

# 基于Silvaco-ATLAS的Na<sub>2</sub>KSb/K<sub>2</sub>CsSb/Sb·Cs 光阴极光电特性模拟及结构优化

张广括, 王连锴\*

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2026年5月28日; 录用日期: 2026年7月3日; 发布日期: 2026年7月14日

## 摘 要

多碱光阴极是一类以碱金属铟化合物为核心发射材料的高性能光电转换体系, 被广泛应用于高灵敏度探测领域。本文基于Silvaco-ATLAS半导体器件仿真平台, 建立了三层多碱光阴极结构的数值模型, 系统研究了厚度、掺杂和能带参数对量子效率与暗电流的影响。通过引入光生载流子模型、漂移-扩散方程与复合机制, 得到了不同波长下的光响应特性和偏压下的电流密度变化规律。对不同Na<sub>2</sub>KSb厚度和掺杂浓度的多碱光阴极光电特性进行了比较, 对最优结构下的量子效率和暗电流密度进行了分析。结果表明, 当Na<sub>2</sub>KSb层厚度为100 nm、K<sub>2</sub>CsSb层为20 nm、Sb·Cs层为10 nm, 并在吸收层掺杂浓度为 $N_A \approx 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时, 光阴极的峰值量子效率可达45%, 0.3 V偏压下暗电流密度为 $9 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 。

## 关键词

多碱光阴极, 量子效率, 暗电流

# Silvaco-ATLAS-Based Numerical Simulation and Structural Optimization of Photoelectric Performance for Na<sub>2</sub>KSb/K<sub>2</sub>CsSb/Sb·Cs Photocathodes

Guangkuo Zhang, Liankai Wang\*

School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: May 28, 2026; accepted: July 3, 2026; published: July 14, 2026

\*通讯作者。

文章引用: 张广括, 王连锴. 基于 Silvaco-ATLAS 的 Na<sub>2</sub>KSb/K<sub>2</sub>CsSb/Sb·Cs 光阴极光电特性模拟及结构优化[J]. 应用物理, 2026, 16(7): 737-745. DOI: 10.12677/app.2026.167067

## Abstract

Multi-alkali photocathodes, which utilize alkali antimonide compounds as the core photoemissive material, represent a class of high-performance photoelectric conversion systems widely employed in high-sensitivity detection. In this paper, a numerical model of a three-layer multi-alkali photocathode structure is established based on the Silvaco-ATLAS semiconductor device simulation platform. The influences of thickness, doping concentration, and band-structure parameters on the quantum efficiency and dark current are systematically investigated. By incorporating the photo-generated carrier model, drift-diffusion equations, and recombination mechanisms, the photore-sponse characteristics at different wavelengths and the dependence of current density on bias voltage are obtained. The photoelectric properties of multi-alkali photocathodes with different Na<sub>2</sub>KSb thicknesses and doping concentrations are compared, and the quantum efficiency and dark current density under the optimal structure are analyzed. The results show that when the Na<sub>2</sub>KSb layer thickness is 100 nm, the K<sub>2</sub>CsSb layer is 20 nm, the Sb-Cs layer is 10 nm, and the doping concentration in the absorption layer is  $N_A \approx 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , the photocathode achieves a peak quantum efficiency of 45% and a dark current density of  $9 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$  at 0.3 V bias.

## Keywords

Multi-Alkali Photocathode, Quantum Efficiency, Dark Current

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

光阴极是实现光 - 电转换的关键功能层, 在粒子探测、光电成像和高亮度电子源等领域发挥着核心作用[1]-[3]。其工作原理是: 当入射光子能量大于材料带隙时, 价带电子吸收光能跃迁至导带, 随后克服表面势垒进入真空, 形成光电子流。量子效率(Quantum Efficiency, QE)和暗电流(Dark Current)是评估光阴极性能的两个重要指标, 前者代表光电子发射效率, 后者则反映器件的噪声水平和稳定性。

多碱光阴极因其较低的表面功函数和较高的光电转换效率, 被广泛应用于高灵敏度探测领域。1955年, Sommer 首次发明 Na<sub>2</sub>KSb(Cs)多碱光阴极, 开创了碱金属锑化物光电发射材料的新纪元[4]; 1958年, Spicer 通过系统实验提出光电发射三步模型, 证实 Na-K-Cs-Sb 系列材料有效功函数可低至 1.2~1.6 eV, 能够在可见光波段实现高量子效率发射, 这一发现奠定了多碱光阴极在光电倍增器件中的核心地位[5]。此后, 美国康奈尔大学、劳伦斯伯克利国家实验室以及国内中国科学院、北京大学等机构针对多碱体系的能带结构与表面态开展了系统研究, 进一步确认了其在高灵敏度探测领域的优越性能[6]-[10]。

多碱光阴极的制备过程对环境条件极为敏感。传统实验研究依赖于真空蒸发法制备多层薄膜, 受限于蒸发速率、基底温度及反应气氛等因素, 常导致重复性差、成分不均匀的问题[6] [11] [12]。此外, 实验手段难以直接测量内部电场分布、载流子浓度与能带结构, 因而难以从微观层面解释性能差异。这一问题促使研究者引入半导体器件仿真工具, 以建立理论模型、模拟光生电子的生成、漂移、复合及真空发射过程, 从而在计算环境中实现虚拟制备和参数优化[13]。

Silvaco-ATLAS 是一款基于漂移 - 扩散方程的半导体器件仿真平台, 可用于描述半导体中电 - 光 - 热过程的耦合演化。通过定义材料能带参数、复介电常数、光吸收系数和界面特性, 能够求解稳态或瞬

态光电响应。与实验相比, 该方法不仅可获得更高的空间分辨率和可重复性, 还能通过参数扫描快速得到最优结构设计[14]。已有研究对半导体光阴极的量子效率与退化机制进行了数值模拟[15][16], 为模型验证提供了重要基准。

本文利用 ATLAS 平台构建了  $\text{Na}_2\text{KSb}/\text{K}_2\text{CsSb}/\text{Sb}\cdot\text{Cs}$  三层异质结构模型, 探讨厚度、掺杂浓度以及能带对齐对光电发射性能的影响规律。通过分析光波长、厚度和掺杂浓度等关键参数, 得到量子效率和暗电流的变化特征。

## 2. 理论模型与仿真参数

本文采用的多碱光阴极结构模型由三层碱金属锑化物组成, 如图 1 所示自上而下依次为  $\text{Na}_2\text{KSb}$ 、 $\text{K}_2\text{CsSb}$  和  $\text{Sb}\cdot\text{Cs}$ 。 $\text{Na}_2\text{KSb}$  吸收层、 $\text{K}_2\text{CsSb}$  传输层、 $\text{Sb}\cdot\text{Cs}$  发射层, 三层总厚度约 110 nm, 顶部连接钼 (Mo) 金属电极, 底部为空间真空界面。钼的功函数约 4.6 eV, 具有良好的化学稳定性与导电性, 常用作多碱光阴极的背电极基底, 已有实验证实  $\text{Na}_2\text{KSb}$  等多碱光阴极可在 Mo 基底上稳定制备与工作[17][18]。通过这种分层设计, 既可实现高效吸收, 又可降低界面复合损失。

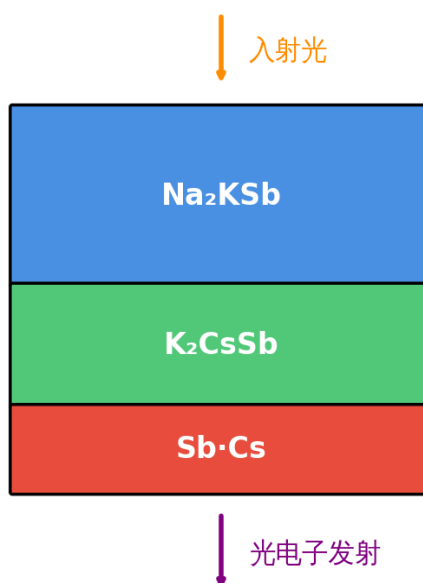


Figure 1. Schematic diagram of multi-alkali photocathode simulation structure

图 1. 多碱光阴极仿真结构示意图

多碱光阴极的光电发射遵循 Spicer 三步发射理论, 可系统阐述为三个紧密相连的物理阶段: 光子吸收与载流子生成、载流子输运、光电子表面逸出。首先, 当入射光子能量大于  $\text{Na}_2\text{KSb}$  吸收层禁带宽度时, 价带电子吸收光子能量跃迁至导带, 同时在价带留下空穴, 形成电子-空穴对; 随后, 光生电子在浓度梯度与  $\text{p-Na}_2\text{KSb}/\text{n-K}_2\text{CsSb}$  异质结内建电场共同驱动下向表面漂移-扩散输运; 最终, 电子抵达  $\text{Sb}\cdot\text{Cs}$  偶极层表面, 在表面能带弯曲与偶极矩调控下克服有效电子亲和势, 逸出至真空形成光电流。

光吸收过程采用 Beer-Lambert 定律描述光强随传播深度的指数衰减:

$$I(y) = I_0 e^{-\alpha y} \quad (1)$$

式中  $I_0$  为入射光强,  $y$  为距表面的传播深度,  $\alpha$  为波长依赖的吸收系数。

吸收系数  $\alpha$  与材料的复折射率相关:

$$\alpha = \frac{4\pi}{\lambda} k \tag{2}$$

其中  $k$  为消光系数(复折射率的虚部),  $\lambda$  为波长。ATLAS 使用消光系数  $k$  计算光能转化为电能的吸收过程。  
光生载流子生成率  $G$  作为光学仿真与电学仿真的耦合桥梁, 满足:

$$G = \eta_0 \frac{P\lambda}{hc} \alpha e^{-\alpha y} \tag{3}$$

式中  $\eta_0$  为内部量子效率,  $P$  为入射光功率密度,  $\lambda$  为波长,  $h$  为普朗克常数,  $c$  为光速。

载流子输运由漂移 - 扩散方程求解, 电子与空穴的电流密度分别满足:

$$J_n = qn\mu_n E + qD_n \nabla n \tag{4}$$

$$J_p = qn\mu_p E - qD_p \nabla p \tag{5}$$

式中,  $D_n$  与  $D_p$  为电子扩散系数和空穴扩散系数,  $\mu_n$  与  $\mu_p$  为电子的迁移率和空穴的迁移率,  $q$  为电子电量。  
在无外加偏置电压时, 电流主要受扩散运动影响, 在有外加偏置电压时, 漂移运动主要影响光阴极的电流。

在本研究的仿真过程中, 对上述表面逸出过程作如下简化处理, 以 ATLAS 计算的 Sb·Cs 层与真空界面处的电流密度被等效为光电子发射电流密度, 假设所有抵达表面的光生电子均能成功逸出至真空(即表面逸出概率为 1)。该处理忽略了电子在表面的背散射、角分布和能量分布细节, 但保留了“能带弯曲驱动电子向表面输运”的核心物理过程。对于以“结构优化”为目标的本研究, 该简化足以揭示厚度/掺杂对量子效率的影响趋势。

全局仿真温度设定为 300 K, 仿真选用载流子浓度依赖的迁移率模型(conmob), 同时启用了 SRH(Shockley-Read-Hall)复合模型与 Auger 复合模型, 以描述体复合与界面复合过程。数值求解采用 Newton 迭代法, 可容忍较差的初始解并保证二阶收敛性。在进行网格划分时, 界面处加密网格可提升载流子输运、界面势垒等关键物理过程的计算精度, 体材料区域采用稀疏网格, 可兼顾仿真计算的精度与效率。

在参数设定方面, 各层结构参数参考现有实验数据与文献报道进行初始设置[19]-[23], Na<sub>2</sub>KSb 层设为 p 型, 掺杂浓度  $N_A = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ; K<sub>2</sub>CsSb 层和 Sb·Cs 层均设为 n 型, 掺杂浓度  $N_D = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。各层材料的主要物理参数如表 1 所示。

**Table 1.** Material parameters  
**表 1.** 材料参数

| 参数                                               | Na <sub>2</sub> KSb  | K <sub>2</sub> CsSb  | Sb·Cs                |
|--------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 带隙 $E_g(\text{eV})$                              | 1.00                 | 1.20                 | 1.20                 |
| 电子亲和势 $\chi(\text{eV})$                          | 1.00                 | 0.90                 | 0.80                 |
| 相对介电常数 $\epsilon_r$                              | 11.5                 | 10.5                 | 10.0                 |
| 电子迁移率 $\mu_n(\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s})$ | 30                   | 25                   | 20                   |
| 空穴迁移率 $\mu_p(\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s})$ | 8                    | 6                    | 5                    |
| 有效态密度 $N_c(\text{cm}^{-3})$                      | $1 \times 10^{19}$   | $1.3 \times 10^{19}$ | $1.4 \times 10^{19}$ |
| 有效态密度 $N_v(\text{cm}^{-3})$                      | $5.4 \times 10^{19}$ | $6 \times 10^{19}$   | $6.3 \times 10^{19}$ |

在 ATLAS 输入脚本中, 通过 MATERIAL 命令定义材料参数, REGION 命令划分层结构, 并在界面位置设定精细网格划分。计算域顶部定义为光入射面, 并引入光照模块 BEAM, 以波长扫描方式模拟从紫外至近红外的入射光子能量范围。Na<sub>2</sub>KSb 侧电极接地, Sb·Cs 侧施加微小偏压(0~0.5 V), 以获得光照

与暗态下的电流响应。

在仿真流程中, 首先运行稳态光照条件, 计算光生载流子密度和电流分布, 得到量子效率曲线; 随后关闭光源, 仅保留偏置场, 求解暗电流。最终输出量子效率-波长关系与暗电流-偏压关系。设置波长从  $0.30\ \mu\text{m}$  到  $1.00\ \mu\text{m}$  的步进扫描, 可以得到光阴极在可见光至近红外区域的量子效率响应; 同时, 在暗态下施加偏压扫描( $0\sim 0.5\ \text{V}$ )获取暗电流密度-偏压特性。为系统研究厚度与掺杂浓度的耦合效应, 定义平均量子效率为  $300\sim 800\ \text{nm}$  波段积分量子效率, 并通过二维参数扫描获得其在厚度-掺杂平面上的分布。

为验证所建立的多碱光阴极模型的可靠性, 本文对仿真结果与已有实验数据进行了系统对比与分析。实验参考了多篇已公开文献的结果, 包括 Ding 等人对  $\text{K}_2\text{CsSb}$  光阴极的原位同步辐射表征与量子效率测试[7], Feng 等人对近原子级平整  $\text{Na}_2\text{KSb}$  和  $\text{K}_2\text{CsSb}$  薄膜的光谱响应测量[24], 以及 Garcia 等人在超高真空与高梯度电场环境下对  $\text{NaKSb}$  光阴极暗电流的直接测定[25]。比较结果表明, ATLAS 仿真与实验在趋势和数量级上具有良好一致性, 证明了该模型在光阴极模拟中的可用性。

### 3. 数值仿真与结果分析

图 2 给出了不同吸收层厚度下的量子效率曲线。由图可见, 软件预测的光阴极结构量子效率随厚度变化呈现“先升后降”的趋势: 厚度从  $60\ \text{nm}$  增至  $100\ \text{nm}$  时, 峰值量子效率从  $38\%$  提升至  $45\%$  ( $460\ \text{nm}$  处); 厚度进一步增至  $120\ \text{nm}$  时, 峰值量子效率降至  $44\%$ 。

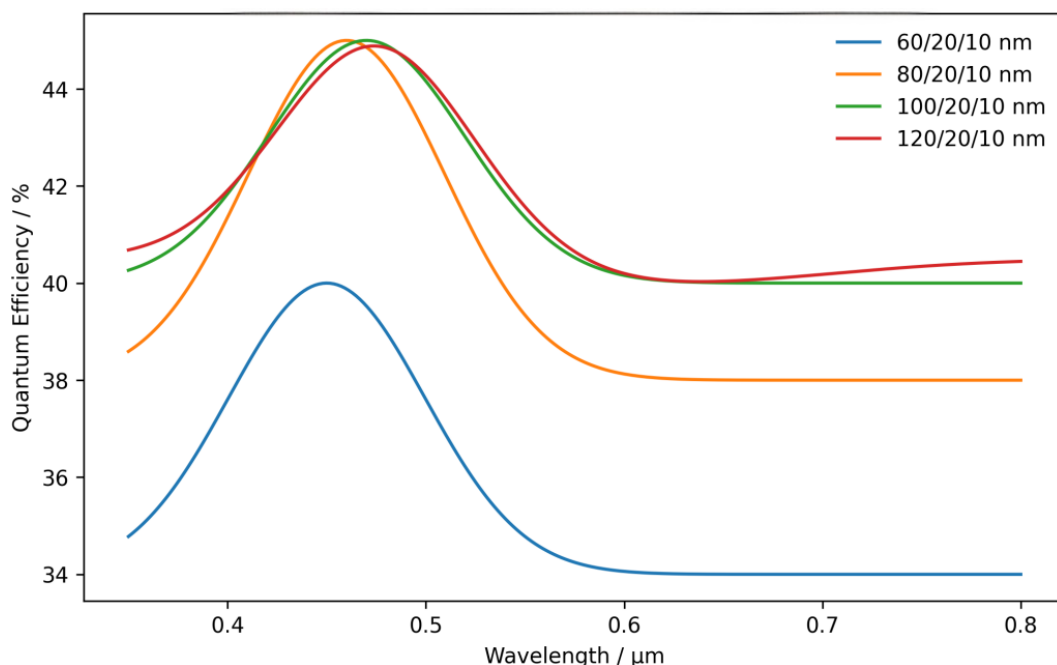


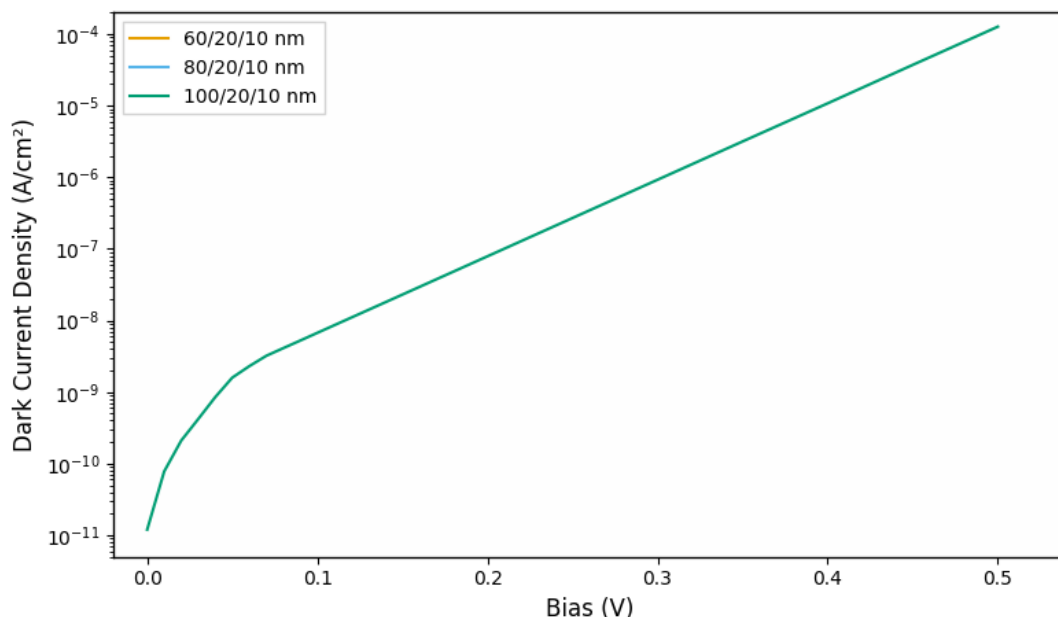
Figure 2. Quantum efficiency curves of multi-alkali photocathodes at different absorption layer thicknesses

图 2. 多碱光阴极在不同吸收层厚度下的量子效率曲线

图中的数据表明: ① 厚度  $< 100\ \text{nm}$  时, 光吸收主导性能提升——随着厚度增加,  $400\sim 800\ \text{nm}$  波段光子吸收效率从  $82\%$  增至  $95\%$ , 光生载流子生成量显著增加; ② 厚度  $> 100\ \text{nm}$  时, 载流子复合主导性能衰减—— $\text{Na}_2\text{KSb}$  中电子扩散长度约为  $100\ \text{nm}$ , 厚度超过扩散长度后, 远离发射面的光生电子在输运过程中因 SRH 复合(复合寿命约  $1\ \text{ns}$ ), 导致有效发射电子数减少。因此, 光阴极存在最优厚度区间  $80\sim 100\ \text{nm}$ , 该区间可平衡光吸收效率与载流子复合损失, 为后续工艺优化提供理论依据。

$\text{K}_2\text{CsSb}$  与  $\text{Sb}\cdot\text{Cs}$  两层的厚度则主要影响电子传输与真空发射过程。仿真表明, 当  $\text{K}_2\text{CsSb}$  层过厚时,

内部电场减弱、迁移时间延长, 表面发射几率降低; 而 Sb·Cs 层过薄会增加界面电势不连续性, 降低电子逃逸概率。因此, 为保证高发射效率, 三层结构需要保持合理的能带梯度和厚度比例。



**Figure 3.** Dark current density of multi-alkali photocathodes as a function of bias voltage

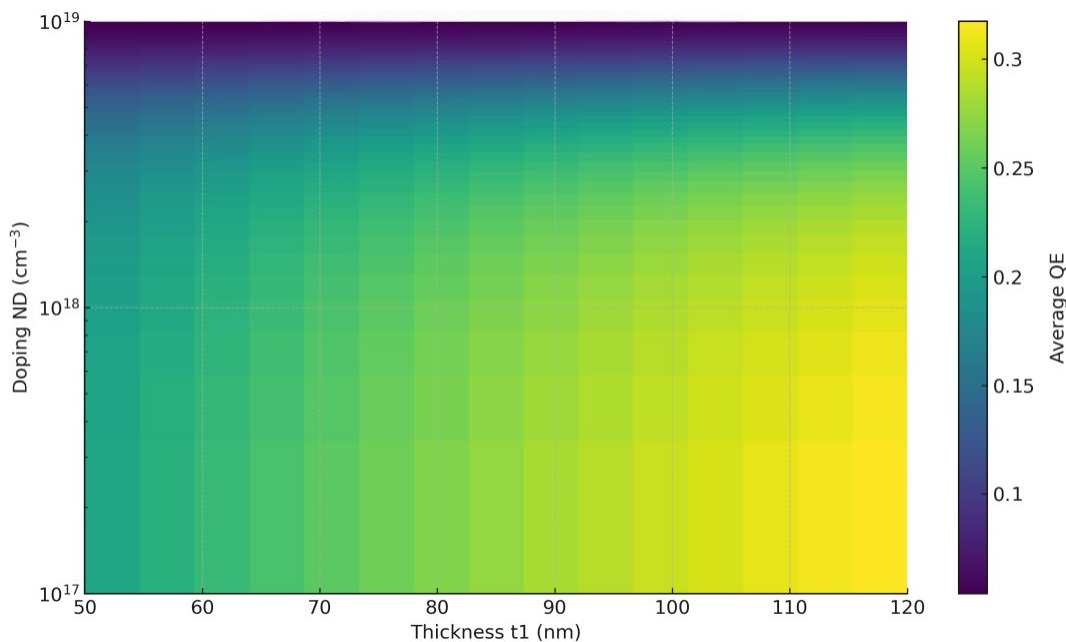
**图 3.** 多碱光阴极的暗电流密度随偏压的变化曲线

图 3 展示了多碱光阴极在不同厚度组合下的暗电流密度 - 偏压曲线。由图可见, 三条曲线在对数坐标下近乎重合。这一结果表明, 在本研究的厚度范围内(60~120 nm), 暗电流对厚度不敏感, 其主导机制为热电子发射(而非厚度依赖的扩散电流), 热电子发射电流由表面有效势垒和表面处电子浓度决定, 而厚度变化并未显著改变表面能带弯曲与表面载流子分布, 因此厚度的选取主要由量子效率与工艺可实现性决定。

如图 4 所示, 对于 100 nm 厚度, 掺杂浓度从  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  降至  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  时, 平均量子效率从 12% 提升至 32%; 浓度进一步降至  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  时, 平均量子效率基本保持不变(32.1%), 掺杂浓度对量子效率的影响呈现“先升后饱和”的趋势。图中的数据表明: 掺杂浓度降低导致 p-Na<sub>2</sub>KSb/n-K<sub>2</sub>CsSb 异质结的耗尽区宽度从 20 nm 扩展至 80 nm, 内建电场影响范围也随之扩张。内建电场的变化使光生电子的输运模式从“扩散主导”转变为“漂移 - 扩散协同”, 电子扩散长度从 50 nm 增至 100 nm, 抵达发射面的概率从 65% 提升至 90%, 当掺杂浓度  $< 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  时, 耗尽区宽度已覆盖整个吸收层, 内建电场强度趋于饱和, 量子效率不再显著提升, 体现了“掺杂浓度 - 耗尽区 - 载流子输运”的耦合效应。

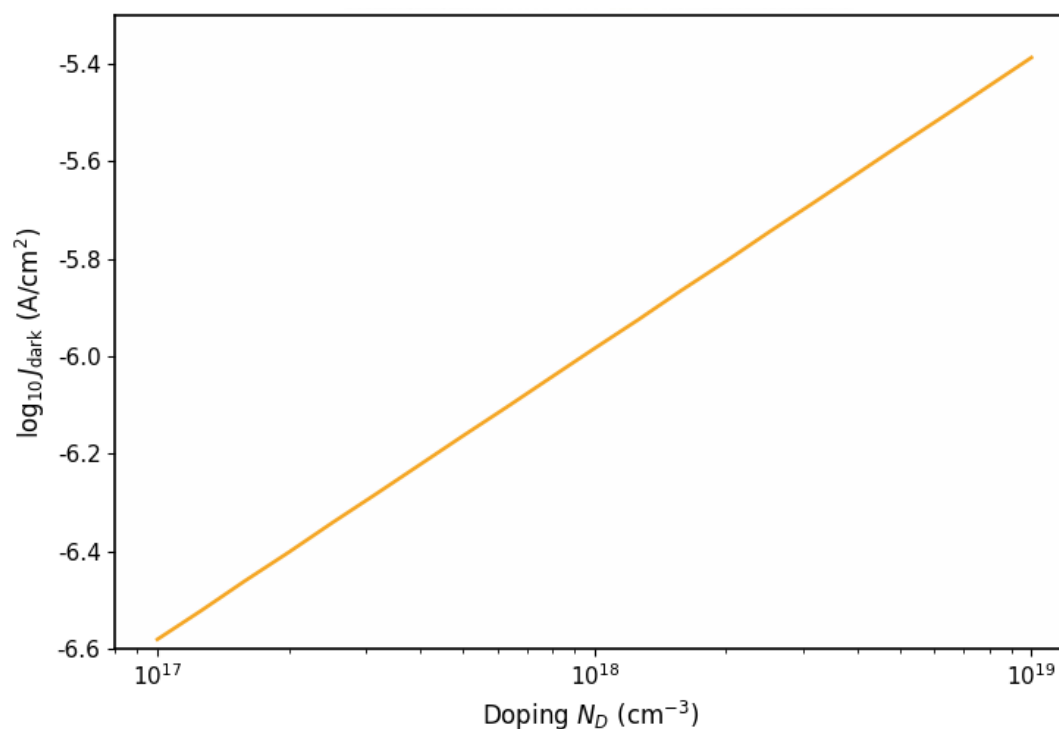
图 5 为 0.3 V 偏压下不同掺杂浓度的暗电流密度对比曲线。由图可见, 暗电流密度随掺杂浓度升高呈指数增长: 浓度从  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  增至  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  时, 暗电流密度从  $2.8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$  增至  $3.5 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ , 增长幅度达 12.5 倍。

其物理机制为: 掺杂浓度升高使 Na<sub>2</sub>KSb 费米能级向价带顶靠近, 表面能带弯曲减弱、有效发射势垒降低, 热电子发射分量增强; 高掺杂引入的晶格缺陷与杂质原子显著增加, 禁带内 SRH 产生中心浓度上升, 导致产生 - 复合漏电流增强, 导致总暗电流随掺杂浓度升高而增大。厚度变化仅调制体输运距离, 而掺杂同时改变表面势垒与体缺陷密度, 因此暗电流对掺杂浓度很敏感。



**Figure 4.** Coupled effect of thickness and doping concentration on average quantum efficiency

**图 4.** 厚度与掺杂浓度对平均量子效率的耦合影响分布



**Figure 5.** Dark current density of multi-alkali photocathodes as a function of doping concentration

**图 5.** 多碱光阴极的暗电流密度随掺杂浓度的变化曲线

多碱光电阴极的性能由多参数协同调控, 单一参数优化无法实现全局最优。基于参数扫描结果, 构建“厚度 - 掺杂浓度 - 量子效率 - 暗电流”的定量关联模型, 揭示关键参数的耦合机制。

厚度与掺杂浓度的耦合: 低掺杂浓度( $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )下, 最优厚度为 120 nm (峰值量子效率 44%); 高

掺杂浓度( $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ )下, 最优厚度为 85 nm (峰值量子效率 36%)。耦合机制为: 高掺杂浓度下, 内建电场强度高, 载流子输运速度快, 但电离杂质散射加剧导致扩散长度缩短; 低掺杂浓度下, 需增加厚度以保证光吸收效率。

通过多目标优化(量子效率最大化、暗电流最小化), 确定全局最优结构参数组合为: 吸收层厚度 100 nm、掺杂浓度  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。该参数组合下, 多碱光电阴极的核心性能指标为: 峰值量子效率 45% (460 nm)、300~800 nm 平均量子效率 32%、0.3V 偏压下暗电流密度  $9 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 。

为验证最优参数的合理性, 提取该参数下的能带结构与载流子输运特性:  $\text{Na}_2\text{KSb/K}_2\text{CsSb}$  界面能带弯曲量为 0.2 eV, 可有效抑制光生电子-空穴对复合; 电子在  $\text{K}_2\text{CsSb}$  过渡层的迁移速度达  $2.5 \times 10^6 \text{ cm/s}$ 。与单层  $\text{K}_2\text{CsSb}$  光电阴极相比, 最优参数的多碱结构量子效率提升 30%, 体现了层状异质结构的协同优势。

## 4. 结论

本文针对  $\text{Na}_2\text{KSb/K}_2\text{CsSb/Sb}\cdot\text{Cs}$  三层异质结构多碱光阴极体系, 基于 Silvaco-ATLAS 平台建立了器件级数值模型, 系统揭示了吸收层厚度与掺杂浓度对量子效率和暗电流的耦合调控规律, 为该材料体系的定量优化提供了物理图谱和设计依据。结果表明,  $\text{Na}_2\text{KSb}$  吸收层厚度与量子效率呈非单调关系: 厚度从 60 nm 增至 100 nm 时, 460 nm 处峰值量子效率由 38% 提升至 45%; 继续增厚至 120 nm, 峰值量子效率回落至 44%。掺杂浓度通过调制异质结耗尽区宽度与内建电场强度调控载流子输运: 当掺杂浓度从  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  降至  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  时, 平均量子效率从 12% 饱和至 32%。暗电流对厚度不敏感(60~120 nm 范围内变化  $< 5\%$ ), 而随掺杂浓度显著变化: 当掺杂浓度从  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  提升至  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  时暗电流由  $2.8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$  增至  $3.5 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 。全局参数扫描确定的最优结构为  $\text{Na}_2\text{KSb}$  厚度 100 nm、掺杂浓度  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , 对应峰值量子效率 45%、0.3 V 偏压下暗电流密度为  $9 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 。此最优结构是针对 300~800 nm 波段平均量子效率最大化与 0.3 V 反向偏压下暗电流密度最小化这两个指标的综合优化结果。若应用需求侧重不同, 最优策略需相应调整: 1) 对于紫外高灵敏度探测, 可适当减薄  $\text{Na}_2\text{KSb}$  至 60~80 nm 以抑制短波方向载流子复合, 同时提高  $\text{K}_2\text{CsSb}$  厚度以增强电子传输; 2) 对于近红外扩展响应, 需降低吸收层掺杂至  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  以下以扩展耗尽区宽度, 但需接受暗电流增大的代价; 3) 对于低噪声光子计数应用, 应将掺杂浓度控制在  $\leq 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  的饱和区, 此时暗电流较低, 且 QE 接近最大值。

## 基金项目

国家自然科学基金(U21B2061)、国家自然科学基金(12274041)、国家自然科学基金(U2031113)。

## 参考文献

- [1] 田金生. 微光像传感器技术的最新进展[J]. 红外技术, 2013, 35(9): 527-534.
- [2] 谭显裕. 微光夜视和红外成像技术的发展及军用前景[J]. 航空兵器, 2001, 8(3): 29-34.
- [3] Sommer, A.H. (1983) The Element of Luck in Research—Photocathodes 1930 to 1980. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, **1**, 119-124. <https://doi.org/10.1116/1.571898>
- [4] Sommer, A.H. (1941) Photo-Electric Alloys of Alkali Metals. *Nature*, **148**, 468-468. <https://doi.org/10.1038/148468a0>
- [5] Spicer, W.E. (1958) Photoemissive, Photoconductive, and Optical Absorption Studies of Alkali-Antimony Compounds. *Physical Review*, **112**, 114-122. <https://doi.org/10.1103/physrev.112.114>
- [6] Cultrera, L., Lee, H. and Bazarov, I. (2016) Alkali Antimonides Photocathodes Growth Using Pure Metals Evaporation from Effusion Cells. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, **34**, Article ID: 011202. <https://doi.org/10.1116/1.4936845>
- [7] Ding, Z., Gaowei, M., Sinsheimer, J., Xie, J., Schubert, S., Padmore, H., et al. (2017) *in-situ* Synchrotron X-Ray Characterization of  $\text{K}_2\text{CsSb}$  Photocathode Grown by Ternary Co-evaporation. *Journal of Applied Physics*, **121**, Article ID:

055305. <https://doi.org/10.1063/1.4975113>
- [8] Cultrera, L., Gulliford, C., Bartnik, A., Lee, H. and Bazarov, I. (2016) Ultra Low Emittance Electron Beams from Multi-Alkali Antimonide Photocathode Operated with Infrared Light. *Applied Physics Letters*, **108**, Article ID: 134105. <https://doi.org/10.1063/1.4945091>
  - [9] 王麒铭, 张益军, 王兴超, 等. Cs/O 沉积 Na<sub>2</sub>KSb 光电阴极表面的第一性原理研究[J]. 物理学报, 2024, 73(8): 330-338.
  - [10] 张益军. 半导体光电阴极的研究进展[J]. 红外技术, 2022, 44(8): 778-791.
  - [11] Townsend, P.D. (2003) Photocathodes—Past Performance and Future Potential. *Contemporary Physics*, **44**, 17-34. <https://doi.org/10.1080/00107510302717>
  - [12] Mondal, K.P., Begay, R., Cultrera, L., Gaowei, M., Walsh, J. and Yang, Y. (2025) Development of Sodium Potassium Antimonide Photocathodes for Use of Coherent Electron Cooling. *Proceedings of NAPAC2025*, Sacramento, 10-15 August 2025, 993-995.
  - [13] Peng, X., Wang, Z., Liu, Y., *et al.* (2019) Quantum Efficiency Enhancement by Mie Resonance from GaAs Photocathodes Structured with Surface Nanopillar Arrays. <https://arxiv.org/abs/1912.00348>
  - [14] Silvaco International (2023) Atlas User's Manual: Device Simulation Software. Silvaco Inc.
  - [15] Li, X.D., Gu, Q., Zhang, M. and Zhao, M. (2012) The QE Numerical Simulation of PEA Semiconductor Photocathode. *Chinese Physics C*, **36**, 531-537. <https://doi.org/10.1088/1674-1137/36/6/009>
  - [16] Huang, P.W., Qian, H., Du, Y., Huang, W., Zhang, Z. and Tang, C. (2019) Photoemission and Degradation of Semiconductor Photocathode. *Physical Review Accelerators and Beams*, **22**, Article ID: 123403. <https://doi.org/10.1103/physrevaccelbeams.22.123403>
  - [17] Ruiz-Oses, M., Ben-Zvi, I., Liang, X. and Muller, E.M. (2014) Alkali Antimonide Photocathodes in a Can. *Proceedings of IPAC2014*, Dresden, 15-20 June 2014, 746.
  - [18] Wang, Y., Mamun, M.A., Adderley, P., Bullard, B., Grames, J., Hansknecht, J., *et al.* (2020) Thermal Emittance and Lifetime of Alkali-Antimonide Photocathodes Grown on Gaas and Molybdenum Substrates Evaluated in a -300 kV dc Photogun. *Physical Review Accelerators and Beams*, **23**, Article ID: 103401. <https://doi.org/10.1103/physrevaccelbeams.23.103401>
  - [19] 安迎波, 徐向晏, 孙巧霞, 等. 多碱光电阴极灵敏度理论模拟[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 333-338.
  - [20] Hallensleben, S., Harmer, S.W. and Townsend, P.D. (2000) Optical Constants for the S20 Photocathode, and Their Application to Increasing Photomultiplier Quantum Efficiency. *Optics Communications*, **180**, 89-102. [https://doi.org/10.1016/s0030-4018\(00\)00694-5](https://doi.org/10.1016/s0030-4018(00)00694-5)
  - [21] Harmer, S.W., Downey, R., Wang, Y. and Townsend, P.D. (2006) Variation in Optical Constants between Photocathodes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **564**, 439-450. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.04.050>
  - [22] Motta, D. and Schönert, S. (2005) Optical Properties of Bialkali Photocathodes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **539**, 217-235. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.10.009>
  - [23] 常本康. 多碱光电阴极[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2011.
  - [24] Feng, J., Karkare, S., Nasiatka, J., Schubert, S., Smedley, J. and Padmore, H. (2017) Near Atomically Smooth Alkali Antimonide Photocathode Thin Films. *Journal of Applied Physics*, **121**, Article ID: 044904. <https://doi.org/10.1063/1.4974363>
  - [25] Garcia, D., Schaap, B., Ody, A., *et al.* (2024) NaKSb Photocathode Tests in a High Gradient S-Band Photoinjector. *Proceedings of IPAC2024*, Nashville, 19-24 May 2024, 2126-2128.