 N 型 AlGaAs 层中的 Al 组分高于 P 型 AlGaAs 层中的 Al 组分, 所以异质结中导带的内建电势 Ψ_C 小于价带的内建电势 Ψ_V . 光注入时 $V_B = 0$, 此时导带中的电子不能克服导带中的势垒高度 ($q(\Psi_C - V_B) > 0$) 注入到 P 型 AlGaAs 层, 所以 N 型变带隙 AlGaAs 层和 N-AlGaAs 层厚度的变化不会影响阵列阴极的发射电流效率; 电注入时, 导带中的电子克服势垒高度注入到 P 型 AlGaAs 层, N 型变带隙 AlGaAs 层和 N-AlGaAs 层厚度的增加会使其内部电子数量增加, 注入到 P 型 AlGaAs 层电子数量增加, 发射电流效率随之提高, 但是当厚度继续增加, 注入到 P 型 AlGaAs 层中的电子达到饱和状态, 发射电流效率趋于稳定.

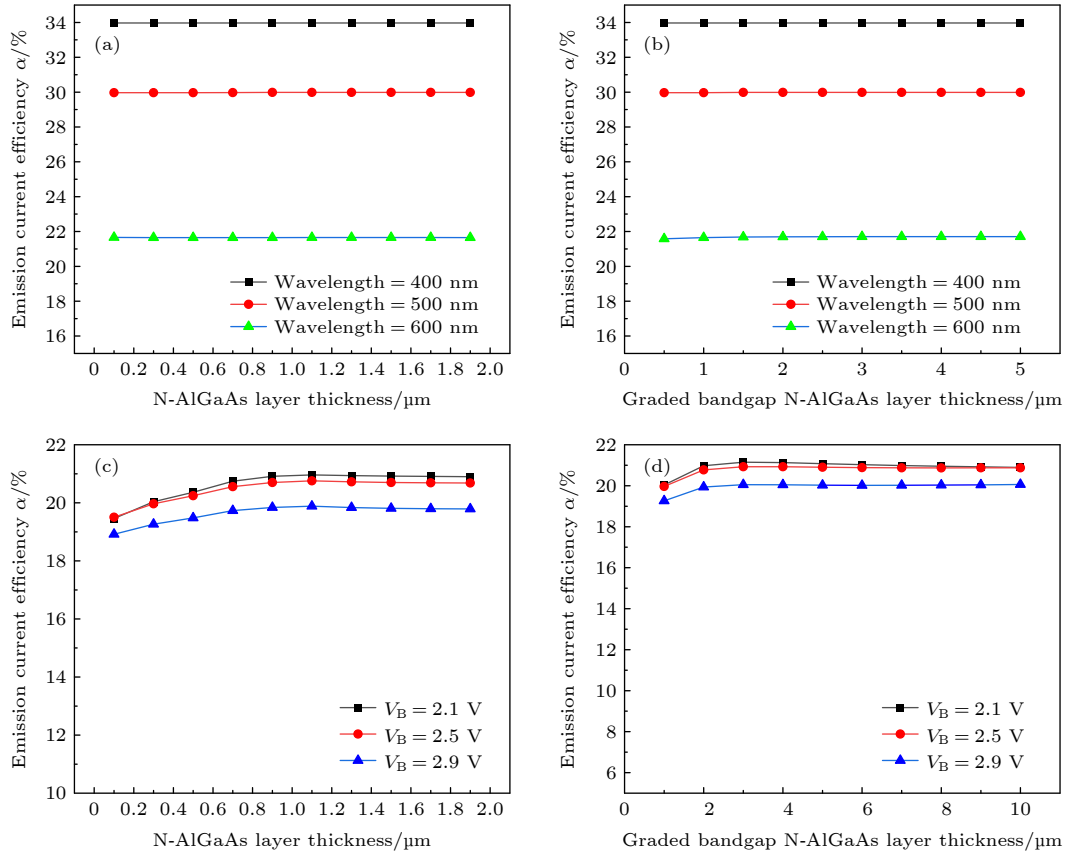


图 6 光注入时 N 型 AlGaAs 层厚度的变化对阵列阴极发射电流效率 (a) 和阵列阴极发射电流效率 (b) 的影响; 电注入时 N 型 AlGaAs 层厚度的变化对阵列阴极发射电流效率 (c) 和阵列阴极发射电流效率 (d) 的影响. 其中光注入入射光角度为 20° , (a) 和 (c) 中 $T_{\text{cn}} = 1 \mu\text{m}$, (b) 和 (d) 中 $T_{\text{cp}} = 0.3 \mu\text{m}$, (a), (b), (c) 和 (d) 中阵列阴极 N_{a} , N_{d} , T_{cp} 和 T_{p} 分别为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $0.2 \mu\text{m}$ 和 $0.1 \mu\text{m}$

Fig. 6. (a) The effect of thickness variation of N-type AlGaAs layer on emission current efficiency of array cathode during optical injection; (b) effect of the thickness of N-type variable band gap AlGaAs layer on the emission current efficiency of array cathode during optical injection; (c) the effect of thickness variation of N-type AlGaAs layer on emission current efficiency of array cathode during electric injection; (d) the effect of the thickness of N-type variable band gap AlGaAs layer on the emission current efficiency of array cathode during electric injection. The light injection angle is 20° , T_{cn} is $1 \mu\text{m}$ in Figure (a) and Figure (c), T_{cp} is $0.3 \mu\text{m}$ in Figure (b) and Figure (d), and array cathode N_{a} , N_{d} , T_{cp} and T_{p} are $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $0.2 \mu\text{m}$ and $0.1 \mu\text{m}$ in Figure (a), (b), (c) and (d), respectively.

3.5 P 型层掺杂浓度

P 型层掺杂浓度对阵列阴极发射电流效率的影响如图 7 所示. 光注入时, 如图 7(a) 所示, 掺杂浓度增大阵列阴极发射电流效率先增大后保持稳定, 当照射在阵列阴极上的入射光强度和光通量等保持恒定的情况下, 掺杂浓度直接影响材料的载流子浓度, 随着 P 型 AlGaAs 层和 P 型变带隙 AlGaAs 层中掺杂浓度的增加, 更多价带中的电子吸收光子的能量进入导带. 由于电子扩散运动的强弱与材料的扩散系数成正比, 掺杂浓度增加, P 型变带隙 AlGaAs 层和 P 型 AlGaAs 层的扩散系数减小, 到达发射面的电子数量随之减少, 虽然高的掺杂浓度会使得更多的电子跃迁, 但电子的扩散系数也受到

了高掺杂浓度的制约, 因此随着掺杂浓度继续增加, 阵列阴极发射电流效率受两种因素共同影响而保持稳定. 电注入时, 如图 7(b) 所示, 随着掺杂浓度增加, 阵列阴极发射电流效率减小. 电子在 P 型 AlGaAs 层和 P 型变带隙 AlGaAs 层中进行漂移和扩散运动, 掺杂浓度增加导致这两层的扩散系数减小, 到达发射面的电子数量会随之减少进而使得发射电流效率减小. 增大正偏驱动电压, 电子注入量随之增大, 但是在 P 型 AlGaAs 层和 P 型变带隙 AlGaAs 层中形成以基极电极为中心的发射型电场增强, 更多电子被基极电极收集, 从而使得施加高的正偏驱动电压得到的发射电流效率随掺杂浓度的增加而减小得更加缓慢.

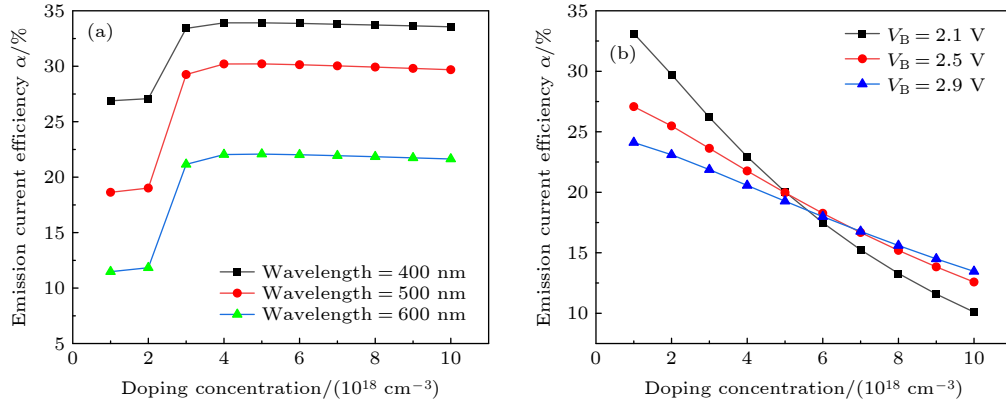


图 7 (a) 光注入时 P 型 AlGaAs 层和 P 型变带隙 AlGaAs 层掺杂浓度 N_a 变化对阵列阴极发射电流效率的影响; (b) 电注入时 P 型 AlGaAs 层和 P 型变带隙 AlGaAs 层掺杂浓度 N_a 的变化对阵列阴极发射电流效率的影响. 其中光注入入射光角度为 20° , 阵列阴极 N_d , T_{cp} , T_p , T_n 和 T_{cn} 分别为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $0.2 \mu\text{m}$, $0.1 \mu\text{m}$, $0.3 \mu\text{m}$ 和 $1.0 \mu\text{m}$

Fig. 7. (a) The effect of doping concentration N_a of P-type AlGaAs layer and P-type bandgap AlGaAs layer on emission current efficiency of array cathode during optical injection; (b) the effect of doping concentration N_a of P-type AlGaAs layer and P-type bandgap AlGaAs layer on emission current efficiency of array cathode during electric injection. Incidence angle of optical injection is 20° , and the array cathode N_d , T_{cp} , T_p , T_n and T_{cn} are $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $0.2 \mu\text{m}$, $0.1 \mu\text{m}$, $0.3 \mu\text{m}$ and $1.0 \mu\text{m}$, respectively.

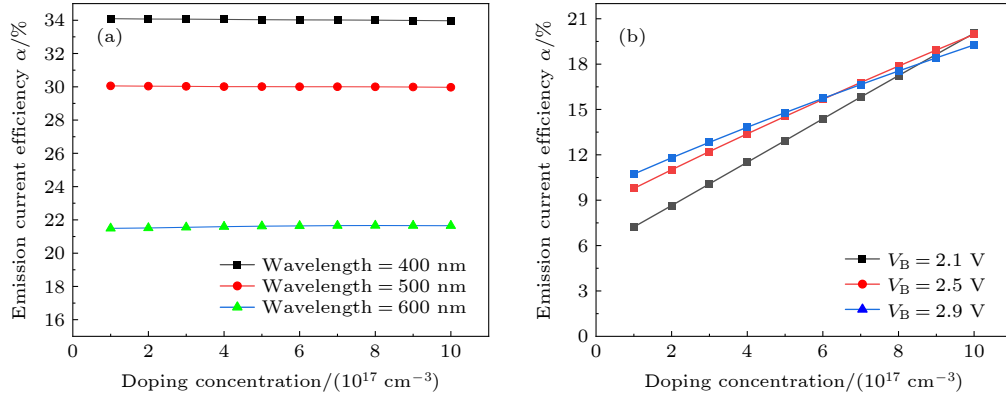


图 8 (a) 光注入时 N 型变带隙 AlGaAs 层和 N-AlGaAs 层掺杂浓度 N_d 变化对阵列阴极发射电流效率的影响; (b) 电注入时 N 型变带隙 AlGaAs 层和 N-AlGaAs 层掺杂浓度 N_d 的变化对阵列阴极发射电流效率的影响. 光注入入射光角度为 20° , 阵列阴极 N_a , T_{cp} , T_p , T_n 和 T_{cn} 分别为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $0.2 \mu\text{m}$, $0.1 \mu\text{m}$, $0.3 \mu\text{m}$ 和 $1.0 \mu\text{m}$

Fig. 8. (a) Effect of doping concentration N_d variation of N-type bandgap AlGaAs layer and N-AlGaAs layer on emission current efficiency of array cathode during optical injection; (b) the effect of doping concentration N_d of N-type variable band gap AlGaAs layer and N-AlGaAs layer on emission current efficiency of array cathode during electric injection. Incidence angle of optical injection is 20° , and the array cathode N_a , T_{cp} , T_p , T_n and T_{cn} are $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $0.2 \mu\text{m}$, $0.1 \mu\text{m}$, $0.3 \mu\text{m}$ and $1.0 \mu\text{m}$, respectively.

3.6 N 型层掺杂浓度

N 型变带隙 AlGaAs 层和 N-AlGaAs 层掺杂浓度 (N_d) 对阵列阴极发射电流效率的影响如图 8 所示. 光注入时, 如图 8(a) 所示, 这两层掺杂浓度的变化对发射电流效率无影响, 由 3.4 节可得出, 在未给基极电极和发射极电极之间施加正偏驱动电压的情况下, PN 突变异质结未导通, 所以这两层中掺杂浓度的改变不会使电子进入 P 型 AlGaAs 层, N 型 AlGaAs 层和 N 型变带隙 AlGaAs 层掺杂浓度不会影响光注入发射电流效率; 电注入时, 如图 8(b) 所示, 这两层掺杂浓度增加会使得阴极

材料的发射电流效率增加, 这是因为随着掺杂浓度的增加, 这两层中的电子浓度增加, 进而使得注入到 P 型 AlGaAs 层中的电子数量增加, 从而提高发射电流效率.

4 结 论

光注入和电注入 NEA 阵列阴极发射理论基于阴极工作机制、变带隙发射阵列光子吸收、能带结构和电子输运特性研究的基础上, 建立电子在变带隙发射阵列中输运的二维连续性方程, 再利用有限体积法对电子发射性能进行数值求解和仿真; 利用

仿真结果理论分析器件结构、注入方式、入射光波长、入射光角度、发射阵列尺寸和驱动电压等对阵列阴极发射性能的影响, 为变带隙 NEA 阵列阴极结构与材料参数的优化设计提供理论依据. 本文通过使用控制变量法研究各参数对阵列阴极量子效率的影响, 但是参数变化可能会造成多个因素之间相互影响, 所以在实际应用中需要综合考虑. 保持阵列阴极占空比为 2/3, 基于仿真结果得出在光注入最佳入射角度的基础上, 获得光注入和电注入两种不同注入方式下各层厚度和掺杂浓度最佳范围. 电注入阴极不需要昂贵和复杂的驱动激光系统, 可有效地避免由于高功率激光照射阴极损坏表面活化层, 也不存在强激光照射表面光散射产生的离子反轰. 光注入控制方式简单, 结合光注入、电注入, 实现可根据需要选择光注入或者电注入, 这种融合了多种先进技术优势的阵列阴极研究, 对于丰富阵列阴极发射理论, 拓展其应用领域具有重要意义.

参考文献

- [1] Tsentalovich E, Barkhuff D, Chen J, Dodson G, Farkhondeh M, Franklin W, Ihloff E, Kaertner F, Tschalaer C, Yang B, Zwart T 2007 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **582** 413
- [2] Benson S V, Douglas D, Neil G R, Shinn M D 2011 *J. Phys. Conf. Ser.* **299** 012014
- [3] Liu W, Chen Y Q, Lu W T, Moy A, Poelker M, Stutzman M, Zhang S K 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 252104
- [4] Yamamoto N, Yamamoto M, Kuwahara M, Sakai R, Morino T, Tamagaki K, Mano A, Utsu A, Okumi S, Nakanishi T, Kuriki M, Bo C, Ujihara T, Takeda Y 2007 *J. Appl. Phys.* **102** 024904
- [5] Pierce D T, Meier F 1976 *Phys. Rev. B* **13** 5484
- [6] Teng L H, Mu L J 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 046802 (in Chinese) [滕利华, 牟丽君 2017 物理学报 **66** 046802]
- [7] Su C Y, Spicer W E, Lindau I 1983 *J. Appl. Phys.* **54** 1413
- [8] Cultrera L, Galdi A, Bae J K, Ikponmwen F, Maxson J, Bazarov I 2020 *Phys. Rev. Accel. Beams* **23** 023401
- [9] Machuca F, Liu Z, Sun Y, Pianetta P, Spicer W E, Pease R F W 2003 *J. Vac. Sci. Technol. B* **21** 1863
- [10] Maruyama T, Brachmann A, Clendenin J E, Desikan T, Garwin E L, Kirby R E, Luh D A, Turner J, Prepost R 2002 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **492** 199
- [11] Li X F 2001 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xi'an Institute of Optical and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [李晓峰 2001 博士学位论文 (西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所)]
- [12] Zhang Q, Bai X F, Cheng H C, Jiao G C, Li Z K, Han K, Li Q 2022 *Acta Photonica Sin.* **51** 0304005
- [13] Liu L, Lu F F, Tian J, Zhangyang X Y, Lv Z S 2020 *J. Mater. Sci. Technol.* **58** 86
- [14] Deng W J, Peng X C, Zou J J, Jiang S T, Guo D, Zhang Y J, Chang B K 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 167902 (in Chinese) [邓文娟, 彭新村, 邹继军, 江少涛, 郭栋, 张益军, 常本康 2014 物理学报 **63** 167902]
- [15] Zou J J, Gao P, Yang Z, Chang B K 2008 *Acta Photonica Sin.* **37** 1112 (in Chinese) [邹继军, 高鹏, 杨智, 常本康 2008 光子学报 **37** 1112]
- [16] Xia S, Liu L, Kong Y K 2016 *Opt. Quantum Electron.* **48** 306
- [17] Zhang T 2018 *Electron. World* **15** 65 (in Chinese) [张涛 2018 电子世界 **15** 65]
- [18] Zeng M S, Peng X C 2018 *Opt. Instrum.* **40** 67 (in Chinese) [曾梦丝, 彭新村 2018 光学仪器 **40** 67]
- [19] Zou J J, Zhang Y J, Yang Z, Chang B K 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 017902 (in Chinese) [邹继军, 张益军, 杨智, 常本康 2011 物理学报 **60** 017902]
- [20] Xia J Y, Zou J J, Peng X C, Deng W J, Zhang Y J 2020 *Ultramicroscopy* **219** 113121
- [21] Ding X J, Ge X W, Zou J J, Zhang Y J, Peng X C, Deng W J, Chen Z P, Zhao W J, Chang B K 2016 *Opt. Commun.* **367** 149

Theoretical modeling and analyzing structural characteristics of AlGaAs/GaAs negative electron affinity array cathode with optically and electrically injected variable bandgap^{*}

Deng Wen-Juan¹⁾²⁾ Zhou Tian²⁾ Wang Zhuang-Fei²⁾ Wu Yue-Chuan²⁾
 Peng Xin-Cun¹⁾²⁾ Zou Ji-Jun^{1)†}

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

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

(Received 5 July 2022; revised manuscript received 15 August 2022)

Abstract

In order to obtain high emission current efficiency of the AlGaAs/GaAs NEA array cathode, this array cathode has two ways to form electron emission, i.e. optical injection and electrical injection. The two-dimensional continuity equation of electronic transport in the variable bandgap emission array is solved numerically by using the finite volume method thereby obtaining the emission current and emission current efficiency. Simulation obtains the optimal parameter range for each layer of the AlGaAs/GaAs NEA array cathode under both optical injection and electrical injection. The results show that the optimal angle of incident light for the array cathode under light injection is 10° – 30° for selecting an array micro-nano column with a duty cycle of 2/3. Under the condition of light injection, the P-type variable bandgap AlGaAs layer array micro-nano column height ranges from 0.3–0.6 μm . Under the condition of electrical injection, the height of the micro-nano column of the P-type variable bandgap AlGaAs layer array is 0.1–0.3 μm . The optimal thickness range of N-type variable bandgap AlGaAs layer, N-type AlGaAs layer, and P-type AlGaAs layer under light injection are 0.5–2.5 μm , 0.5–1.0 μm and 0.2–0.5 μm , respectively. The optimal thickness range of N-type variable bandgap AlGaAs layer, N-type AlGaAs layer, and P-type AlGaAs layer under electrical injection conditions are 2–3 μm , 0.8–1.2 μm and 0.1–0.3 μm , respectively. The optimal doping concentration of P-type AlGaAs layer and N-type AlGaAs layer under light injection are range from 5×10^{18} to $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ and from 1×10^{18} to $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, respectively. The optimal doping concentration of the P-type AlGaAs layer and the N-type AlGaAs layer under electrical injection range from 1×10^{18} to $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and from 5×10^{17} to $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, respectively. The maximum efficiency of the emission current under the light injection is 35.04%, and the maximum emission current per unit length is 10.3 nA/ μm . The maximum efficiency of the emission current under electrical injection is 31.23%, and the maximum emission current per unit length is 105.5 $\mu\text{A}/\mu\text{m}$. Electric injection cathode does not need expensive and complex drive laser system, and the light injection control mode is simple, so light injection or electrical injection control mode can be chosen as needed. The research of array cathode, which integrates the advantages of many advanced technologies, is of great significance for enriching the cathode array cathode emission theory and expanding its application field.

Keywords: light injection, electric injection, arrays cathode, emission current efficiency

PACS: 79.60.-i, 79.75.+g, 73.50.Gr, 73.61.Ey

DOI: 10.7498/aps.71.20221330

^{*} 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), the Jiangxi Double Thousand Plan, China (Grant No. jxsq2019201053), and the Science and Technology Project of Department of Education of Jiangxi Province, China (Grant No. GJJ170451).

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

光和电注入变带隙AlGaAs/GaAs 负电子亲和势阵列阴极理论建模和结构特性分析

邓文娟 周甜 王壮飞 吴粤川 彭新村 邹继军

Theoretical modeling and analyzing structural characteristics of AlGaAs/GaAs negative electron affinity array cathode with optically and electrically injected variable bandgap

Deng Wen-Juan Zhou Tian Wang Zhuang-Fei Wu Yue-Chuan Peng Xin-Cun Zou Ji-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 237901 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20221330

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221330>

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

Parity-time对称性对电注入半导体激光器的模式控制

Mode control of electrically injected semiconductor laser with parity-time symmetry

物理学报. 2020, 69(2): 024202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191351>

基于双路光电反馈下光注入半导体激光器的高性能线性调频信号产生

High-performance linear frequency-modulated signal generation based on optically injected semiconductor laser with dual-loop optoelectronic feedback

物理学报. 2022, 71(21): 214204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221308>

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>

基于N型纳米晶硅氧电子注入层的钙钛矿发光二极管

Perovskite light-emitting diodes based on n-type nanocrystalline silicon oxide electron injection layer

物理学报. 2019, 68(12): 128103 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190258>

表面形貌对热阴极电子发射特性的影响

Effect of surface topography on emission properties of hot-cathode

物理学报. 2019, 68(3): 037901 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181725>

SESRI 300 MeV同步加速器注入线的传输效率与接受效率

Transmission efficiency and beam reception of the SESRI 300 MeV synchrotron injection line

物理学报. 2022, 71(11): 112901 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212112>