光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250926004

场强对电子轰击CMOS器件光电阴极量子效率影响研究

闫　磊[1,2]，石　峰[1,2*]，程宏昌[1,2]，韩　剑[1,2]，袁　渊[1,2]，马　靖[1,2]，师宏立[1,2]，罗　洋[1,2]

（1. 微光夜视技术重点实验室，西安 710065；2. 昆明物理研究所，昆明 650223）

摘　要： 电场强度直接影响电子轰击CMOS（EBCMOS）器件的图像增强特性，通过实时调控EBCMOS电场强度是实现其亮度自适应控制的一种有效方法。然而，当前GaAs光电阴极量子效率模型在电场强度改变时难以有效预测光电子发射特性，导致EBCMOS自适应控制精度受限。为解决该问题，基于电场强度在3×10^5～3×10^6 V/m范围内变化的GaAs光电阴极量子效率测量数据，结合已有的GaAs光电阴极量子效率模型和半导体空间电荷层及表面势之间的关系，分析了电场强度引起GaAs光电阴极量子效率发生变化的原因。通过测量数据拟合，获得了电场强度参数对逸出几率的作用方程。经10支EBCMOS样品验证，该方程预测吻合度达91%以上。该研究成果为新一代高性能数字微光器件应用提供了理论模型支撑。

关键词： GaAs光电阴极；能带弯曲；载流子耗尽；量子效率

中图分类号： TN223　**文章编号：** 1001－5868(2025)06－0975－06

Research on the Influence of Electric Field Intensity on the Photocathode Quantum Efficiency of Electron Bombardment CMOS

YAN Lei[1,2], SHI Feng[1,2], CHENG Hongchang[1,2], HAN Jian[1,2], YUAN Yuan[1,2], MA Jing[1,2], SHI Hongli[1,2], LUO Yang[1,2]

(1. Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, CHN; 2. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, CHN)

Abstract: The electric field intensity directly affects the image enhancement characteristics of electron bombardment complementary metal-oxide-semiconductor (EBCMOS) devices. Real-time regulation of the electric field intensity of EBCMOSs enables its brightness adaptive control. However, the current quantum efficiency model of gallium arsenide (GaAs) photocathodes cannot fully predict the effective photoelectron emission characteristics when the electric field intensity changes, resulting in the inability of EBCMOS adaptive control accuracy . This study presents the quantum efficiency measurement of GaAs photocathodes under 3×10^5～3×10^6 V/m electric field intensity changes, combined with existing quantum efficiency models of GaAs photocathodes and the relationship between the semiconductor space charge layer and surface potential. The reasons behind the change in the quantum efficiency of GaAs photocathodes caused by the electric field intensity were analyzed. The equation for the effect of electric field intensity parameters on the escape probability was fitted based on the measurement data. The analysis of 10 EBCMOS samples revealed that the predicted accuracy of the equation exceeded 91%. This study provides theoretical model support for

收稿日期：2025－09－26.

*通信作者：石　峰

the application of a new generation of high-performance digital low-light-level devices.

Key words: GaAs photocathode; band bending; carrier depletion; quantum efficiency

0 引言

采用GaAs光电阴极的电子轰击CMOS(EBCMOS)器件兼具真空微光器件高增益、快响应和良好的夜天光谱兼容性,同时也具有固体微光器件可数字化读出的优点,是未来数字微光器件发展的重要方向[1-5]。在EBCMOS的正常工作过程中,入射光子首先通过GaAs光电阴极将入射光子转化成光电子,这些光电子在施加GaAs光电阴极的场强作用下,轰击具有电子倍增特性的有源图像传感器(APS)。光电子在APS电子倍增层内部产生大量的二次电子,完成“光电子-电子倍增”环节,倍增后的二次电子随后被APS结区收集。通过读出电路中的MOS晶体管,二次电子信号得到放大并读出,完成“电子电压转换-信号读出”环节,供后端进行数字化处理[6-7]。GaAs光电阴极将入射光子转化成光电子的能力一般用量子效率表征,光电子轰击倍增层产生二次电子被APS结区收集的能力一般用APS电子倍增系数表征,量子效率和倍增系数直接决定EBCMOS最终图像增强能力,即决定EBCMOS输出图像强度。

关于APS电子倍增系数,主要与GaAs光电阴极的场强和APS内部结构有关,国内外已开展大量研究,形成了较为成熟的理论模型及测试方法等。然而,关于GaAs光电阴极量子效率,当前的理论模型尚未完全满足EBCMOS自适应控制的要求。具体而言,在不同照度条件下,为保证输出灰度效果最佳,需要实时调节GaAs光电阴极场强参数,但基于前期测试数据,当GaAs光电阴极场强发生变化时,其量子效率也会发生变化,而目前已建立的GaAs光电阴极量子效率模型仅给出了掺杂浓度、界面晶格质量、激活层厚度等相关参数的影响,却未纳入场强参数。这一缺失严重影响GaAs光电阴极在特定场强条件下量子效率预测准确性,导致EBCMOS自适应控制效果无法达到理论预期。

针对上述问题,本文利用EBCMOS光谱响应测试仪,获得了GaAs光电阴极在3×10^5~3×10^6 V/m范围内的光谱响应曲线。结合半导体空间电荷层及表面势之间的关系,以及GaAs光电阴极量子效率模型,分析了场强参数对GaAs光电阴极量子效率影响原因。此外,对GaAs光电阴极量子效率模型进行了修正及验证,修正后模型可更好地预测EBCMOS光谱响应特性。

1 GaAs光电阴极量子效率测试

利用EBCMOS光谱响应测试仪对EBCMOS在不同场强条件下的量子效率进行测量,EBCMOS光谱响应测试装置原理图如图1所示。

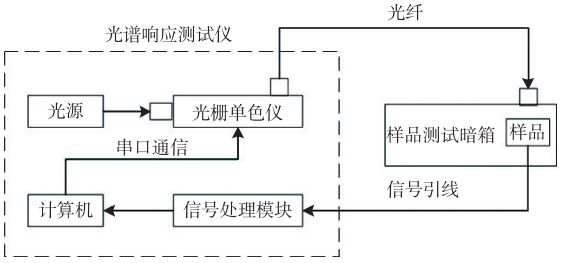


图1 EBCMOS光谱响应测试装置原理图

测量前,首先利用光功率计对光栅单色仪输出特定波长的光功率进行标定,用$W(\lambda)$表示波长为λ的光功率。完成光栅单色仪输出光功率标定后,将测试EBCMOS样品装入样品测试暗箱中,并通过信号处理模块完成对EBCMOS中GaAs光电阴极电压施加,以及后端阳极收集电流信号的测量,用$I_{V,\lambda}$表示当电压为V、入射波长为λ时,阳极端收集到的电流值。完成上述测量后,根据$I_{V,\lambda}$和$W(\lambda)$的比值可获得GaAs光电阴极在特定场强特定波长时的辐射灵敏度$S_{V,\lambda}$。最后,根据辐射灵敏度和量子效率之间的换算公式(1),可以进一步计算出GaAs光电阴极在特定场强特定波长时的量子效率。

$$\eta=\frac{1\,240}{\lambda}S_{V,\lambda}\times100\% \tag{1}$$

测试时的光谱范围为400~1 000 nm,波长步长为5 nm;EBCMOS场强范围为3×10^5~3×10^6 V/m。根据测量结果,当场强升高时,GaAs光电阴极的量子效率越高,如图2所示。为了便于区分,此处仅给出部分条件下的量子效率曲线。随着EBCMOS场强升高,其光电阴极量子效率随之增加。

为获得场强对不同波长处量子效率变化影响,选取3×10^5 V/m时量子效率曲线作为参考,计算400~900 nm波长在场强增加后量子效率的增加比例。计算可得不同波长处量子效率的增加比例相

近，如图3为当场强由3×10^5 V/m升至1.3×10^6 V/m时，各波长处量子效率增加率为9%±2%。

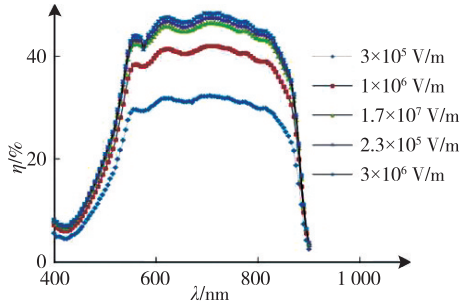


图2　不同场强下GaAs光电阴极量子效率曲线

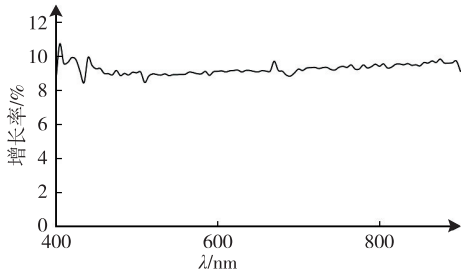


图3　场强升高后不同波长处量子效率增长率

由图3可知不同波长处量子效率增加率相近，为了方便比较，以峰值量子效率对应波长620 nm作为对比波长，计算电压升高后量子效率增长率。计算规则为，以3×10^5 V/m条件下GaAs光电阴极量子效率曲线为参考，计算各电压条件下620 nm波长对应量子效率相对3×10^5 V/m条件下量子效率的增加率，如图4所示。其中实心点为测试值，曲线为拟合结果。

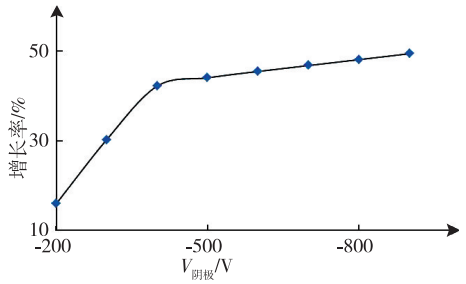


图4　电压引起的量子效率增长率曲线

2　场强对GaAs量子效率影响分析

根据W. E. Spicer提出的半导体“光电发射三步模型”，即把光电子从产生到发射的过程分成三步：(1)光子入射到半导体产生光电子；(2)电子向半导体表面的输运过程；(3)电子穿过表面势垒逸出到真空过程。则阴极的量子效率由这三步决定，即光子转换成电子的内部量子效率(Y_1)、电子有足够的能量输送到阴极表面的输运效率(Y_2)和电子逸出概率(P)，阴极的外量子效率$Y=Y_1\cdot Y_2\cdot P$。由此可见，阴极的最终量子效率受这三个因素的影响，如图5所示。其中，内部量子效率通常与材料本身有关，电子输运的过程主要受电子能量分布的影响，导带高能区的电子相比低能区的电子有更大的概率到达真空能级；而阴极体内的光电子到达表面以后，部分电子能够越过表面势垒而逸出到真空中去，电子透过表面势垒的过程主要受透射系数的影响，即能否隧穿表面势垒逸出，同时势垒的形状也是应当考虑在内的因素，表面电子逸出到真空中的概率和电子自身的能量、表面势垒的高度和宽度有关[8-12]。

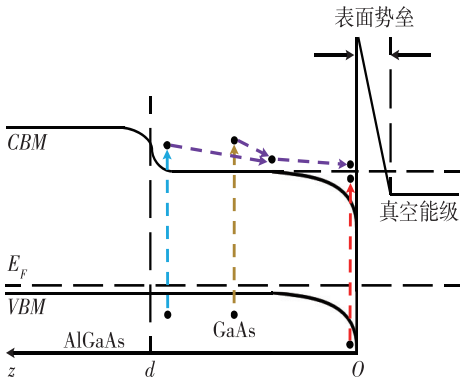


图5　GaAs光电阴极能带与电子运动示意图

对于传统的透射式GaAs光阴极，量子效率的表达式为[10]：

$$Y_T(h\upsilon)=\frac{P(1-R)a_{h\upsilon}L_D}{a_{h\upsilon}^2L_D^2-1}\times\left\{\frac{a_{h\upsilon}D_n+S_v}{\left(\frac{D_n}{L_D}\right)\cosh\left(T_e/L_D\right)+S_v\sinh\left(T_e/L_D\right)}-\frac{\exp(-a_{h\upsilon}T_e)\left[S_v\cosh\left(T_e/L_D\right)+\left(\frac{D_n}{L_D}\right)\sinh\left(T_e/L_D\right)\right]}{\left(\frac{D_n}{L_D}\right)\cosh\left(T_e/L_D\right)+S_v\sinh\left(T_e/L_D\right)}-a_{h\upsilon}L_D\exp(-a_{h\upsilon}T_e)\right\}\tag{2}$$

式中，P表示电子穿越表面势垒的几率（也称“逸出几率”），R为反射系数，a_{hv}为阴极对入射光的吸收系数，L_D是阴极材料电子扩散长度，D_n为扩散系数，S_v表示后界面复合速率，T_e是阴极发射层的厚度。

当对GaAs光电阴极表面施加负电压时，主要有两方面的影响：一是GaAs光电阴极表面的势垒高度减小；二是在GaAs光电阴极表面形成电荷堆积，耗尽层宽度增加。根据半导体表面场致发射模型，外加速场使半导体表面势垒的高度减小量与场强E的关系如公式（3）所示[13-14]，势垒高度随场强E变化曲线如图6所示。

$$-\triangle\Phi = 3.79\times10^{-4}\sqrt{E} \tag{3}$$

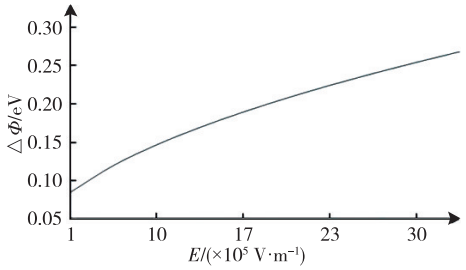
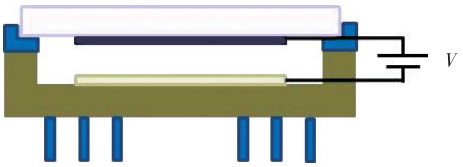


图6 势垒高度随场强变化曲线

根据半导体空间电荷层及表面势之间的关系，对于P型GaAs光电阴极，其表面施加负电场时其能带向下发生弯曲，同时在表面感应形成少子堆积。EBCMOS结构如图7（a）所示，其表面施加电压时可等效为图7（b）所示的串联电容，C_s表示GaAs光电阴极等效电容，C_o表示真空介质电容。



（a）EBCMOS结构



（b）等效电容

图7 EBCMOS结构示意图及其等效电容

通过一维泊松方程求解，可以获得GaAs光电阴极表面电容C_s与堆积电荷Q_s和表面势V_s间的关系，如公式（4）所示：

$$C_s = A\frac{dQ_s}{dV_s} = A\frac{\varepsilon_s}{L_D}\frac{\left[\left(-e^{-\frac{qV_s}{KT}}+1\right)+\frac{n_0}{p_0}\left(e^{\frac{qV_s}{KT}}-1\right)\right]}{F\left(\frac{qV_s}{KT},\frac{n_0}{p_0}\right)} \tag{4}$$

式中，ε_s为P型硅的介电常数，L_D为德拜长度。

$$L_D = \left(\frac{2\varepsilon_s kT}{q^2 p_0}\right)^{1/2} \tag{5}$$

$$F\left(\frac{qV_s}{KT},\frac{n_0}{p_0}\right) = \left[\left(e^{-\frac{qV_s}{kT}}+\frac{qV_s}{kT}-1\right)+\frac{n_0}{p_0}\left(e^{\frac{qV_s}{kT}}-\frac{qV_s}{kT}-1\right)\right]^{1/2} \tag{6}$$

将掺杂浓度、介电常数等参数代入上式，采用数值计算方法，可以获得理想的表面电势V_s与表面电容之间的关系。P型半导体耗尽层宽度x_d与表面电荷密度Q_s之间得关系如公式（7）所示：

$$Q_s = -qN_A x_d \tag{7}$$

根据公式（7）可知，耗尽层宽度与电荷密度成正比，由此可知，随场强增加，其耗尽层宽度增加速率减小。根据图8，势垒高度和耗尽层宽度随场强增加，其对应的增加速率递减，这两项因素共同影响量子效率变化规律。

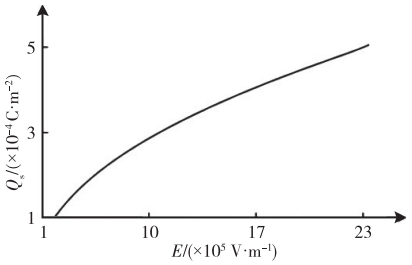


图8 电荷密度随场强变化曲线

3 GaAs光电阴极量子效率公式修正

根据上述分析，当GaAs光电阴极施加负场强时，主要影响表面势垒层和表层耗尽宽度，对应GaAs光电阴极量子效率公式，其主要影响参数为逸出几率参数P。选用GaAs光电阴极厚度T_e为1.5 μm，L_D为3.5 μm，D_n为120 cm²/s，反射率R与波长的关系如图9所示。吸收系数a_{hv}与波长的关系如图10曲线所示。

根据上述参数，并结合量子效率公式（8）可获得GaAs光电阴极的量子效率：

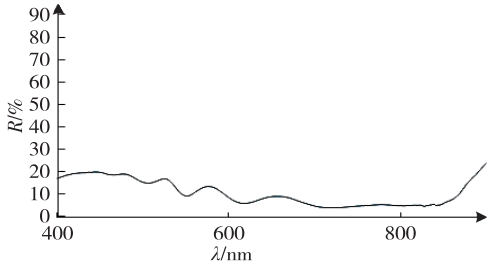


图9　GaAs光电阴极反射系数

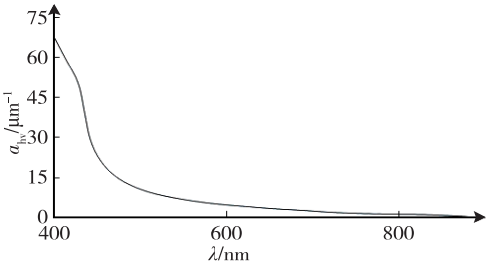


图10　GaAs光电阴极吸收系数

$$Y_T(hv)=\frac{P_0(1+y)(1-R)a_{hv}L_D}{a_{hv}^2L_D^2-1}\times\left\{\frac{a_{hv}D_n+S_v}{\left(\frac{D_n}{L_D}\right)\cosh\left(T_e/L_D\right)+S_v\sinh\left(T_e/L_D\right)}-\right.$$
$$\left.\frac{\exp(-a_{hv}T_e)\left[S_v\cosh\left(T_e/L_D\right)+\left(\frac{D_n}{L_D}\right)\sinh\left(T_e/L_D\right)\right]}{\left(\frac{D_n}{L_D}\right)\cosh\left(T_e/L_D\right)+S_v\sinh\left(T_e/L_D\right)}-a_{hv}L_D\exp(-a_{hv}T_e)\right\}\tag{8}$$

场强引起耗尽层宽度变化，与电压引起的逸出几率P参数具有较强的相关性，基于实验测试数据，可以给出包含场强参数的量子效率公式，即：

$$P=C\cdot P_0\cdot\sqrt{E}\tag{9}$$

式中，P_0为场强$E=3\times10^5$ V/m时电子逸出几率，C为场强相关的常数。如图11所示，当场强小于1.7×10^6 V/m时，C值较高；当场强在该值之上时，C值较小。

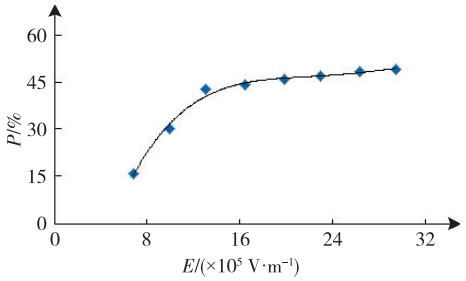


图11　GaAs场强与逸出几率关系

为验证所提公式的准确性，利用公式(8)对研制的10支EBCMOS量子效率随场强的变化进行模拟计算，获得理论量子效率数值，根据量子效率与积分灵敏度关系，可获得理论积分灵敏度。根据图4测试结果，当场强在3×10^5～1.3×10^6 V/m范围内变化时，其积分灵敏度增长率最高。特以在3×10^5 V/m场强下的积分灵敏度作为参考点，计算场强在1.3×10^6 V/m时的积分灵敏度相比3×10^5 V/m时的增长率，将其作为理论计算增长率，详见表1第2列。然后，根据图4测试方法，分别测试10支EBCMOS在3×10^5 V/m和1.3×10^6 V/m场强条件下的积分灵敏度，获得实际积分灵敏度增长率，详见表1第3列数据。根据表1第2、3列数据，即计算理论预测增长率与实际增长率的差值，并利用该差值与理论预测值得比值作为吻合度参数，可得数据吻合度达到91%以上。

表1　模型吻合度计算结果

器件编号	理论计算增长率/%	实际增长率/%	吻合度
EB-1	0.43	0.41	0.95
EB-2	0.40	0.42	0.95
EB-3	0.45	0.42	0.93
EB-4	0.41	0.38	0.93
EB-5	0.43	0.41	0.95
EB-6	0.44	0.40	0.91
EB-7	0.45	0.41	0.91
EB-8	0.45	0.42	0.93
EB-9	0.43	0.45	0.95
EB-10	0.41	0.42	0.98

4　结论

本文通过电场强度在3×10^5～3×10^6 V/m范围内变化的GaAs光电阴极量子效率测量数据，结合已有的GaAs光电阴极量子效率模型和半导体空间电荷层及表面势之间的关系，提出场强增加引起GaAs光电阴极表面耗尽层形成，以及表面能带弯曲减小表面势垒高度是造成GaAs光电阴极积分灵敏度增加的内在原因。通过数值拟合，获得了GaAs光电阴极电子逸出几率随场强的变化关系

式。通过EBCMOS样品实测积分灵敏度与场强关系,验证了拟合方程对GaAs光电阴极发射预测的准确性。该研究成果为新一代高性能数字微光器件应用提供了理论模型支撑。

参考文献:

[1] 闫 磊,石 峰,程宏昌,等. 低能电子轰击引起氧化铝钝化膜BCMOS传感器暗电流变化研究[J]. 红外技术, 2024, 46(3): 342-346.
Yan Lei, Shi Feng, Cheng Hongchang, et al. Dark current of aluminum oxide passivation film BCMOS sensor increased by low energy electron bombardment[J]. Infrared Technology, 2024, 46(3): 342-346.

[2] 刘虎林,王 兴,田进寿,等. 高分辨紫外电子轰击互补金属氧化物半导体器件的实验研究[J]. 物理学报, 2018, 67(1): 175-180.
Liu Hulin, Wang Xing, Tian Jinshou, et al. High resolution electron bombareded complementary metal oxide semiconductor sensor for ultraviolet detection[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(1): 175-180.

[3] 宋 德,石 峰,李 野. 基底均匀掺杂下EBAPS电荷收集效率的模拟研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(2): 56-60.
Song De, Shi Feng, Li Ye. Simulation of charge collection efficiency for EBAPS with uniformly doped substrate [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(2): 56-60.

[4] 刘亚宁,桑 鹏,吕嘉玮,等. 微型低功耗EBAPS相机技术[J]. 红外技术, 2019, 41(9): 810-818.
Liu Yaning, Sang Peng, Lu Jiawei, et al. Miniature low power consumption EBAPS camera technology[J]. Infrared Technology, 2019, 41(9): 810-818.

[5] 徐鹏霄,唐光华,唐家业,等. EBCMOS混合型光电探测器研究[J]. 光电子技术, 2016, 36(4): 232.
Xu Pengxiao, Tang Guanghua, Tang Jiaye, et al. Review of EBCMOS hybrid photodetector[J]. Optoelectronic Technology, 2016, 36(4): 232.

[6] 王生凯,靳 川,乔 凯,等. 热处理对背照式CMOS传感器信噪比影响的实验研究[J]. 红外技术, 2019, 41(6): 585-590.
Wang Shengkai, Jin Chuan, Qiao Kai, et al. Impact of annealing temperature on SNR in backside-illuminated CMOS image sensor: an experimental study[J]. Infrared Technology, 2019, 41(6): 585-590.

[7] 乔 凯,王生凯,程宏昌,等. 表面钝化膜对BCMOS传感器电子敏感特性影响的实验研究[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(4): 0418002.
Qiao Kai, Wang Shengkai, Cheng Hongchang, et al. Experimental study on the electron sensitivity of BCMOS sensor influenced by surface passivation film[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(4): 0418002.

[8] 胡朝龙,刘 磊,钱芸生,等. 一种基于微光夜视系统下光电阴极探测的评价因子[J]. 应用光学, 2023, 44(3): 628-635.
Hu Chaolong, Liu Lei, Qian Yunsheng, et al. Evaluation factor for photocathode detection in low-level-light night vision system[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(3): 628-635.

[9] 吕 行,富容国,常本康,等. 透射式GaAs光电阴极性能提高以及结构优化[J]. 物理学报, 2024, 73(3): 250-256.
Lu Xing, Fu Rongguo, Chang Benkang, et al. Improvement and structure optimization of transmissionmode GaAs photocathode performance[J]. Acta Physica Sinica, 2024, 73(3): 250-256.

[10] Karkare S, Dimitrov D, Schaff W, et al. Monte Carlo charge transport and photoemission from negative electron affinity GaAs photocathodes[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(10): 104904.

[11] Schwede J W, Sarmiento T, Narasimhan V K, et al. Photon-enhanced thermionic emission from heterostructures with low interface recombination[J]. Nature Communications, 2013, 4: 1576.

[12] Karkare S, Boulet L, Cultrera L, et al. Ultrabright and ultrafast III-V semiconductor photocathodes [J]. Physical Review Letters, 2014, 112(9): 097601.

[13] 石 峰,赵 静,程宏昌,等. 透射式蓝延伸GaAs光电阴极的光电发射特性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(2): 297-301.
Shi Feng, Zhao Jing, Cheng Hongchang, et al. Photoemission characteristic of transmission-mode extended blue GaAs photocathodes [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(2): 297-301.

[14] Bell R L. Thermionic emission from 3 - 5 infra-red photocathodes[J]. Solid-State Electronics, 1970, 13(4): 397-402.

作者简介:

闫 磊(1986—),男,陕西省宝鸡市人,博士,正高工,主要研究方向为微光夜视技术;

石 峰(1968—),男,陕西省咸阳市人,博士,研究员,主要研究方向为微光夜视技术。