光电器件

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20260708003

240×240元高帧频EMCCD的倍增增益-温度特性研究

程顺昌*,白雪平,张 雷,李 金,谷顺虎
(重庆光电技术研究所,重庆 400060)

摘 要: EMCCD因其独特的电子倍增机制而成为光子级微弱光信号探测与成像的关键部件,但EMCCD的倍增增益受工作温度的影响较大,退化严重时甚至无法实现极微弱光条件下的探测成像。为了探索器件增益随温度和倍增电压的变化规律并建立增益的标定与校正参考方法,文章采用自研240×240像元规模的高帧频EMCCD器件,通过系统测试和分析该器件在不同温度与倍增电压条件下的增益特性,研究了器件的增益-温度特性关系,拟合出增益经验公式。实验结果表明:基于电离率温度场理论和倍增增益经验模型,利用测试数据拟合得到关键参数B=383.1、C=0.258及β=1.197 5×10^{-8},并建立了该器件的增益-温度-电压经验关系式。该研究可为EMCCD相机的增益标定与矫正提供依据,有助于根据应用场景选取最佳增益倍数,以实现最佳信噪比和成像质量,对自适应光学系统的高速高灵敏波前探测具有重要的应用价值和意义。

关键词: EMCCD; 倍增增益; 温度特性; 增益校正
中图分类号: TN386.5 **文章编号:** 1001－5868(2026)05－0906－06

The Multiplication Gain-Temperature Characteristics of a 240×240-Pixel High-Frame-Rate EMCCD

CHENG Shunchang, BAI Xueping, ZHANG Lei, LI Jin, GU Shunhu
(**Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN**)

Abstract: Electron-multiplying charge-coupled devices (EMCCDs) are critical components for detecting and imaging photon-level ultra-weak light signals owing to their unique electron multiplication mechanism. However, the multiplication gain of an EMCCD is highly susceptible to operating temperatures, and severe gain degradation can even render detection and imaging under extremely low-light conditions infeasible. To investigate the variations in device gain with respect to temperature and multiplication voltage as well as establish a reference method for gain calibration and correction, this study utilizes a self-developed 240×240-pixel high-frame-rate EMCCD. Through systematic testing and analysis of the device's gain characteristics under various temperatures and multiplication voltages, the gain-temperature relationship is investigated, and an empirical gain formula is subsequently fitted. Experimental results demonstrate that, based on the temperature-dependent impact ionization rate theory (ionization rate temperature field theory) and an empirical multiplication gain model, the fitting of experimental data yields key parameters: B=383.1, C=0.258, and β=1.197 5×10^{-8}. Consequently, an empirical gain-temperature voltage relationship for this device is established. This study provides a basis for the gain calibration and correction of EMCCD cameras,

收稿日期:2026－07－15.
* **通信作者:**程顺昌

facilitating the selection of the optimal multiplication gain factor tailored to specific application scenarios to achieve the best possible signal-to-noise ratio and image quality. This study holds practical implications for high-speed, high-sensitivity wavefront detection in adaptive optics systems.

Key words: EMCCD; multiplication gain; temperature characteristics; gain correction

0　引言

波前传感器是自适应光学系统的核心部件，主要负责实时测量入射光束的波前相位畸变。该技术最初应用于天文观测，以校正大气湍流及光学系统缺陷等引起的波前畸变，获得接近衍射极限的清晰图像。由于大气湍流变换迅速且目标信号微弱，波前传感器需同时满足高速响应与高灵敏度探测的要求。EMCCD 通过在传统 CCD 的读出寄存器前增设倍增寄存器，可在信号读出前将其放大数千倍，使有效读出噪声降至 1 个电子以下，这种片上增益技术实现了光子级探测，因此 EMCCD 作为波前传感器，可契合自适应光学系统对高速、高灵敏探测的需求。240×240 元高帧频 EMCCD 为自适应光学应用研制的一款高速高灵敏探测器，帧频大于 2 000 Hz，器件工作在增益模式时，可将微弱光信号提升至读出噪声之上，实现光子级成像，使得原本无法提取的目标变得清晰可辨。半导体器件工作时的热噪声是影响 EMCCD 弱光探测的主要因素，Andor，Hamamatsu 等 EMCCD 相机主流厂商采用半导体制冷方案使得器件工作在低温环境下，以降低暗电流等热噪声对弱光信号的影响。当高帧频 EMCCD 被制冷到－45℃时，在 2 000 Hz 帧频下的暗电流达到 0.01e^-/pixel/s 以下，倍增模式下等效读出噪声低于 1 个电子[1-2]，在极弱光条件下仍能获得高质量波前数据。

EMCCD 基于碰撞电离原理实现信号电子倍增放大，依据电离率温度场理论，温度越低，碰撞电离率和载流子迁移率越高，倍增增益也就越高[3-5]。制冷不仅可以降低暗电流，也影响倍增增益。E2V 和 Onsemi 公司的 EMCCD 数据手册建立了不同温度下增益曲线[6-7]。国内南京理工大学何伟基课题组深入研究了 EMCCD 倍增机理和倍增增益特性[8-11]，昆明理工大学李彬华研究团队建立了低温下 EMCCD 低温电子倍增模型，模型计算结果能够很好地拟合 0℃，－15℃，－25℃下实际倍增曲线[12]。针对高分辨率应用场景，李金等研究了 1 920×1 080 像元、400 万像素的高灵敏度低弥散 CCD[13-14]。

本文基于自研的 240×240 元高帧频 EMCCD 器件，研究了制冷温度对增益、倍增电压的影响，拟合了增益经验公式，实现了 EMCCD 在工作温度范围内的增益量化，可用于 EMCCD 相机增益标定和校正。用户可根据应用场景选择合适的增益倍数，避免因增益过高或过低而影响成像质量，以实现最佳信噪比和成像质量，对自适应光学系统的高速高灵敏波前探测具有重要的应用意义。

1　架构概述与制冷方案

1.1　高帧频 EMCCD 架构

240×240 元高帧频 EMCCD 器件的架构示意图如图 1 所示。为实现 2 000 Hz 以上的帧频，采用分裂帧转移结构，光敏区有效像元数 240(H)×240(V)，分为上下对称的两部分，每部分包含 240(H)×120(V)像元，上半部分信号向上转移，下半部分信号向下转移，分别存储在 8 个存储子区里。每个存储子区分别为 60(H)×122(V)像元，各子存储区信号独立读出，并对应独立水平移位寄存器、倍增寄存器和读出放大器。

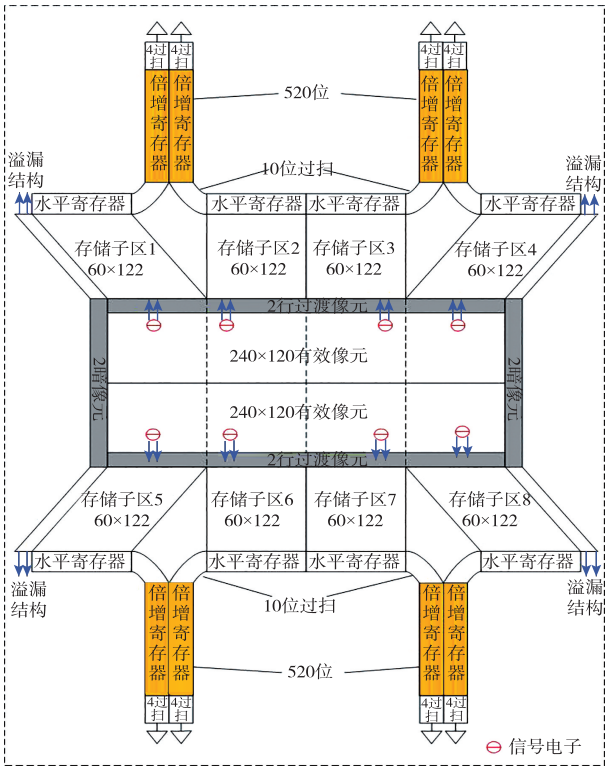


图 1　240×240 元高帧频 EMCCD 架构示意图

器件的像元尺寸为24 μm×24 μm，采用两相多相钉扎（MPP）模式。水平移位寄存器为60位，采用三相转移（Rφ1，Rφ2，Rφ3）。倍增寄存器为520位，倍增寄存器和水平寄存器之间设有10位过扫单元，倍增寄存器和放大器之间设有4位过扫单元。为保证帧频和行转移位数一致，每行实际读出66位。

该EMCCD采用标准CCD工艺制造，包括埋沟、四次多晶硅和两次金属化工艺，所研制的240×240元高帧频EMCCD芯片大小如图2所示，尺寸为8 999 μm×34 315 μm，共98压点，芯片整体结构和压点排布呈上下对称。

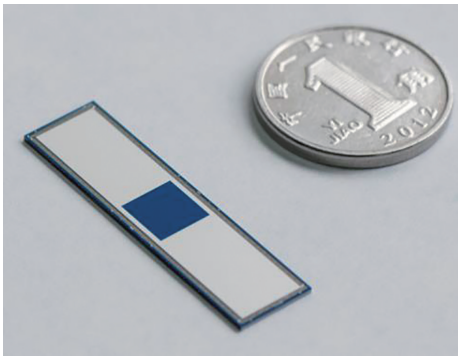


图2 240×240元高帧频EMCCD芯片

1.2 制冷方案

该EMCCD器件采用半导体制冷器（TEC）进行制冷，封装采用金属-陶瓷混合管壳、三级半导体制冷器及真空封装。金属-陶瓷混合管壳如图3所示，其内部结构如图4所示，整个封装结构包括EMCCD芯片、金属陶瓷混合管壳、半导体制冷器、陶瓷载体、吸气剂、温度传感器、真空抽头。金属陶瓷混合管壳、半导体制冷器和真空封装结构用来最大化地提高制冷作用，温度传感器实时监控芯片温度以实现控温，吸气剂保障产品腔体内部真空度持续满足要求，陶瓷载体对芯片压点进行再分布以降低引线互连长度。

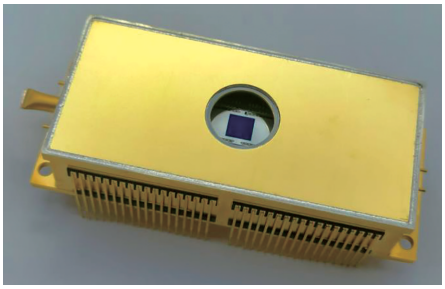


图3 240×240元高帧频EMCCD制冷管壳

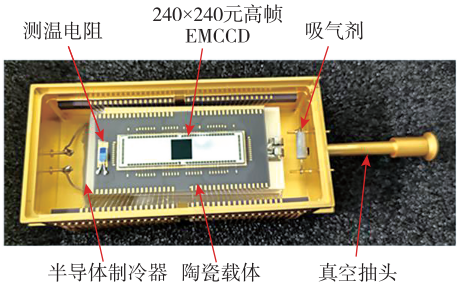
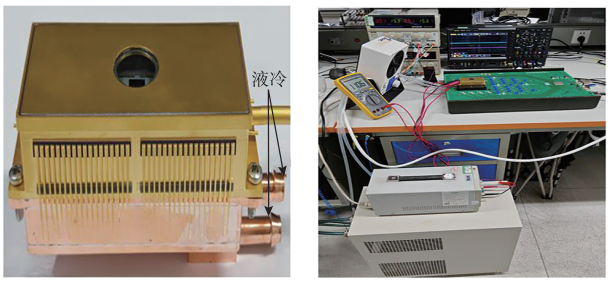


图4 真空制冷管壳内部结构

封装后的EMCCD器件安装在水冷散热器上进行低温下的参数测试。水冷控温以及参数测试系统如图5所示，当水冷机温度设置为10℃时，半导体制冷器电源电流为2.6 A，电压为6.5 V，芯片端制冷温度达到−45℃。典型制冷温度对应供电以及水冷机温度设置如表1所示。



（a）水冷控温系统 （b）参数测试系统

图5 水冷控温以及参数测试系统

表1 芯片制冷温度

水冷温度/℃	半导体制冷器供电	芯片端制冷温度/℃
10	1.5 A，3.8 V	−15
	1.9 A，4.6 V	−30
	2.6 A，6.5 V	−45
	3.4 A，8.5 V	−60

2 倍增增益温度特性测试与分析

2.1 倍增增益理论分析

碰撞电离是一个复杂的物理过程，电离率的计算涉及能带形状及其结构、散射机制、电场强弱及其分布、晶体缺陷密度、基体材料晶向、掺杂浓度及其分布、工作温度等诸多因素[15]。受晶格散射作用的影响，EMCCD器件温度越低，载流子的平均自由程就越大，碰撞电离率越高，倍增增益越大。同时，电场越小，载流子碰撞电离率的温度敏感性越显著[16]。

依据Ershov和Ryzhii的电离率温度场理论，温度降低会增强电离率对场强变化的敏感性[17]。典

型倍增增益公式为[18-19]：

$$g=1+M\approx 1+\beta(B-T)\exp(CV) \quad (1)$$

式中，g 为单级倍增增益；T 为温度；V 为倍增电势差；β 为时间有关的函数，代表由栅介质充电引起的增益退化；B，C 为经验值。从式(1)中可看出，单级倍增增益和温度成线性关系。一般 EMCCD 芯片出厂前会先做增益强化实验，使器件经历短期快速退化，进入长期慢退化阶段。在长期慢速退化阶段，增益相对稳定，因此将 β 认定为常数。总倍增增益 G 与其对数形式如下式(2)和式(3)所示。从式(3)可以看出，总倍增增益取对数后，与温度成线性关系。

$$G=g^n\approx e^{n\beta(B-T)e^{CV}} \quad (2)$$

$$\ln G\approx n\beta(B-T)e^{CV} \quad (3)$$

2.2　实验及测试

如图 6 所示，本文测试了不同温度下的倍增增益曲线，表 2 列出了不同温度下实现 300 倍和 1 000 倍倍增增益所需倍增电压。在 22℃下实现 1 000 倍增益需要倍增电压达到 36.083 V，而在－60℃下实现 1 000 倍增益仅需要倍增电压 33.967 V，差值为 2.116 V。类似地，22℃下实现 300 倍增益需要倍增电压 35.366 V，在－60℃下所需电压 33.309 V，相差 2.057 V。这表明，在同样的倍增增益下，温度越低，需要的倍增电压越低。

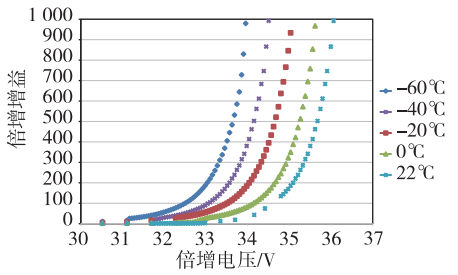
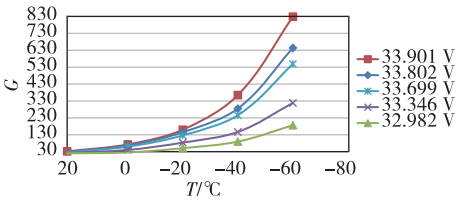


图 6　不同温度下增益曲线

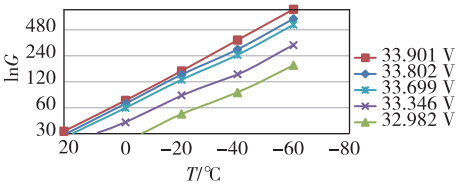
表 2　温度对倍增电压的影响

增益倍数	倍增电压/V	芯片端制冷温度/℃
300	35.366	22
	34.931	0
	34.329	−20
	33.849	−40
	33.309	−60
1 000	36.083	22
	35.637	0
	35.082	−20
	34.513	−40
	33.967	−60

不同倍增电压下增益的温度特性如图 7 所示。图 7 显示了增益原值和增益对数值，在 33.802 V 和 33.901 V 倍增电压下，对数值基本与温度成线性关系，与公式(2)和(3)吻合。图中 32.982 V，33.346 V，33.699 V 倍增电压下，前两个数据点同样表现出较好的线性度。倍增电压设为 34.416 V，常温下增益只有 74 倍，－40℃下增益却达到了 756 倍，－40℃下增益是常温的 10.2 倍，提升了一个数量级。可以看出温度降低，增益对电场的敏感度增加。



(a) 增益原值的温度特性



(b) 增益对数值的温度特性

图 7　增益温度特性

2.3　结果分析与计算

依据公式(3)，结合不同温度下的增益测试结果，经验值 B 的计算式为：

$$B=\frac{T_1\ln G_{T2}-T_2\ln G_{T1}}{\ln G_{T2}-\ln G_{T1}} \quad (4)$$

式中，T_1，T_2 为固定倍增电压下增益测试温度；G_{T1}，G_{T2} 为温度 T_1，T_2 下倍增增益。依据图 7 测试数据和式(4)，计算出 B 值如下表 3 所示，不同倍增电压计算结果趋向一致，如图 8 所示，均值为 383.1。

表 3　不同倍增电压下 *B* 值计算结果

倍增电压/V	B
32.982	384.5
33.346	383.7
33.699	382.9
33.802	382.1
33.901	382.5

依据公式(3)，结合不同倍增电压下的增益测试结果，经验值 C 可由式(5)计算：

$$C=\frac{\ln(\ln G_{V1}/\ln G_{V2})}{V_1-V_2} \quad (5)$$

式中，V_1，V_2 为固定温度下不同的倍增电压；G_{V1}，

G_{V2}为不同倍增电压V_1,V_2下的倍增增益。依据图6测试数据和式(5),计算出C值如表4所示,不同温度计算结果趋向一致,如图9所示,均值为0.258。

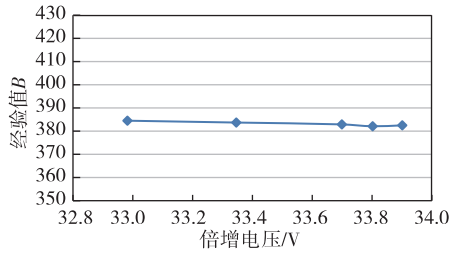


图8 不同倍增电压下B值计算结果

表4 不同温度下C值计算结果

温度/℃	C
22	0.256
0	0.247
−20	0.259
−40	0.261
−60	0.266

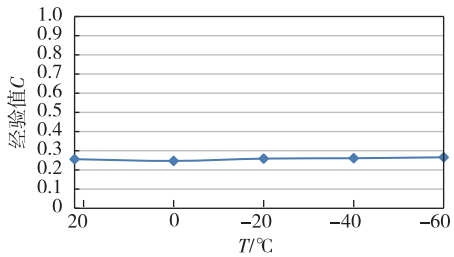


图9 不同制冷温度下C值计算结果

将得到的B,C代入公式(3),结合增益测试数据,计算得到β值如表5所示,利用增益的温度数据和倍增电压数据得到的结果接近,故β取均值$1.197\,5\times10^{-8}$。

表5 β计算结果

温度/℃	β	倍增电压/V	β
22	1.191×10^{-8}	32.982	1.208×10^{-8}
0	1.203×10^{-8}	33.346	1.193×10^{-8}
−20	1.189×10^{-8}	33.699	1.206×10^{-8}
−40	1.197×10^{-8}	33.802	1.185×10^{-8}
−60	1.205×10^{-8}	33.901	1.194×10^{-8}
均值	1.197×10^{-8}	均值	1.198×10^{-8}

将B,C,β值代入公式(3),得到计算后增益经验值公式为:

$$G=e^{\eta\beta(B-T)e^{CV}}=e^{6.228e-6(383.1-T)e^{0.258V}} \quad (6)$$

3 结论

面向自适应光学系统对高速高灵敏波前探测的需求,本文基于自研240×240像元高帧频EMCCD器件,针对倍增增益对工作温度较为敏感的问题,以及为了探索器件增益随温度和倍增电压的变化规律,系统测试和分析了该器件在不同温度与倍增电压条件下的增益特性,研究了器件的增益-温度特性关系,并拟合出增益经验公式。实验结果表明,倍增增益设置过高对信噪比和图像质量的改善并不显著,反而可能加速增益退化、缩短器件寿命;增益设置过低则信号放大不足,无法达到最佳信噪比与成像质量。基于电离率温度场理论和增益经验模型,利用测试数据拟合得到关键参数$B=383.1$,$C=0.258$及$\beta=1.197\,5\times10^{-8}$,从而建立了该器件的增益-温度-电压经验关系式。本文开展的增益温度特性研究及所推导的经验公式,有助于用户根据应用场景选取最佳增益倍数,以实现最佳信噪比和成像质量,对自适应光学系统的高速高灵敏波前探测具有重要的应用价值。

参考文献:

[1] Robbins M S, Hadwen B J. The noise performance of electron multiplying charge-coupled devices[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2003, 50(5): 1227-1232.

[2] E2V technologies. Low-light technical note 2: The use of multiplication gain in L3Vision™ electron multiplying CCD sensors [R/OL]. (2003) [2026-08-31]. https://www.teledyne-e2v.com/en-us.

[3] 张灿林. 电子倍增CCD的倍增机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
Zhang Canlin. Research on the multiplication mechanism of EMCCD [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.

[4] Robbins V M, Wang T, Brennan K F, et al. Electron and hole impact ionization coefficients in (100) and in (111) Si [J]. Journal of Applied Physics, 1985, 58(12): 4614-4617.

[5] Gnani E, Reggiani S, Rudan M, et al. Extraction method for the impact-ionization multiplication factor in silicon at large operating temperatures [C]//32nd European Solid-State Device Research Conference, 2002: 227-230.

[6] Teledyne Technologies. CCD220 back illuminated L3Vision™ sensor-electron multiplying adaptive optics CCD [EB/OL]. (2024)[2026-07-08]. https://www.teledyne.com/en-us.

[7] ON Semiconductor. KAE-08152: 2 856 (H) × 2 856 (V) interline transfer EMCCD image sensor [DS/OL]. (2018) [2026-07-08]. http://www.onsemi.com.

[8] 何伟基,陈 钱,屈惠明,等. 电子倍增CCD的电荷倍增特性研究[J]. 光学学报, 2008, 28(6):1161-1166.
He Weiji, Chen Qian, Qu Huiming, et al. Charge multiplication of CCD based on electrons multiplication [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(6):1161-1166.

[9] 张灿林,陈　钱. 电子倍增CCD电荷转移机制及其倍增结构的研究[C]//2009年江苏省“光科学与技术”博士生学术论坛暨长三角光子科技论坛论文集,2009:114-119.
Zhang Canlin, Chen Qian. Research on the transfer mechanism and the structure of EMCCD[C]// Proceedings of the 2009 Jiangsu Provincial Doctoral Academic Forum on "Optical Science and Technology" & Yangtze River Delta Photonics Science and Technology Forum, 2009: 114-119.

[10] 张灿林,陈　钱,尹丽菊. 电子倍增CCD倍增要件研究[J]. 光子学报,2009,38(11):2771-2275.
Zhang Canlin, Chen Qian, Yin Liju. Research on Multiplication Unit of Electron Multiplying CCD[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(11): 2771-2775.

[11] 张灿林,陈　钱,尹丽菊. 基于单一类型载流子的电子倍增CCD倍增模型[J]. 兵工学报,2011,32(11):580-583.
Zhang Canlin, Chen Qian, Yin Liju. Multiplication model of electron multiplying CCD based on single type of carrier[J]. Acta Armamentarii,2011,32(11):580-583.

[12] 胡　泊,李彬华. 低温下EMCCD电子倍增模型[J]. 电子学报,2013,41(9):1826-1830.
Hu Po, Li Binhua. Electron multiplication model of EMCCD in low temperature[J]. Acta Electronica Sinica,2013,41(9): 1826-1830.

[13] 李　金,杨　洪,孙　晨,等. 1920×1080元高灵敏行间转移CCD图像传感器[J]. 半导体光电, 2025, 46(1): 10-15.
Li Jin, Yang Hong, Sun Chen, et al. A 1920 × 1080 interline transfer CCD image sensor with high output sensitivity[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2025, 46(1): 10-15.

[14] 程顺昌,杨　洪,白雪平,等. 400万像素低弥散内线转移CCD图像传感器[J]. 半导体光电, 2025, 46(1): 23-28.
Cheng Shunchang, Yang Hong, Bai Xueping, et al. High-resolution interline transfer CCD image sensor with low smear[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2025, 46(1): 23-28.

[15] Maes W, De Meyer K, Van Overstraeten R. Impact ionization in silicon: a review and update[J]. Solid-State Electronics, 1990, 33(6): 705-718.

[16] Grant W N. Electron and hole ionization rates in epitaxial silicon at high electric fields[J]. Solid-State Electronics, 1973, 16(10): 1189-1203.

[17] Ershov M, Ryzhii V. Temperature dependence of the electron impact ionization coefficient in silicon[J]. Semiconductor Science and Technology, 1995, 10(2): 138-142.

[18] Seitz P, Theuwissen A. Single Photon Imaging[M]. Berlin: Springer, 2011.

[19] Robbins M S. Determining the multiplication of EMCCD sensor. US Patent 8, 054, 363[P]. 2011-11-8

作者简介：

程顺昌(1983—),男,高级工程师,主要从事光电子器件相关研究。