动态综述

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20260108002

EMCCD增益衰减机理及解决方案的研究进展

纳 旺[1],白雪平[2],徐 浩[1,3*]

(1. 电子科技大学 物理学院,成都 611731; 2. 中国电子科技集团第四十四研究所,重庆 400060;
3. 电子科技大学 长三角研究院(湖州),浙江 湖州 313001)

摘 要: 电子倍增电荷耦合器件(EMCCD)因其高灵敏度、片上增益与动态成像等特点,已成为天文观测、生物医学和微光探测等领域的核心器件。通过在传统CCD器件中引入电子倍增寄存器,EMCCD实现了较高的信号增益。然而,随着运行时长的累积,其增益会出现持续衰减,严重影响器件长期稳定性和可靠性。研究结果表明,增益衰减主要源于电子倍增过程中界面空穴积累、热载流子注入栅介质等物理效应。文章系统综述了近年来EMCCD增益衰减机理研究进展,重点阐述了界面效应与热载流子作用机制,并总结了当前通过改进介质层材料与优化栅极结构来抑制增益衰减的技术途径,以期为提升EMCCD器件性能与可靠性提供参考。

关键词: 电子倍增电荷耦合器件; 高灵敏度; 增益衰减; 界面效应; 热载流子

中图分类号: TP212 **文章编号:** 1001－5868(2026)02－0276－08

Research Progress on the Gain-Attenuation Mechanism of Electron-Multiplying Charge-Coupled Devices and Its Solutions

NA Wang[1], BAI Xueping[2], XU Hao[1,3]

(1. School of Physics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, CHN;
2. China Electronics Technology Group 44th Research Institute, Chongqing 400060, CHN; 3. Yangtze Delta Region Institute (Huzhou), University of Electronic Science and Technology of China, Huzhou 313001, CHN)

Abstract: Electron-multiplying charge-coupled devices (EMCCDs) have become core components in the fields of astronomical observation, biomedicine, and low light-level detection owing to their high sensitivity, on-chip gain, and dynamic imaging abilities. By introducing an electron-multiplier register into a traditional CCD device, the resulting EMCCD achieves a high signal gain. However, long-term operation results in continuous gain reduction, which severely affects the long-term stability and reliability of the device. Recent studies have shown that this gain decay is primarily caused by the physical effects arising from interface hole accumulation and hot-carrier injection into the gate medium during electron multiplication. This review summarizes the research progress on EMCCD gain-decay mechanisms in recent years, focusing on the interface effect and hot-carrier mechanisms. Notably, it also summarizes the current technical methods used to suppress gain decay by improving dielectric layer materials and optimizing grid structures to provide a reference for improving the performance and reliability of EMCCDs.

Key words: electron-multiplying charge-coupled device; high sensitivity; gain aging; interface effect; hot carriers

收稿日期:2025－10－29.

基金项目:国家自然科学基金项目(62004025);湖州市公益性应用研究项目(2024GZ52).

*通信作者:徐 浩

0　引言

电荷耦合器件(CCD)凭借其出色的图像均匀性、高全局快门效率、低噪声及长寿命等特点,在天文学、生物医学、国防科技等专业领域占据重要地位。与广泛应用于消费级电子等规模化普及领域的互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感器相比,CCD在微弱光信号探测方面展现出了独特优势。为进一步提升探测灵敏度与速度,电子倍增电荷耦合器件(EMCCD)在传统CCD结构基础上增加了电子倍增寄存器,实现了信号的片上雪崩放大,使其成为微光与快速动态成像领域的核心技术之一[1]。

1983年,美国德州仪器公司的Madan等首次发现CCD在电荷转移过程中出现碰撞电离,即当转移栅极电压增大时,电荷信号也被放大的现象[1]。在20世纪初,德州仪器公司的Hynecek在CCD器件中实现全固态的雪崩增益结构,之后该公司发布了Impactron-CCD系列的EMCCD器件[2]。随后,英国的E2V公司也发布同属全固态微光成像器件的L3系列EMCCD产品[3]。针对EMCCD器件的研发,美国德州仪器、英国E2V等国外公司主要聚焦于需要大动态范围探测成像的微光场景,例如分子探测、活体细胞萤光显示、自适应光学及天文探测等。得益于EMCCD技术的逐步成熟,美国普林斯顿仪器、英国安道尔、日本滨松等公司都相继开发出应用于快速成像、光谱成像的科学级相机[4]。

尽管受国外技术封锁的影响,国内在EMCCD器件的设计、制造及关键工艺方面起步较晚,但近年来在中国电子科技集团公司第四十四研究所(中电科四十四所)、北京空间机电研究所、中国科学院光电技术研究所等多所科研院的努力下,国内已在该研究领域取得显著进展。例如,中电科四十四所采用埋沟、三层多晶硅、两次金属工艺,成功研制出了倍增增益可达1 000倍以上的正照EMCCD器件;昆明理工大学基于Camera Link开发了EMCCD相机的单帧采集、连续采集、视频采集等图像采集技术等[5,7]。然而上述研究主要聚焦于EMCCD成像控制策略、图像采集与高速传输架构、噪声特性建模、成像系统仿真及性能评估方法等方面[5-8],对EMCCD器件在长期运行过程中出现的增益衰减这一关键可靠性问题的研究尚不充分。

EMCCD是一种全固态微光器件,没有真空器件的局限性,因此基于EMCCD的成像系统具有相对较低的读出噪声和较高探测灵敏度[9-11]。国内外的研究机构对EMCCD的操控、辐射硬度和对空间仪器的适用性也进行了深入研究[12-17]。增益是EMCCD的关键参数之一,其衰减表现为器件在工作时间增加过程中,维持相同增益所需电压不断漂移或增益值本身持续下降,该现象严重制约EMCCD在长期观测等场景下的稳定性和实用性。

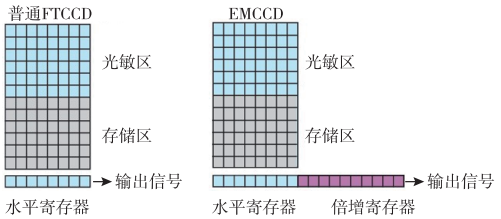
本文围绕EMCCD增益衰减的主要机理和优化方案。首先,综述E2V电子成像中心、安森美半导体公司等机构对于EMCCD增益衰减的机理探究和解决增益衰减的方案;其次,阐述增益衰减的主要原因;最后,对当前解决增益下降的主要技术方案进行总结,并对可能的研究方向予以展望。

1　EMCCD增益衰减原因

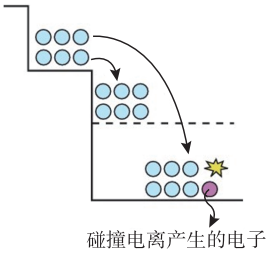
1.1　器件结构和工作原理

图1(a)展示了EMCCD的四个主要结构:成像探测区域、存储单元、输出寄存器和倍增寄存器[18]。EMCCD基本结构与普通帧传输CCD类似,在探测区识别到的累积电荷被迅速转移到存储区,然后将累积电荷逐行转移到水平串行寄存器中读出。在EMCCD器件中,一个乘法(电荷倍增)寄存器内置于水平串行寄存器,通过向每个水平转移电极提供比正常工作更高的电压,可以实现信号倍增。

图1(b)展示了电荷倍增寄存器中信号倍增的原理。在倍增寄存器中,高压电场使得电子不断加速提升动能从而成为热载流子。在直流相转移到倍增高压相的过程中,热载流子有一定概率与其他电荷直接碰撞。当能量累积到足以引发碰撞电离时,被撞电荷中的电子就能脱离出来,随即在电场作用下加速成为热载流子。实际上,撞击电离事件发生的概率较小,每个阶段约为1.0%～1.6%。但是,由于增益寄存器中有400～600级,即使撞击电离事件发生概率较小,也会有相当可观的电荷量通过增益寄存器[11]。



(a) EMCCD与普通帧转移CCD的区别



（b）电子倍增原理

图1 EMCCD结构与倍增原理

1.2 EMCCD增益衰减过程

E2V电子成像中心的研究表明[19-20]，EMCCD的最大增益会随着使用时间快速下降，而增益衰减的过程可以分为两个阶段：(1)在运行的前24小时之内，最大增益会大幅度下降；(2)在此后的整个运行周期内，增益的下降速度会逐渐变慢。图2展示了维持某款CCD65器件保持1 000倍增益所需的电压偏移。从图中可以看出，在器件最初的运行阶段，保持1 000倍恒定增益的电压偏移由较低数值在较短时间内飙升到2.5 V左右；随后，维持1 000倍恒定增益所需的电压偏移随着运行时间的增长缓慢增加，在20 000个小时的运行时间里只增加了不到2 V。器件测试得到的电压偏移规律体现了增益衰减的两个过程[20]。因此，EMCCD制造厂商德州仪器、E2V等公司通常会调整设备的初始阶段，以便向用户提供性能更稳定的产品。然而，此类解决方案本质上属于系统级或电路级的后补偿策略，并未从物理或工艺制造层面上去解决EMCCD增益衰减问题。

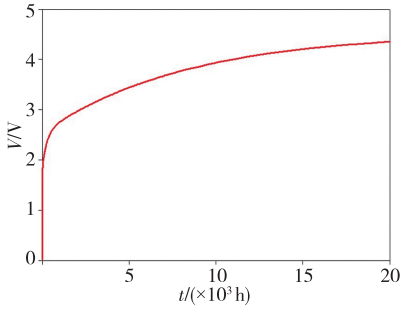


图2 在CCD65器件上保持1 000倍恒定增益所需电压偏移

中电科四十四所的李钦等通过搭建增益衰减试验及分析评价测试系统[21]，探究工作电压、温度和频率等参数对EMCCD器件增益衰减速率的影响，并基于国产1 024×1 024 EMCCD开展增益衰减试验，使其快速进入倍增增益稳定期。其中，一组实验是先将芯片制冷到－20℃，调节器件A的倍增电压使倍增倍数达到200倍，每小时记录其倍增倍数的变化值，结果如图3所示。测试阶段前8小时倍增倍数的衰减速度相对较快，并在约100小时后稳定在40倍左右。另一组对照实验，同样先将芯片制冷到－20℃，调节器件B的倍增电压使倍增倍数达到900倍，每小时记录其倍增倍数的变化值，结果如图4所示。类似地，测试期间前8小时倍增倍数的衰减速度相对较快，大约100小时后稳定在200倍左右。这一增益衰减测试研究模拟了EMCCD在实际使用场景的器件参数要求，明确了在同一工作温度（－20℃）、不同的起始倍增倍数下，器件的倍增倍数的衰减变化趋势，对器件的衰减稳定性进行了量化评估。

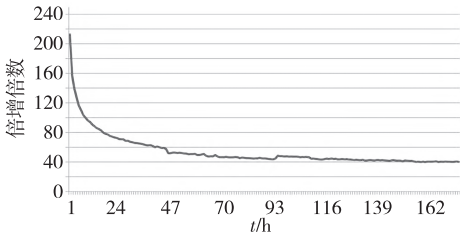


图3 器件A初次倍增稳定性测试（－20℃）

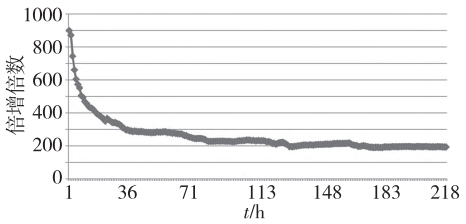


图4 器件B初次倍增稳定性测试（－20℃）

为进一步定量分析EMCCD器件在运行过程中的增益变化，E2V公司的Evagora等采用自动化测试设备设计了以下实验[20]。图5为其搭建的自动化测试设备（ATE）流程。首先设计了两组对照实验，以确定相对最佳的信号脉冲时长。第一组实验在室温下进行测试，使用图像区域暗电流作为输入信号。试验过程中拍摄了一系列对照帧，其中器件1具有单位增益，器件2具有特定的雪崩电位。通过ATE得出具体增益后，先减去读出系统提供的偏移量，然后取两帧的比率。第二组实验在－100℃温度下开展，此条件下几乎没有可测量的暗信号，因此LED被用作信号源。单位增益的背景电平在这些温度下不会出现波动，因此在每次增益测量之前不需要拍摄背景图像，从而实现了更快的数据采集。这两幅图像减去了读出偏移量，并得到两帧的比率。上述两组对照实验的结果表明最合适的信号脉冲长度为2 ms。此脉冲条件为单位增益的测量提供了足够多的信号，但又不会使ADC在最大增益时饱和，从而有效避免了提

前引起器件最大增益值的骤降。

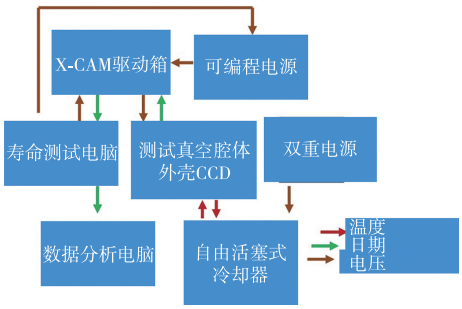


图 5　EMCCD 自动化测试设备寿命测试流程

在此基础上，器件增益随时间变化的测试结果如图 6 所示：两个 EMCCD 器件的运行时长均超过 25 h，且在工作过程中有效规避了初始阶段的增益数值骤降，并随着时间推移逐渐减小。图 7 中的红线表示器件 2 的增益随时间和电压的变化规律：通过逐步增大电压能够有效调控原本随时间变化而逐渐减小的增益值，进而使其逐步增大；但是在相同工作电压下的增益值横线依旧会表现出随时间下降的趋势，尤其是在 39.5 V 以后。随后，研究者进行了第二轮实验，将同一器件在完全相同的时间和电压条件下再运行一次增益数值测试。结果显示，尽管增大电压依旧能够调控增益大小，但是不同电压下的器件增益较上一次测试均出现不同比例的下降，如图 7 中黑线所示，而 39 V 之后增益值横线的下降趋势却较上一轮更弱。综上，尽管增大电压能够提升器件增益，但增益随时间和运行次数衰减的老化行为依旧存在。

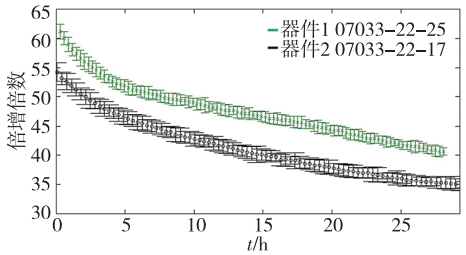


图 6　在 38 V 雪崩电位下，第一组实验的 CCD97s 在室温下的增益衰减过程

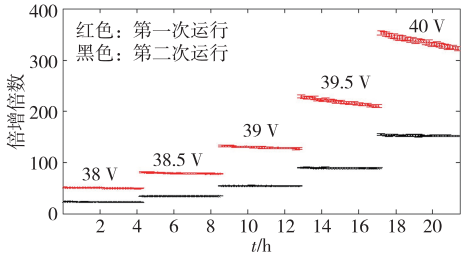


图 7　操作电位增加到高压相，观察 CCD97 增益的衰减过程

1.3　器件界面处空穴积累

为探究物理机制层面的原因，E2V 公司的 Mayer 等开展的仿真研究结果表明空穴可能被束缚在 *ΦDC* 界面处，从而引起增益衰减。图 8 展示了受束缚的空穴积累如何影响器件的增益[20,22]。验证上述仿真猜想的实验设计如下：利用一个首次通电的乘法寄存器进行内积分暗信号；除 *ΦDC* 外，所有相位都保持低电平，这确保了所有的信号都存储在 *ΦDC* 阱中。为避免任何额外的电荷干扰，该器件还集成了复位 MOSFET。*ΦDC* 的电位阱能够在 10 s 左右内充满，一旦充满，复位 MOSFET 就会将电子倍增寄存器内部电荷清零一次，从而将器件返回到初始工作条件，然后在单位增益条件下以常规方式读出。最后，由 ATE 在不同的电压和时间条件下测量增益衰减器件的指标参数，并在每个间隔重新测量 *ΦDC* 电位阱势能。如果之前的模拟猜想是正确的，则 *ΦDC* 的阱容量（势能）应该会增加，因为空穴的积累有助于电极的正偏置。图 9 展示了 EMCCD 的增益随着时间的衰减，雪崩寄存器的每个 *ΦDC* 集成信号的变化平均值。可以看出，随着器件的运行，每个 *ΦDC* 的电位阱容量都有所增加，从而验证了仿真结论。

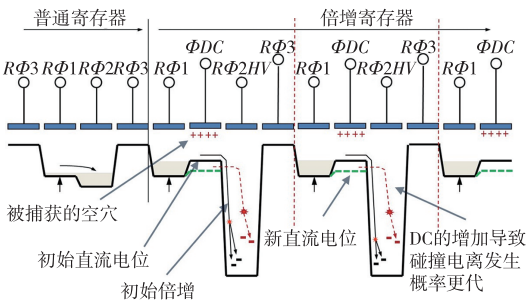


图 8　*ΦDC* 下空穴积累引起增益下降的示意图

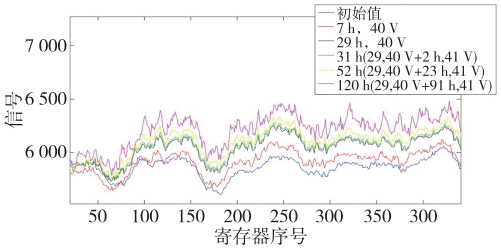


图 9　雪崩寄存器中每个 *ΦDC* 集成的测量信号的变化平均值

图 10 展示了四个不同寄存器在增益衰减过程中不同阶段处 *ΦDC* 的信号电平图。测试结果表明，当寄存器结束工作时，*ΦDC* 的容量比开始时更大，这表明增益衰减效应随着工作时长增大变得更

明显。根据已有的实验结果,发现在器件运行过程中电子倍增寄存器的末端存储和传输的信号也比开始更大,因此可以得出较大的信号会导致增益衰减加速这一结论。以上实验结果表明,随着EMCCD器件运行时间的增加,电子倍增寄存器的增益衰减并非均匀,且随着ΦDC的容量增加而增加。尽管这些实验现象能够初步验证Mayer等的仿真结论,但仍需要做进一步验证工作。

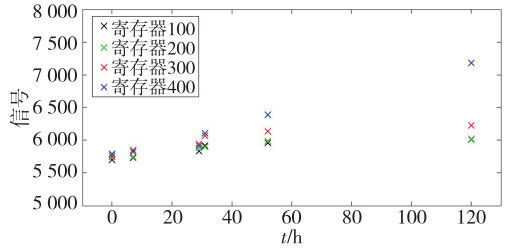


图10 四个不同的寄存器单元在ΦDC处测量的信号

1.4 热载流子注入栅极电介质

另一方面,安森美半导体的Stevens等认为EMCCD的增益衰减根本原因是:在器件正常运行过程中,随着时间的推移,热载流子被注入栅极电介质,其机理如图11所示[22]。他们认为在EMCCD器件运行的整个过程当中,通过的信号电子越多,注入栅极电介质的热载流子就越多,并引起栅极附近区域电场分布变化,从而导致增益衰减。

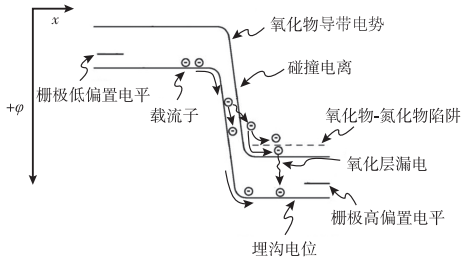


图11 沿EMCCD的界面处能带结构示意图

英国开放大学Bush等在不增加电场强度的前提条件下,开展了EMCCD增益寄存器元件内电荷转移的仿真工作。结果表明,在电荷输运过程中确实有一小部分信号电荷可能会被束缚在有源区半导体与SiO_2绝缘层界面处,这可能会降低电子输运效率,从而降低EMCCD的增益[21]。

近年来,界面物理的研究表明硅及其氧化物之间的原子失配意味着两种材料之间的界面含有晶格缺陷,这些缺陷可以作为电荷载流子的捕获中心。在传统的CCD工艺技术中,通过设计包含隐藏通道结构的器件来避免这些缺陷点位,能够使信号电荷在输运过程中有效避开缺陷态。然而,EMCCD增益寄存器内电荷输运的路径依然可能会遇到缺陷态。为研究缺陷的存在是否会对倍增寄存器的电荷转移效率产生影响,Bush等在不同的ΦHV电压下开展电荷转移实验,并测量了被困在束缚态点位的信号电荷量。EMCCD通常在工作期间冷却(这将影响捕获中心的行为,从而影响捕获电荷的总量),因此电荷转移测试需要在不同的工作温度下进行。如图12所示,经过单次电荷转移后,在界面处可以看到两个不同的电荷捕获区域。

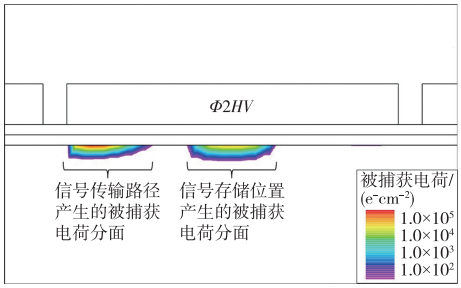
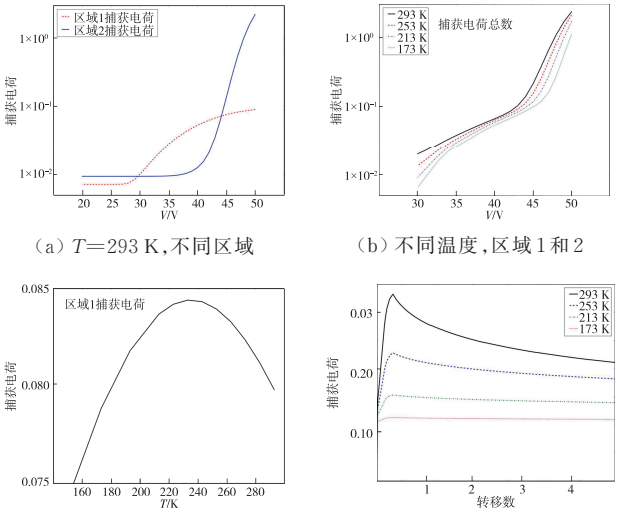


图12 $\Phi 2HV$=40 V转移后捕获电荷示意图

由图12可知,在ΦDC和$\Phi 2HV$相之间存在一个小区域,该处的电荷在转移过程中由于与界面接触而被捕获,标记为区域1;在$\Phi 2HV$相之下,由于ΦHV的电荷存储位置靠近界面而产生另一个被捕获电荷的区域,标记为区域2。图13(a)显示了当温度为293 K时,不同$\Phi 2HV$电压在两个区域内测量电荷的结果。当$\Phi 2HV \geqslant 46$ V时,区域1中的捕获电荷占大多数,这是由于信号存储位置靠近界面,捕获电荷突然增加。此外,所有$\Phi 2HV$电压的总捕获电荷均随着工作温度的降低而减少,见图13(b)。温度的降低和电压的增大使得被束缚在区域2的电荷开始占据主导地位,同时温度的降低会减少给定信号电平下的电荷存储区域体积,而减少的程度取决于信号的大小,这其实归因于热扩散导致的运动分量的减少。当载流子从$\Phi 1$转移到$\Phi 2HV$时,温度的降低也会增加载流子的平均自由程,并可能会增加区域1内捕获的电荷。当$\Phi 2HV$电压超过某一临界值时,被捕获的电荷将开始再次减少,见图13(c)。在这些$\Phi 2HV$电压下,大部分捕获电荷过程发生在区域2内,因此对增加总捕获电荷数的贡献并不显著。该研究工作综合说明随着读出速度增加,则信号包在$\Phi 2HV$以下花费的时间将成比例减少,区域2内的捕获电荷也随之减少。基于此实验现象,研究人员提出可以通过在较低温度和尽可能低的$\Phi 2HV$

电压下操作，以降低被捕获电荷的比例，同时兼顾所需的倍增增益。



（a）T=293 K，不同区域　（b）不同温度，区域 1 和 2

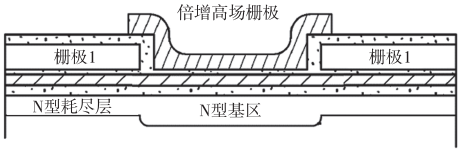
（c）$\Phi 2HV$=46 V，区域 1　（d）$\Phi 2HV$=46 V 时，不同温度

图 13　捕获电荷与倍增电压、温度及转移数的关系

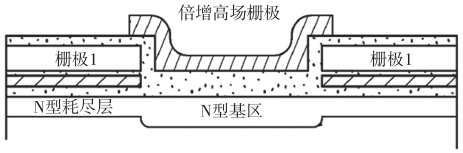
2　EMCCD 增益衰减的解决方案

2.1　采用纯氧化物电介质层

安森美半导体的 Stevens 等采用改变介电层结构的方式来抑制增益衰减[10]，如图 14(a)所示，在 EMCCD 寄存器的高场倍增门下使用纯氧化物的栅极结构，如图 14(b)所示。在图 15 中，采用纯氧化物电介质新工艺制造的器件维持 20 倍增益所需的倍增栅极电压约为 0 V，其介电曲线的轻微向下漂移是由温度控制器中的一些扰动导致的。相较之下，传统工艺制造的器件维持 20 倍增益所需倍增栅极电压则随着运行时间的增加一直上升。当器件工作时间达到 800 小时时，传统工艺器件维持 20 倍增益所需的倍增栅极电压大致在 65 V；而在工作时间超过 1 600 小时后，所需倍增栅极电压高达 90 V。这组对照实验结果表明在高场倍增栅极下引入纯氧化物介电结构的方式能够让热载流子快速通过新的栅极电介质层，使其不影响沟道的电场分布，从而有效消除了增益老化现象[23]。



（a）传统结构氧-氮-氧化物



（b）在高场栅极下仅含氧化物的新结构

图 14　倍增门下的介电结构比较

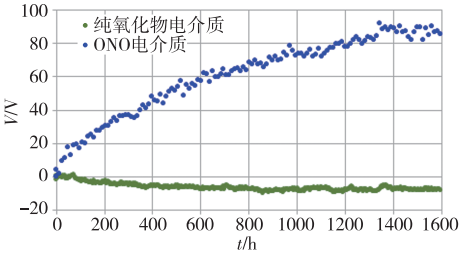
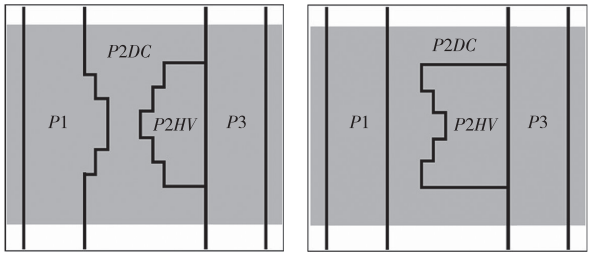


图 15　新旧工艺条件下，20 倍增益所需的倍增栅电压随时间的变化情况

2.2　改变栅极形状

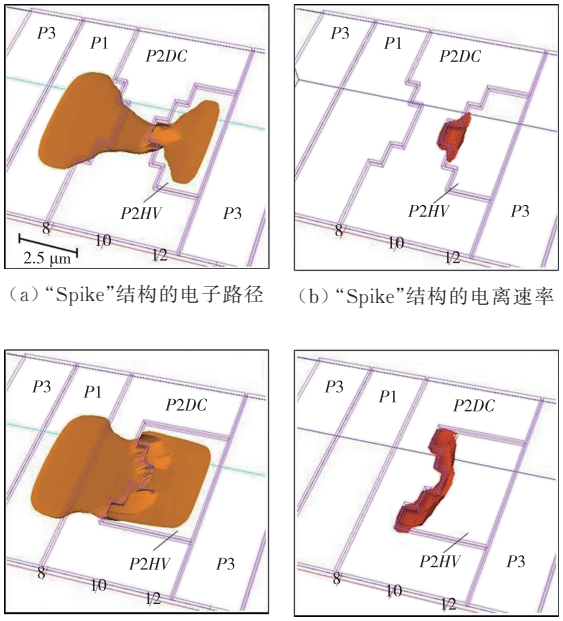
除了采用纯氧化物栅极介电结构的策略，英国开放大学电子成像中心的 Stefanov 等研究了在不增加电场强度的情况下，在 EMCCD 中获得更高电子倍增（EM）增益的新方法，并针对低压 CMOS 工艺的器件进行了 TCAD 仿真和原型设计。新型栅极形状的引入有助于增加转移过程中的电子电流密度或高场区的有效长度，从而提升器件增益。在相同条件下，采用改进栅极几何形状的两种新型电磁器件显示出比传统矩形栅极电磁器件更高的增益。该栅极设计可用于 EMCCD 和 CMOS 图像传感器，帮助增加增益或降低工作电压，从而有望改善增益衰减情况、并降低器件功耗[24]。通过改变设计 EMCCD 的 $P2DC$（同前文提及的 ΦDC）和 $P2HV$（同前文提及的 $\Phi 2HV$）电极形状，当信号电荷在 $P2DC$-$P2HV$ 间隙下穿过时，就会被迫在更窄的沟道上输运。这种设计的示例如图 16(a)所示，相应的仿真结果如图 17(a)和(b)所示。从 $P1$ 和 $P2HV$ 向 $P2DC$ 方向突出的“尖峰”改变了电位分布，使得小信号在沟道中心附近的狭窄路径上传输。从图 17(b)中可以看出，这对于增加电流密度是非常有效的。碰撞电离率最高的区域在很大程度上与电子路径重合，从而增加了电子引起碰撞电离的概率。

图 16(b)中的设计是通过将 $P2HV$ 的前缘分成 9 段，其中 4 段是通过平行于电子路径来实现的。图 17(c)和(d)展示了这种栅极形状对电子路径和电离速率的影响。与原始栅极的模拟相比，新栅极形状里电子束流的宽度更大。这是由于两个前角的栅



（a）“Spike”结构 （b）“Staircase”结构

图16 栅极几何形状增加增益



（a）“Spike”结构的电子路径 （b）“Spike”结构的电离速率

（c）“Staircase”结构的电子路径 （d）“Staircase”结构的电离速率

图17 各栅极结构的仿真结果

极面积增加，从而改变了电位分布。从图17(d)中可以看出，与原始栅极的矩形设计相比，*P2HV*栅极的两个角出现了显著的变化。值得注意的是，这种电离率空间分布的变化是在不增加电场大小的情况下实现，且电场大小几乎完全由施加在固定积分栅间隙上的电位所决定。

图18所示为不同器件和对照器件经过100级后的总增益变化规律。根据报道数据可知，3～6号器件具有相似的性能，而5号器件被用作主要的EM基准。由图19可知，在相同条件下，与对照组的矩形栅极3号和5号器件相比，新栅极结构的器件7和8号的增益显著增加。当$P2HV-P2DC=11.6$ V时，7号经过100级后的总增益比EM5号高出10.7倍。

总之，通过替换纯氧化物介电结构与更改栅极形状，可以有效抑制EMCCD的增益衰减现象。这两种方案不仅能够提高EMCCD的稳定性和耐久性，还能延长其工作寿命，从而为高灵敏度成像和微弱光信号检测应用提供可靠的技术支持。

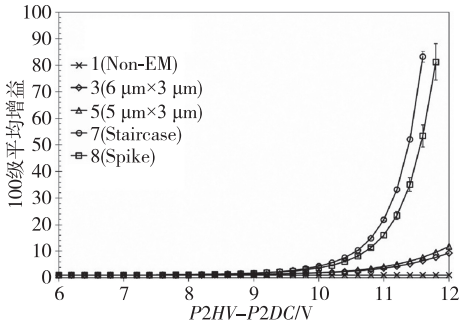


图18 不同器件100级增益测量结果

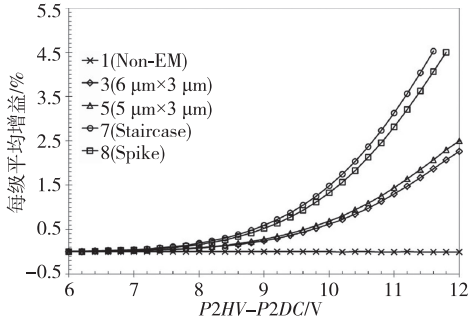


图19 不同器件的每级平均增益

3 总结

在器件机理层面，已开展的研究针对引起EMCCD器件增益随运行时间衰减的原因有两种主流解释：(1)空穴被束缚在ΦDC下的微结构界面处；(2)运行过程中热载流子注入栅极电介质。在解决方案层面，安森美半导体公司的Stevens等是通过在高场倍增门下使用纯氧化物电介质的新工艺，此举措能一定程度上消除增益衰减。而英国开放大学电子成像中心的Stefanov等通过将矩形栅极设计为“Spike”与“Staircase”新结构，实现了更高的最大增益，能为消除增益衰减提供一定帮助。目前已有的研究结果尚不足以从材料科学或者器件物理的层面明确引起增益衰减的底层机制，因此提出的解决方案并未达到理论预期。基于EMCCD增益衰减的物理机制仍有待进一步挖掘，并探索更直接有效的解决途径，包括从材料制备、器件工艺及系统层面调控等多维度协同探索，以进一步提升EMCCD器件的性能。未来研究需在深入认识界面处和电介质层载流子输运等物理机制的基础上，融合材料创新、工艺优化及系统驱动策略，形成多角度综合性技术路线，从而实质性提升EMCCD器件的长期工作稳定性与可靠性。

参考文献：

[1] 何伟基. 电子倍增CCD的倍增机制及其在光子计数成像的应用[D]. 南京：南京理工大学，2009.
He Weiji. Research on charge multiplication in EMCCD and it's application on photon counting imaging[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.

[2] 张敬贤. 微光与红外成像技术[M]. 北京：北京理工大学出版社，1995.
Zhang Jingxian. Low Light Level and Infrared Imaging Technology[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995.

[3] Daigle O, Gach J, Guillaume C, et al. L3CCD results in pure photo counting mode[J]. Proc. of SPIE, 2004, 5499: 1-9.

[4] 黄强强. EMCCD驱动电路设计与优化[D]. 南京：南京理工大学，2014.
Huang Qiangqiang. Design and optimization of EMCCD driver circuit[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.

[5] 白雪平，郑　渝，李　金，等. 512×512元帧转移EMCCD图像传感器[J]. 红外技术，2016，38(4)：300-304.
Bai Xueping, Zheng Yu, Li Jin, et al. A frame transfer EMCCD image sensor with 512×512 pixels [J]. Infrared Technology, 2016, 38(4): 300-304.

[6] 张青文. 强光作用ICCD和EMCCD微光成像系统建模与仿真[D]. 西安：西安电子科技大学，2014.
Zhang Qingwen. Modeling and simulation of ICCD and EMCCD low light level imaging system under strong light[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.

[7] 饶晓慧. 基于Camera Link的EMCCD相机图像采集系统的研究[D]. 昆明：昆明理工大学，2014.

[8] 张闻文，刘婧婧，陈　钱，等. 电子倍增CCD噪声参数的估计方法[J]. 红外与激光工程，2014，43(12)：4146-4152.
Zhang Wenwen, Liu Jingjing, Chen Qian, et al. Estimation method for noise parameter of electron multiplying CCD [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(12): 4146-4152.

[9] Jerram P, Pool P J, Bell R, et al. The LLCCD: low-light imaging without the need for an intensifier [J]. Sensors and Camera Systems for Scientific, Industrial, and Digital Photography Applications II, 2001, 4306: 178.

[10] Stevens E G, Clayhold J A, Doan H, et al. Recent enhancements to interline and electron multiplying CCD image sensors[J]. Sensors, 2017, 17(12): 2841.

[11] 赖积斌. EMCCD倍增增益驱动技术研究[D]. 成都：中国科学院研究生院(光电技术研究所)，2016.
Lai Jibin. The multiplication gain drive technology research of electron multiplication CCD [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2016.

[12] Heim G B, Burkepile J, Frame W W. Low-light-level EMCCD color camera[J]. Airborne Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (ISR) Systems and Applications III, 2006, 6209: 62090F.

[13] Teo B K, Shestakova I, Sun M, et al. Evaluation of a EMCCD detector for emission-transmission computed tomography[C]// IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, 2005: 3050-3054.

[14] MacKay C, Staley T D, King D, et al. High-speed, photon-counting CCD cameras for astronomy [J]. High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy IV, 2010, 7742: 774202.

[15] Denvir D J, Conroy E. Electron-multiplying CCD: the new ICCD[J]. Low-Light-Level and Real-Time Imaging Systems, Components, and Applications, 2003: 164.

[16] Smith D, Ingley R, Holland A, et al. Proton irradiation of EMCCDs[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2006, 53(2):205-210.

[17] Djazovski O, Daigle O, Laurin D, et al. Electron-multiplying CCDs for future space instruments [J]. Photonics North 2013, 2013, 8915: 89150Q.

[18] Hamamatsu Photonics. EM-CCD technical note[R]. Japan: Hamamatsu Photonics, 2007: 5-6.|

[19] Smith D R, Walton D M, Ingley R, et al. EMCCDs for space applications [J]. High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy II, 2006, 6276: 62760K.

[20] Evagora A M, Murray N J, Holland A D, et al. Novel method for identifying the cause of inherent ageing in Electron Multiplying Charge Coupled Devices [J]. Journal of Instrumentation, 2012, 7(1): C01023.

[21] 李　钦，吴琼瑶，伍明娟，等. EMCCD倍增增益老化分析与评价技术[J]. 电子产品可靠性与环境试验，2022，40(2)：36-39.
Li Qin, Wu Qiongyao, Wu Mingjuan, et al. EMCCD multiplication gain aging analysis and evaluation technology[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2022, 40(2): 36-39.

[22] Bush N, Stefanov K, Hall D, et al. Simulations of charge transfer in electron multiplying charge coupled devices[J]. Journal of Instrumentation, 2014, 9(12): C12042.

[23] Stevens E G, Clayhold J A, Doan H, et al. Recent Enhancements to Electron Multiplying CCD Image Sensors[J]. Sensors, 2017, 17: 2841.

[24] Stefanov K D, Dunford A, Holland A D. Electron multiplying low-voltage CCD with increased gain[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2018, 65(7): 2990-2996.

作者简介：

纳　旺(2001—)，男，硕士研究生，主要研究方向为EMCCD增益衰减；

徐　浩(1990—)，男，博士，研究员，主要从事光电探测与传感研究。