

532 nm 响应增强的 AlGaAs 光电阴极*

王东智¹⁾ 张益军^{1)†} 李诗曼¹⁾ 童泽昊¹⁾ 唐嵩¹⁾ 石峰²⁾焦岗成²⁾ 程宏昌²⁾ 富容国¹⁾ 钱芸生¹⁾ 曾玉刚³⁾

1) (南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

2) (微光夜视技术重点实验室, 西安 710065)

3) (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2024 年 2 月 8 日收到; 2024 年 3 月 29 日收到修改稿)

AlGaAs 光电阴极具有响应速度快和光谱响应范围可调的特性, 可被应用于水下光通信领域. 为了解决 AlGaAs 发射层较低的光吸收限制其量子效率提高的问题, 利用分布式布拉格反射镜 (DBR) 结构对特定波长光的反射作用, 将透过光重新反射回发射层进一步提高吸收率, 从而增强阴极在 532 nm 波长处的响应能力. 通过求解一维连续性方程, 建立了具有 DBR 结构的 AlGaAs 光电阴极光谱响应模型. 采用时域有限差分法, 分析了 DBR 结构中子层周期对数、子层材料以及发射层、缓冲层厚度对发射层吸收率的影响, 对比了有无 DBR 结构 AlGaAs 光电阴极的光吸收分布. 结果表明, 周期对数为 20、子层材料为 $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{AlAs}$ 的 DBR 结构对 532 nm 光的反射效果最优. 基于该 DBR 结构, 发射层和缓冲层厚度分别为 495 nm 和 50 nm 时, 发射层对 532 nm 光具有最佳吸收率. 通过对外延生长的 AlGaAs 光电阴极进行激活实验, 结果表明具有 DBR 结构的 AlGaAs 光电阴极在 532 nm 波长处的光谱响应率相比无 DBR 结构的 AlGaAs 光电阴极光谱响应率提升了约 1 倍.

关键词: AlGaAs 光电阴极, 分布式布拉格反射镜, 光谱响应, 光吸收**PACS:** 85.60.Ha, 85.60.Bt, 71.55.Eq**DOI:** 10.7498/aps.73.20240253

1 引言

负电子亲和势 (negative electron affinity, NEA) GaAs 基光电阴极作为研究最早的典型 III-V 族光电阴极, 被广泛应用于光电探测器、光热能量转化、极化电子源、电子显微镜等领域^[1-5]. NEA AlGaAs 光电阴极是在 GaAs 光电阴极的基础上发展而来, 相较于 GaAs 光电阴极, 其具有响应速度更快、光谱响应范围可调、寿命更长等优点, 可应用于电子加速器和水下光通信^[6-8]. 在水下光通信应用中, 由于散射效应以及海水吸收对光信号的影响, 在水下蓝绿波段外的光信号严重衰减, 而波长在 450—

570 nm 之间的蓝绿光具有穿透能力强、方向性好、携带的传输信息量大等优点^[9-12]. Chen 等^[13-15]通过调整 AlGaAs 光电阴极 Al 组分、热净化温度以及 Cs/O 源电流比等因素, 制备了对蓝绿光敏感的 AlGaAs 光电阴极, 但是在提高光电阴极吸收率方面还有很大的进步空间. Li 等^[16]通过在 AlGaAs 光电阴极上设计微纳光学结构, 以提高发射层吸收率, 但是容易受到加工难度大、工艺成本高等现实因素的影响. 根据 Spicer 提出的光电发射“三步模型”^[17], 光电阴极的量子效率与光电阴极体内光吸收能力息息相关. 增大发射层厚度会使发射层吸收率增大, 但是由于光电子需要在距离表面至少一个扩散长度以内才能被有效运输, 无限增大发射层厚

* 国家自然科学基金 (批准号: 62271259, U2141239)、微光夜视技术重点实验室基金 (批准号: J20220102) 和江苏省研究生科研与实践创新计划 (批准号: KYCX23_0431) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangyijun423@njjust.edu.cn

度是不可行的, 并且 Al 组分 ≥ 0.45 的 AlGaAs 材料均为间接带隙材料, 光吸收能力较差, 需要提高光吸收率以激发出更多的光电子向表面输运, 因此如何改善 AlGaAs 发射层对蓝绿光, 尤其是常用的 532 nm 光的吸收率, 提高 AlGaAs 光电阴极的光电发射性能是当前亟需解决的重要问题.

分布式布拉格反射镜 (distributed Bragg reflector, DBR) 结构因其高反射率被广泛应用于垂直腔面发射激光器中以提高出光效率^[18-21], 受此启发, 本文设计了一种基于 DBR 结构对 532 nm 响应增强的 AlGaAs 光电阴极, 并建立了考虑 DBR 结构反射光吸收的光谱响应模型. 采用时域有限差分方法 (finite-different time-domain, FDTD) 构建了 DBR 光学结构模型, 研究了 DBR 子层对数和 DBR 材料选择与 532 nm 光反射率的关系, 探究了发射层和缓冲层厚度对光电阴极吸收率峰值和对应峰值波长的影响, 得到了吸收率峰值和峰值波长的变化规律, 确定了 532 nm 吸收率增强的发射层与缓冲层厚度. 通过激活实验对比有无 DBR 结构的 AlGaAs 光电阴极样品的光谱响应曲线, 获得本文所设计结构对 532 nm 波长光谱响应的实际提升效果.

2 结构与模型

设计的具有 DBR 结构的反射式 AlGaAs 光电阴极结构如图 1(a) 所示, 自上而下由发射层、缓冲层、DBR 结构层以及 GaAs 衬底组成. 由于 $\text{Al}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}$ 材料对应截止波长为 546 nm, 所设计的 AlGaAs 光电阴极需要在 532 nm 处应具有高的响应, 使用 $\text{Al}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}$ 材料作为发射层能够满足响应曲线在 532 nm 附近截止的需求, 避免对

较长波段响应产生的干扰. 缓冲层采用比发射层 Al 组分大的 AlGaAs 材料, 形成后界面势垒反射光电子向发射表面输运的作用. DBR 结构层由 AlAs 以及 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 两种材料交替构成, 通过调节 DBR 交替子层厚度, 实现对 532 nm 波长光的高反射. 本文所设计的光电阴极与传统光电阴极不同点在于, 532 nm 波长处的入射光在通过发射层时, 其中一部分被发射层吸收, 称之为一次吸收, 另一部分未被吸收的光透过发射层和缓冲层之后, 被 DBR 层重新反射回发射层, 相较于传统光电阴极多进行一次吸收, 称之为二次吸收, 如图 1(b) 所示, 借由二次吸收以提高发射层的吸收率, 进一步提高光电阴极的量子效率, 实现光谱响应的增强.

反射式光电阴极的工作模式为入射光照射在发射层表面, 产生的光电子也从光的入射面逸出, 发射层吸收光子能量激发产生的电子在体内的输运过程遵循一维连续性方程, 通过求解一维连续性方程进一步得到量子效率. 反射式 AlGaAs 光电阴极发射层中光电子扩散遵循的连续性方程为^[22]

$$D_n \frac{d^2 n(x)}{dx^2} - \frac{n(x)}{\tau} + g(x) = 0, \quad (1)$$

式中, $n(x)$ 是扩散电子的浓度, τ 为扩散电子的寿命, D_n 是电子的扩散系数, $g(x)$ 是光电子产生函数. $g(x)$ 的表达式为

$$g(x) = (1 - R) \cdot I_0 \cdot \alpha_{hv} \cdot \exp(-\alpha_{hv}x), \quad (2)$$

$$\alpha_{hv} = 4\pi \cdot k_{\text{AlGaAs}}/\lambda, \quad (3)$$

式中 I_0 是入射光强度, α_{hv} 是阴极对入射光的光吸收系数, R 是阴极材料对入射光的反射率. 对于反射式阴极, x 是阴极内部某点到其表面的距离, k_{AlGaAs} 是发射层 AlGaAs 的消光系数, λ 是入射光波长, $\exp(-\alpha_{hv}x)$ 是光衰减系数, 代表入射光入射至距离表面 x 时光衰减剩余的光强.

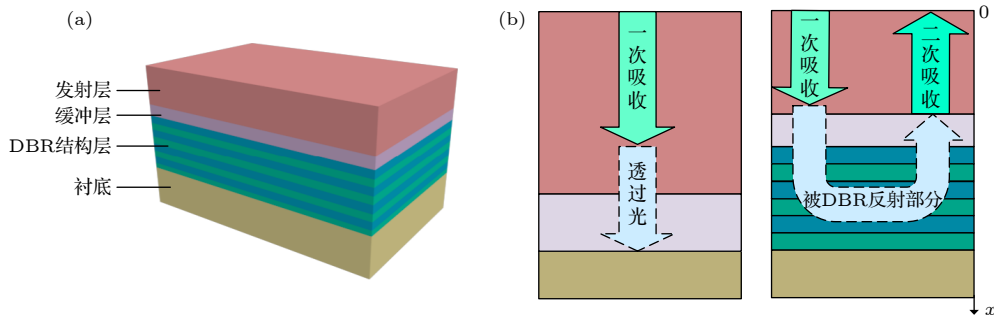


图 1 AlGaAs 光电阴极结构示意图 (a) 设计的自上而下结构; (b) 传统结构与设计结构的光路对比

Fig. 1. Structure diagram of AlGaAs photocathode: (a) The designed top-down structure; (b) comparison of the optical path between the traditional structure and the designed structure.

通过迭代求解方程 (2) 可获得扩散电子的浓度, 如果用 P 表示电子穿越能带弯曲区并越过表面势垒的概率, 并与入射光子能量无关, 则由 $J = P \cdot D_n \frac{dn(x)}{dx} \Big|_{x=0}$ 可求出发射到真空中的电子流密度, 其中 P 和入射波长有关 [23]:

$$P(\lambda) = P_0 \cdot \exp \left[K \cdot \left(\frac{1}{2.27} - \frac{1}{1240/\lambda} \right) \right], \quad (4)$$

式中 P_0 为能量为 2.27 eV (即 546 nm) 的光入射阴极激发产生的光电子的表面逸出概率, K 为表面势垒因子, 最后可由 $Y = J/I_0$ 求出阴极的量子效率. 光电发射性能好的光电阴极要求 P_0 越大, K 越小, 这意味着光电子逸出表面势垒的能力越强, 量子效率会越高. 对于反射式 AlGaAs 光电阴极, 在阴极发射层不是足够厚的情况下, 后界面处的电子浓度与后界面复合速率 S_v 有关, 将边界条件 $D_n \frac{dn(x)}{dx} \Big|_{x=L_e} = -S_v n(x) \Big|_{x=L_e}$, $n(x) \Big|_{x=0} = 0$ 代入方程 (1) 求解, 可以得到一维连续方程的通解. 由于 DBR 结构层的存在, 将发射层的吸收分为两部分, 即一次吸收和二次吸收, 所以分别计算了各部分对量子效率的贡献.

对于一次吸收量子效率 Y_1 由来自正面入射的光子而产生, Y_1 如下所示:

$$Y_1 = P \cdot D_n \frac{dn(x)}{dx} \Big|_{x=0} \cdot \frac{1}{I_0}. \quad (5)$$

由于 DBR 结构层的存在, 入射光在发射层与 DBR 层的交界处发生反射, 原本透过发射层的光被反射回发射层, 对于二次吸收部分, 此时光强 I_1 可以认为是入射光 I_0 乘以发射层的透射率以及 DBR 层的反射率, 即

$$I_1 = I_0 \cdot T \cdot R_{\text{DBR}}, \quad (6)$$

式中 T 为发射层的透射率, R_{DBR} 为 DBR 层的反射率. 在这种情况下, 二次吸收的光电子产生函数 $g'(x)$ 为

$$g'(x) = I_1 \cdot \alpha_{h\nu} \cdot \exp[-\alpha_{h\nu}(L_e - x)], \quad (7)$$

式中 L_e 为发射层的厚度. 由于二次吸收的过程类似于透射式光电阴极的工作方式, 而透射式光电阴极量子效率中认为 P 与入射光子能量关系不大, 因此得到由 DBR 反射光而产生二次吸收的量子效率 Y_2 的表达式为

$$Y_2 = P_0 \cdot D_n \frac{dn'(x)}{dx} \Big|_{x=0} \cdot \frac{1}{I_0}. \quad (8)$$

所设计光电阴极的总量子效率 Y 为

$$Y = Y_1 + Y_2. \quad (9)$$

最后, 阴极不同波长处的光谱响应率 $S(\lambda)$ 可以由量子效率 $Y(\lambda)$ 得到:

$$S(\lambda) = Y(\lambda) \cdot \lambda / 1240. \quad (10)$$

3 仿真与分析

本文使用 FDTD 进行光电阴极结构模型搭建与光学仿真, 图 2 为 FDTD 仿真区域和监视器设置. 自下而上依次构建 GaAs 衬底层、DBR 结构层、 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 缓冲层和 $\text{Al}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}$ 发射层, 对于 FDTD 仿真区域边界条件, 沿入射光方向的边界条件设置为周期性, 垂直于入射光方向的边界条件为完美匹配层, 网格设置精度为最小波长的 1/14, 光源设置为平面波并且垂直入射, 光源放置在距离仿真结构一个波长以上的位置, 仿真范围在 400—700 nm 之间. 通过添加反射率监视器和透射率监视器以绘制反射与吸收谱图, 反射率监视器放置在光源之上, 透射率监视器放置在缓冲层与 DBR 结构层之间, 步长为 1 nm. 光吸收功率监视器加载于整个光电阴极上以探究光吸收强度分布.

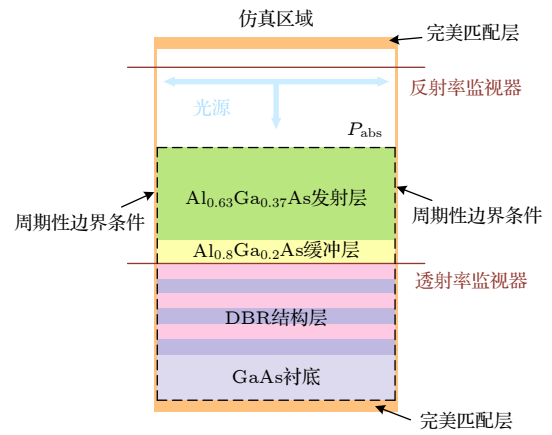


图 2 FDTD 仿真区域和监视器设置

Fig. 2. FDTD simulation region and monitor settings.

本文通过 DBR 层的具体结构设计, 实现特定波长处的高反射. DBR 结构层将原本朝向衬底方向的光束重新反射回至发射层进行二次吸收, 以提高发射层的吸收率. 为了实现 532 nm 波长的全反射, DBR 层的参数需要满足以下方程 [24]:

$$\frac{2\pi}{\lambda} n_L d_L = \frac{\pi}{2}, \quad (11)$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} n_H d_H = \frac{\pi}{2}, \quad (12)$$

式中 n_H 和 n_L 分别为 DBR 层材料的折射率, $n_H > n_L$, d_H 和 d_L 为这两种材料在每个交替周期的厚度, λ 为目标波长. 在本文工作中, 目标波长设置为 532 nm.

3.1 DBR 结构参数的影响

DBR 结构整体反射率的高低将直接影响到光电阴极的发射层的吸收率的高低, 要使光电阴极在 532 nm 波长处具有高响应, DBR 结构的反射峰不仅要高, 中心波长还必须位于 532 nm 波长处. 通过 (11) 式和 (12) 式可以求得使目标波长位于 532 nm 处的 DBR 子层厚度. 这里结构中没有添加发射层与缓冲层, 主要先探究子层交替对数和 DBR 子层材料对 DBR 反射谱高低的影响.

首先研究子层交替对数对 DBR 层反射谱的影响, 选择 $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{AlAs}$ 作为 DBR 的交叠子层, 设置 10 对、20 对、30 对以及 40 对 4 种交替对数的反射谱进行对比. 结果如图 3 所示, 可以发现, 随着 DBR 子层交替对数的增加, 反射率也随之增大. 但是随着对数的增大, 反射率的增长幅度逐渐降低. 对于 $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{AlAs}$ 交替层的 DBR 结构, 在对数 $N = 20$ 时几乎到达反射率上限, 之后再增加的对数难以对反射率进一步提升. 这是由于每多增加一对子层, 会使 DBR 的透射率减小 $(n_L/n_H)^2$, 透射率减小的部分会转化为 DBR 的反射率, 当 DBR 子层增加到一定对数时, 透射率缩量趋近于零, 导致反射率不再增大.

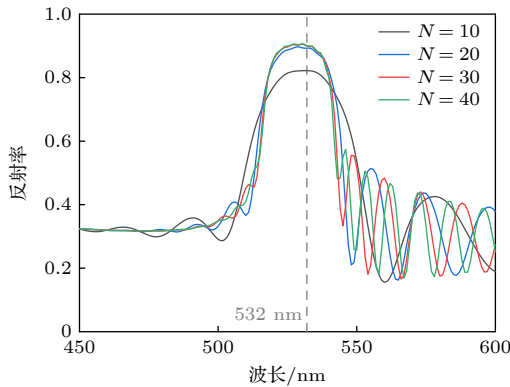


图 3 不同子层交替对数的 DBR 层反射谱

Fig. 3. Reflectivity of DBR layer with different sublayer alternating pairs.

为探究不同 DBR 子层材料选择对 DBR 反射谱的影响, 根据 (11) 式和 (12) 式, 计算得出 DBR 结构中 AlAs 子层厚度为 41 nm, 选择 $\text{Al}_{0.59}\text{Ga}_{0.41}\text{As}$, $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$, $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$, $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 作为交替子层时的厚度分别为 35.8, 36, 38, 40.2 nm. 图 4(a) 为 $\text{Al}_{0.59}\text{Ga}_{0.41}\text{As}/\text{AlAs}$, $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{AlAs}$, $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{AlAs}$, $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{AlAs}$ 和 GaAs/AlAs 五种 DBR 在对数 $N = 20$ 条件下的反射谱. 反射谱峰值高度自上而下分别为 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$, $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$, $\text{Al}_{0.59}\text{Ga}_{0.41}\text{As}$, $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 和 GaAs 子层对应的 DBR. 注意到 GaAs/AlAs 的 DBR 虽然有最高的折射率比, 但是在 532 nm 波长处的反射率却最低, 且 $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{AlAs}$ 的 DBR 反射率峰值高度也略低于 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{AlAs}$ 的 DBR. 为解释高材料折射率比的 DBR 结构反射率峰值却低的现象, 图 4(b) 为 GaAs , $\text{Al}_{0.59}\text{Ga}_{0.41}\text{As}$, $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$, $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 和 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 五种材料的消光系数, 可以看出 GaAs 材料对 532 nm 波长的光有一定的吸收, $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ 材料对 532 nm 波长也有少量

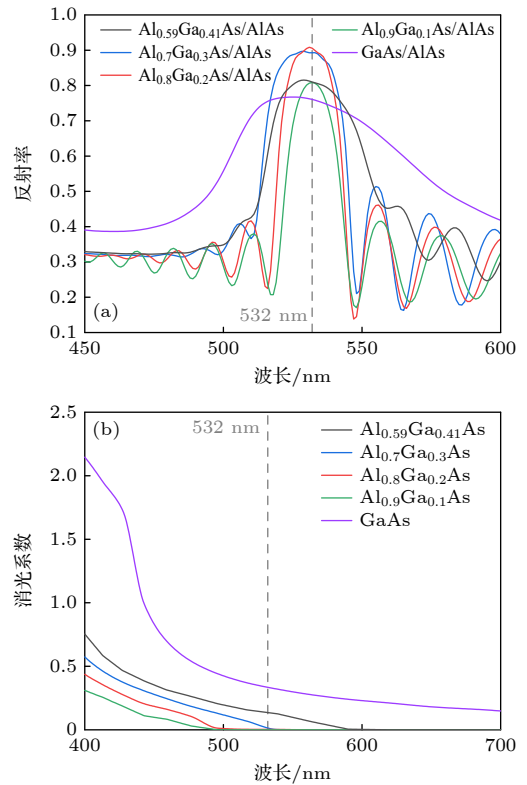


图 4 DBR 层的光学性质 (a) 不同子层材料的反射谱; (b) 不同子层材料的消光系数

Fig. 4. Optical properties of DBR layer: (a) Reflectivity for different sublayer materials; (b) extinction coefficient of different sublayer materials.

的吸收, 由于 DBR 结构是交叠形成的, 在交叠次数达到一定程度时对整体的反射谱会造成较大的影响. 因此对于 DBR 材料选择, 不仅需要选择折射率比大的材料, 也需要注意在工作波段材料吸收损耗的影响, 选择截止波长在工作波段附近的材料较优. 同时可以发现随着 Al 组分的增加, DBR 的高反带逐渐缩窄, 这是因为高反射区的宽度仅仅与 n_H 和 n_L 有关, 而 AlGaAs 材料折射率中随着 Al 组分增加不断降低, 与 AlAs 层的折射比率就越低, 如此就会导致高反射带变窄. $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{AlAs}$ 的 DBR 反射峰值介于 $\text{Al}_{0.59}\text{Ga}_{0.41}\text{As}/\text{AlAs}$ 和 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{AlAs}$ 的 DBR 之间, 但是比 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{AlAs}$ 的 DBR 拥有更宽的高反射谱, 因此综合考虑下, $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{AlAs}$ 的 DBR 反射性能更优, 后续的仿真结构也采用 $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{AlAs}$ 的 DBR 结构.

3.2 发射层和缓冲层厚度的影响

为了探究发射层和缓冲层厚度对光电阴极吸收率峰值和对应峰值波长的影响, 在 FDTD 中搭建包含了 GaAs 衬底、DBR 层、缓冲层和发射层的整体模型进行仿真研究, 研究选择 $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{AlAs}$ 作为 DBR 结构, DBR 周期对数 $N = 20$, $\text{Al}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}$ 作为发射层, $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 作为缓冲层. 首先假定缓冲层厚度为 50 nm 的情况下, 改变发射层厚度 L_e , 寻找最佳发射层厚度以实现在 532 nm 波长处具有最佳发射层吸收率. 如图 5(a) 所示, 发现当发射层为 495 nm 时, 发射层对于 532 nm 波长处的光具有最佳吸收率, 吸收率峰值位置随着发射层厚度增加而红移, 发射层厚度大于或小于 495 nm 时吸收率峰值都会逐渐降低. 在发射层厚度不变的情况下, 通过改变缓冲层厚度 L_b , 探究缓冲层厚度变化对发射层吸收率的影响, 如图 5(b) 所示, 发现缓冲层厚度为 50 nm 时对 532 nm 波长处的光具有最佳吸收率, 吸收率峰值位置也随着缓冲层厚度增加而红移, 并且吸收率峰值随缓冲层厚度变化规律与发射层的厚度变化规律一致, 缓冲层厚度偏离 50 nm 时吸收率峰值都会逐渐降低.

3.3 光吸收分布对比

通过 FDTD 光学仿真获得本文设计的 AlGaAs 光电阴极与传统 AlGaAs 光电阴极在 532 nm 波长处的光吸收分布, 仿真时二者均采用 495 nm 厚的

$\text{Al}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}$ 发射层以及 50 nm 厚的 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 缓冲层, 不同点在于传统反射式 AlGaAs 光电阴极结构中缓冲层之下即为 GaAs 衬底层, 而本文设计的 AlGaAs 光电阴极结构中在缓冲层与衬底层之间引入了 DBR 结构层, 所引入的 DBR 结构为 $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{AlAs}$ 交叠子层, $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ 子层厚度为 36 nm, AlAs 子层厚度为 41 nm, 交替对数 $N = 20$. 图 6 为本文所设计结构和传统结构 AlGaAs 光电阴极对于 532 nm 波长光的光吸收强度分布对比图, 通过光吸收强度分布图可直观的看到光在光电阴极内部的吸收分布, 底层为 GaAs 衬底层, 顶层为 $\text{Al}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}$ 发射层, 光源从上往下垂直入射, 颜色越红代表这部分吸收强度越高. 可以看到, 本文所设计的 AlGaAs 光电阴极引入了 DBR 结构, DBR 结构能够将未被发射层吸收的光重新反射回发射层进行二次吸收, 致使发射层对 532 nm 波长光有很高的吸收强度, 而不具有 DBR 结构的传统 AlGaAs 光电阴极发射层对 532 nm 波长光的吸收存在明显的不足.

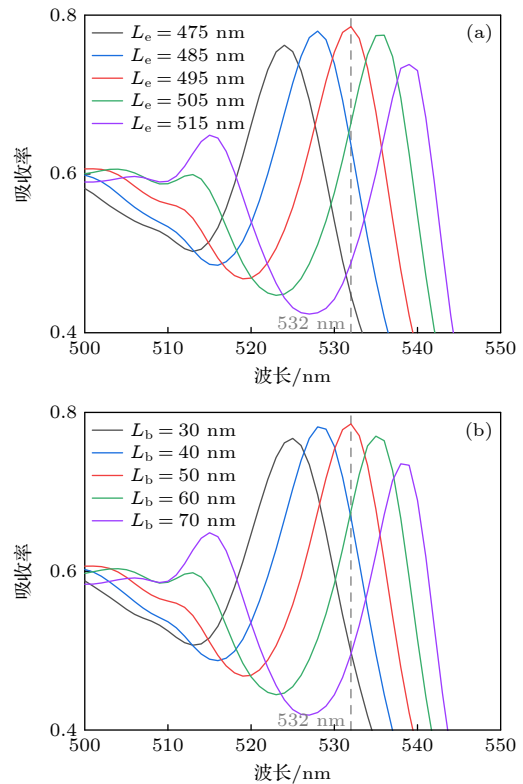


图 5 发射层吸收率随阴极厚度的变化 (a) 发射层厚度; (b) 缓冲层厚度

Fig. 5. Variation of emission layer absorptivity with cathode thickness: (a) Different emission layer thickness L_e ; (b) different buffer layer thickness L_b .

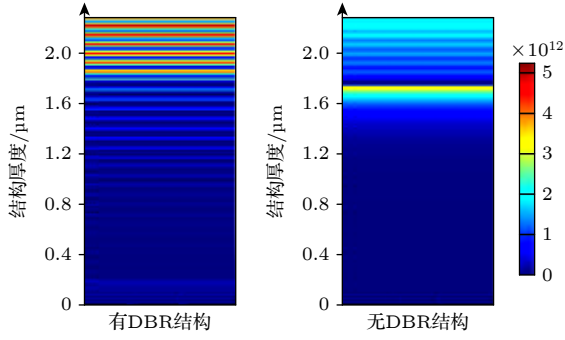


图6 有无DBR结构情况下的AlGaAs光阴极在532 nm处的光吸收强度分布图

Fig. 6. Optical absorption intensity distribution at 532 nm of AlGaAs photocathodes with or without DBR structure.

4 实验验证

为了验证设计的DBR结构对AlGaAs光阴极蓝绿光响应的增强效果, 利用金属有机化学气相沉积外延生长了两种AlGaAs光阴极样品, 分别命名为结构A和结构B. 对于结构A样品, 首先在GaAs衬底上生长用于提高外延层质量的50 nm厚的非掺杂GaAs过渡层, 然后再依次生长DBR结构层、 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 缓冲层以及 $\text{Al}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}$ 发射层, DBR结构由20对 $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{AlAs}$ 两种材料交替构成, 与GaAs衬底相邻的子层为AlAs, 与 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 缓冲层相邻的子层为 $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$, AlAs子层厚度为41 nm, $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ 子层厚度为36 nm, $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 缓冲层为50 nm, $\text{Al}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}$ 发射层为495 nm, DBR层、缓冲层和发射层的p型掺杂浓度均为 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. 结构B样品与结构A样品唯一不同之处在于缺少了DBR结构层, 其余结构参数保持一致.

对结构A与结构B两种AlGaAs光阴极样品分别进行了扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 测试和反射率测试. 结构A与结构B样品的剖面结构如图7所示. 可以看到, 结构A样品清晰可见DBR反射层中的分层, DBR层中共存在20对 $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{AlAs}$ 交替层, 并且在子层交替时各子层的厚度具有良好的 consistency. 对于没有DBR层的结构B样品而言, 外延层仅包含非掺杂GaAs过渡层、p型掺杂的 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 缓冲层和 $\text{Al}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}$ 发射层.

结构A与结构B样品表面反射率测试结果如图8所示, 可以发现两个样品的实测反射率与理论仿真反射率均不符合, 这主要由于生长的样品实际

厚度与理论设计厚度存在一定差异, 结合SEM测试结果并拟合实测反射率曲线, 拟合得到的结构参数如表1所示. 对于结构A样品, DBR层中

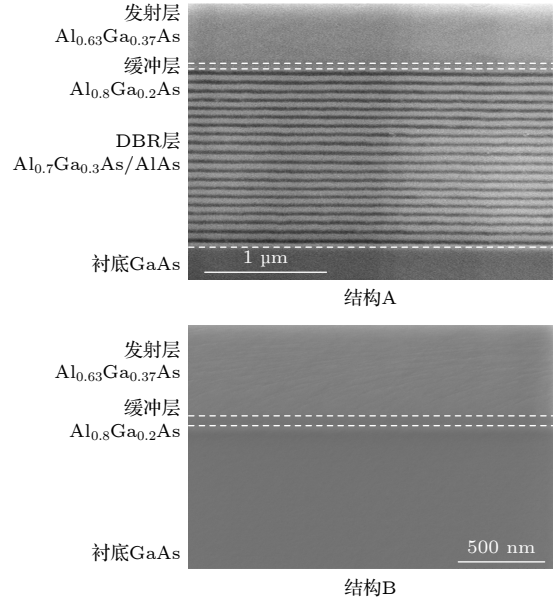


图7 结构A与结构B阴极样品SEM图

Fig. 7. SEM images of cathode samples with structure A and structure B.

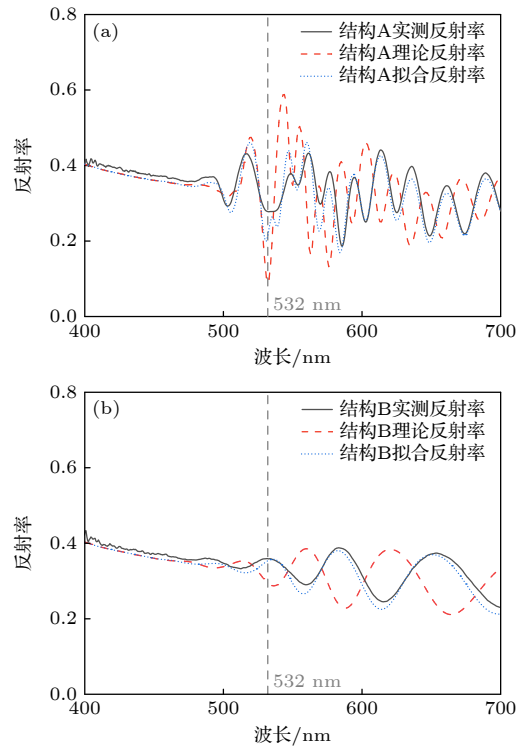


图8 (a) 结构A与(b) 结构B阴极样品反射率实测、理论和拟合结果对比图

Fig. 8. Comparison of measured, theoretical and fitting results of reflectivity of cathode samples with (a) structure A and (b) structure B.

$\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ 子层和 AlAs 子层的实际厚度分别为 34.9 nm 和 38.8 nm, 缓冲层实际厚度为 60 nm, 发射层实际厚度为 500 nm. 对于结构 B 样品, 缓冲层实际厚度为 60 nm, 发射层实际厚度为 522 nm.

表 1 阴极样品结构参数拟合结果
Table 1. Fitting results of structure parameters of the cathode samples.

材料	结构A		结构B	
	设计值 /nm	实际值 /nm	设计值 /nm	实际值 /nm
$\text{Al}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}$ 发射层	495	500	495	522
$\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 缓冲层	50	60	50	60
DBR层				
$\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ 子层	36	34.9	—	—
DBR层 AlAs 子层	41	38.8	—	—

在 Cs/O 激活实验前, 对样品分别进行表面化学清洗和真空加热净化以去除样品表面的碳、氧化物等污染物 [25,26]. 两种结构的 AlGaAs 光阴极的 Cs/O 激活实验均采用白光光照的 Cs 源持续、 O 源断续“yo-yo”激活法 [27], 激活过程如图 9 所示, 具体步骤为: 首先保持 Cs 源开启, 使阴极光电流

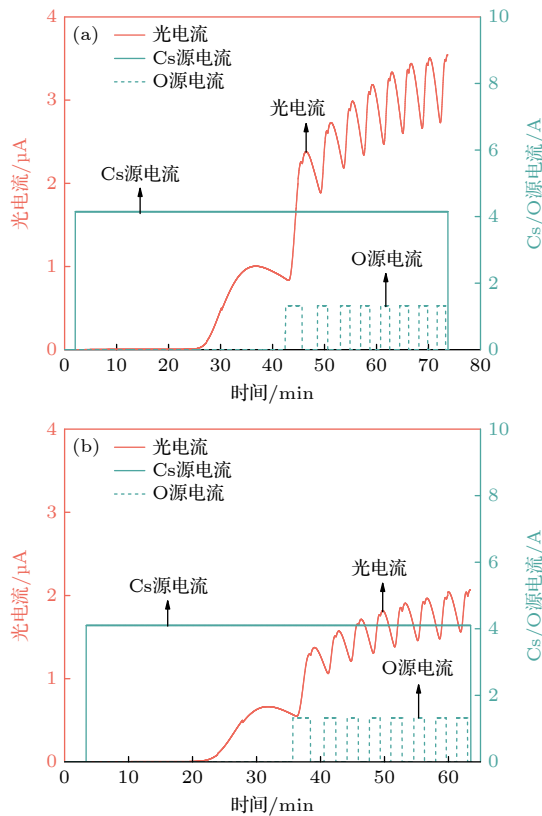


图 9 (a) 结构 A 与 (b) 结构 B 阴极样品的 Cs/O 激活光电流曲线

Fig. 9. Cs/O activation photocurrent curves of cathode samples with structure A and structure B.

达到第一个峰值, 当光电流下降到第一个峰值的 85% 时, 打开 O 源, 当光电流重新达到新峰值时关闭 O 源获得一个新的峰值, 当光电流再次下降到新峰值的 85% 时, 打开 O 源并不断重复以上两步直到光电流峰值不再增长为止. 从图 9 中可看到, 结构 A 样品的最终光电流为 3.54 μA , 而结构 B 样品的最终光电流低于结构 A 样品, 仅为 2.06 μA .

激活后对两个样品进行光谱响应测试, 并利用推导的光谱响应模型对实验光谱响应数据进行拟合, 实验光谱响应曲线和拟合光谱响应曲线如图 10 所示. 拟合时采用图 8 中实测的反射率和表 1 中所列的各层厚度实际值, 拟合得到的阴极性能参数如表 2 所列. 从图 10 可以看到, 结构 A 样品的光谱响应曲线在 500 nm 和 532 nm 波长附近均出现了极大值, 这是由于引入 DBR 结构引起的震荡形成的, 光谱响应曲线峰和谷的波长分别对应反射率曲线谷和峰的波长, 由此可见在阴极可吸收光的波长范围内, 减小某个波长处反射率可以有效提高该波长处的阴极光谱响应. 虽然生长的阴极材料各层厚度有所偏差, 但是结构 A 样品在 532 nm 处出现了明显的增强峰, 相较于结构 B 样品的光谱响应率提高了约 1 倍. 此外, 通过表 2 还可以发现, 与结构

表 2 阴极性能参量拟合结果
Table 2. Fitting results of cathode performance parameters.

	结构A	结构B	描述
P_0	0.36	0.25	表面电子逸出概率
K	0.2	0.6	表面势垒因子
$S_0/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	4×10^4	1×10^5	后界面电子复合速率

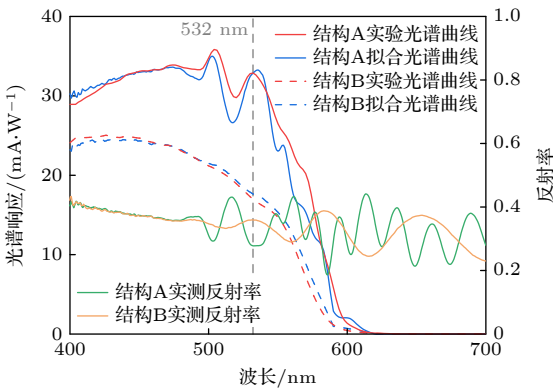


图 10 结构 A 与结构 B 阴极样品的光谱响应实测和拟合曲线与反射率实测曲线

Fig. 10. Measured and fitted spectral response curves and measured reflectivity curves of cathode samples with structure A and structure B.

B 样品相比, 结构 A 样品的表面电子逸出概率更高, 表面势垒因子更小, 后界面电子复合速率更低. 这是由于结构 A 中在阴极衬底上先生长了 DBR 交替层结构, 较厚的 DBR 层有利于减少发射层材料中的晶体缺陷, 因此结构 A 中发射层的生长质量要优于结构 B. 因此可以推断, 在阴极衬底和发射层之间引入 DBR 交替层结构, 一方面能够有效改善发射层晶体质量, 减少表面缺陷, 另一方面可以有效提高发射层对 532 nm 光的吸收, 由此显著提高阴极在 532 nm 波长处的量子效率, 最终实现 AlGaAs 光电阴极在 532 nm 波长处的响应增强.

5 结 论

本文提出了一种具有 DBR 结构的 AlGaAs 光电阴极, 从而提高光电阴极在 532 nm 波长处的光谱响应率. 通过光学性质仿真, 研究了 DBR 结构中子层周期对数、子层材料以及发射层、缓冲层厚度与发射层吸收率的关系, 发现当 DBR 子层材料为 $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{AlAs}$, 结构周期对数为 20 时, DBR 结构对 532 nm 波长光的反射效果最优; 进一步当发射层厚度为 495 nm、缓冲层厚度为 50 nm 时, 发射层对 532 nm 波长光具有最佳吸收率. 通过对比有无 DBR 结构的光吸收强度分布, 发现相较于没有 DBR 结构的传统 AlGaAs 光电阴极, 本文所设计的具有 DBR 结构的 AlGaAs 光电阴极对 532 nm 波长处的光吸收有显著提升. 最后制备了有无 DBR 结构的两种 AlGaAs 光电阴极样品, 对比了二者在 Cs/O 激活实验后的光谱响应曲线, 具有 DBR 结构的 AlGaAs 光电阴极在 532 nm 波长处的光谱响应率提升了约 1 倍, 此外在衬底和发射层之间引入 DBR 结构可以有效改善阴极性能参量. 本文研究工作为提升蓝绿光 AlGaAs 光电阴极的响应性能提供了参考.

参考文献

[1] Guo X, Shi F, Jia T T, Zhang R Y, Du J J, Chen P, Wu H Y, Cheng H C, Zhang Y J 2023 *IEEE Photonics J.* **15**

6801005
[2] Schindler P, Riley D C, Bargatin I, Sahasrabudhe K, Schwede J W, Sun S, Pianetta P, Shen Z X, Howe R T, Melosh N A 2019 *ACS Energy Lett.* **4** 2436
[3] Bae J K, Andorf M, Bartnik A, Galdi A, Cultrera L, Maxson J, Bazarov I 2022 *AIP Adv.* **12** 095017
[4] Liang Y T, Yang Y B, Zhao Y X 2020 *Physics* **49** 525 (in Chinese) [梁羽铁, 杨一玻, 赵宇翔 2020 *物理* **49** 525]
[5] Morishita H, Ohshima T, Otsuga K, Kuwahara M, Agemura T, Ose Y 2021 *Ultramicroscopy* **230** 113386
[6] Chen X L, Tang G H, Wang D C, Xu P X 2018 *Opt. Mater. Express* **8** 3155
[7] Xu Y, Zhang Y J, Feng C, Shi F, Zou J J, Chen X L, Chang B K 2016 *Opt. Commun.* **380** 320
[8] Nishitani T, Tabuchi M, Takeda Y, Suzuki Y, Motoki K, Meguro T 2009 *Jpn. J. Appl. Phys.* **48** 06FF02
[9] Spagnolo G S, Cozzella L, Leccese F 2020 *Sensors* **20** 2261
[10] Kaushal H, Kaddoum G 2016 *IEEE Access* **4** 1518
[11] Zeng F J, Yang K J, YAN X, Zhao M M, Yang P, Wen L H 2021 *Laser Optoelectron. Prog.* **58** 0300002 (in Chinese) [曾凤娇, 杨康建, 晏旭, 赵孟孟, 杨平, 文良华 2021 *激光与光电子学进展* **58** 0300002]
[12] Li K, Yang S H, Liao Y Q, Lin X T, Wang X, Zhang J Y, Li Z 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 084203 (in Chinese) [李坤, 杨苏辉, 廖英琦, 林学彤, 王欣, 张金英, 李卓 2021 *物理学报* **70** 084203]
[13] Chen X L, Zhao J, Chang B K, Yu X H, Hao G H, Xu Y, Cheng H C 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 213105
[14] Chen X L, Jin M C, Zeng Y G, Hao G H, Zhang Y J, Chang B K, Shi F, Cheng H C 2014 *Appl. Opt.* **53** 7709
[15] Chen X L, Zhao J, Chang B K, Hao G H, Xu Y, Zhang Y J, Jin M C 2014 *Mater. Sci. Semicond. Process.* **18** 122
[16] Li S M, Zhang Y J, Wang Z H, Wang D Z, Tang S, Zhang J J, Shi F, Jiao G C, Cheng H C, Hao G H 2023 *Opt. Express* **31** 26014
[17] Spicer W E 1977 *Appl. Phys.* **12** 115
[18] Xia J, Beomhoan O, Lee S G, Lee E 2005 *Opt. Laser Technol.* **37** 125
[19] Wang S C, Lu T C, Kao C C, Chu J T, Huang G S, Kuo H C, Chen S W, Kao T T, Chen J R, Lin L F 2007 *Jpn. J. Appl. Phys.* **46** 5397
[20] Liu L J, Wu Y D, Wang Y, An J M, Hu X W 2018 *Optoelectron. Lett.* **14** 342
[21] Jahed M, Gustavsson J S, Larsson A 2021 *IEEE J. Quantum Electron.* **57** 2400307
[22] Martinelli R U, Fisher D G 1974 *Proc. IEEE* **62** 1339
[23] Zou J J, Chang B K, Chen H L, Liu L 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 033126
[24] Liu W, Chen Y Q, Lu W T, Moy A, Poelker M, Stutzman M, Zhang S K 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 252104
[25] Sun X J, Hu L Z, Song H, Li Z M, Li D B, Jiang H, Miao G Q 2009 *Solid State Electron* **53** 1032
[26] Chen X L, Chang B K, Zhao J, Hao G H, Jin M C, Xu Y 2013 *Opt. Commun.* **309** 323
[27] Zhang Y J, Zhang K M, Li S M, Li S, Qian Y S, Shi F, Jiao G C, Miao Z, Guo Y L, Zeng Y G 2020 *J. Appl. Phys.* **128** 173103

AlGaAs photocathode with enhanced response at 532 nm^{*}

Wang Dong-Zhi¹⁾ Zhang Yi-Jun^{1)†} Li Shi-Man¹⁾ Tong Ze-Hao¹⁾
 Tang Song¹⁾ Shi Feng²⁾ Jiao Gang-Cheng²⁾ Cheng Hong-Chang²⁾
 Fu Rong-Guo¹⁾ Qian Yun-Sheng¹⁾ Zeng Yu-Gang³⁾

¹⁾ (School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

²⁾ (Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China)

³⁾ (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

(Received 8 February 2024; revised manuscript received 29 March 2024)

Abstract

The AlGaAs photocathode can be used in the field of underwater optical communication because of its fast response speed and adjustable spectral response range. In order to solve the problem that the low light absorption of the AlGaAs emission layer limits the improvement of its quantum efficiency, the distributed Bragg reflector (DBR) structure is used to reflect the light at a specific wavelength back to the emission layer to further increase the absorption rate, thus improving the response capability of the photocathode at 532 nm. The spectral response model of the AlGaAs photocathode with DBR structure is obtained by solving one-dimensional continuity equation. The optical model of the AlGaAs photocathode with enhanced response at 532 nm is established by the finite-difference time-domain method. The effects of the sublayer periodic pairs, the sublayer material and the thickness of emission layer and buffer layer on the absorption rate of emission layer are analyzed. The light absorption distributions of AlGaAs photocathode with and without DBR structure are compared, and the influence mechanism of DBR structure on the blue-green light absorption capacity of AlGaAs photocathode emission layer is clarified, which can provide a theoretical basis for designing its structural parameters. The results show that the DBR structure with a periodic pair of 20 and $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{AlAs}$ has the best reflection effect on 532 nm light. Based on the DBR structure, when the thickness of the emission layer and buffer layer are 495 nm and 50 nm, respectively, the emission layer has the best absorption rate of 532 nm light. Furthermore, two kinds of AlGaAs photocathodes with and without DBR structure are prepared by the metal-organic chemical vapor deposition technology, and the reflectivity and profile structure of the grown samples are characterized. Then the Cs/O activation experiments are performed to compare the spectral response curves. It is found that the spectral response of the AlGaAs photocathode sample with DBR structure at 532 nm wavelength is about twice that of the sample without DBR structure.

Keywords: AlGaAs photocathode, distributed Bragg reflector, spectral response, optical absorption

PACS: 85.60.Ha, 85.60.Bt, 71.55.Eq

DOI: 10.7498/aps.73.20240253

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62271259, U2141239), the Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory Foundation of China (Grant No. J20220102), and the Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province, China (Grant No. KYCX23_0431).

† Corresponding author. E-mail: zhangyijun423@njjust.edu.cn

532 nm响应增强的AlGaAs光电阴极

王东智 张益军 李诗曼 童泽昊 唐嵩 石峰 焦岗成 程宏昌 富容国 钱芸生 曾玉刚

AlGaAs photocathode with enhanced response at 532 nm

Wang Dong-Zhi Zhang Yi-Jun Li Shi-Man Tong Ze-Hao Tang Song Shi Feng Jiao Gang-Cheng
Cheng Hong-Chang Fu Rong-Guo Qian Yun-Sheng Zeng Yu-Gang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 118503 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240253

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240253>

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

等离子激元增强的石墨烯光吸收

Enhanced optical absorption of graphene by plasmon

物理学报. 2020, 69(6): 067801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191645>

Mg₂Si/Si雪崩光电二极管的设计与模拟

Design and simulation of Mg₂Si/Si avalanche photodiode

物理学报. 2021, 70(10): 108501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201923>

多功能多元稀土六硼化物La_{1-x}Sr_xB₆光吸收及热电子发射机理

Optical absorption and thermionic emission mechanism of multi-functional La_{1-x}Sr_xB₆ hexaborides

物理学报. 2021, 70(21): 214204 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211069>

多元纳米稀土六硼化物Nd_{1-x}Eu_xB₆粉末的制备及光吸收研究

Synthesis and optical absorption properties of nanocrystalline rare earth hexaborides Nd_{1-x}Eu_xB₆ powders

物理学报. 2021, 70(3): 036101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201288>

蜂窝状椭圆孔洞吸收器圆二色性研究

Circular dichroism of honeycomb-shaped elliptical hole absorber

物理学报. 2020, 69(20): 207101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200843>

光学共振增强的表面铯激活银纳米结构光阴极

Optical resonance enhanced Cs activated nano-structured Ag photocathode

物理学报. 2020, 69(6): 068501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191420>