

EBCMOS近贴聚焦结构及电场分布对电子运动轨迹的影响

王巍 李野 陈卫军 宋德 王新

Influence of proximity focusing structure and electric field distribution on electron trajectory in the EBCMOS

WANG Wei, LI Ye, CHEN Wei-jun, SONG De, WANG Xin

引用本文:

王巍, 李野, 陈卫军, 宋德, 王新. EBCMOS近贴聚焦结构及电场分布对电子运动轨迹的影响[J]. *中国光学*, 2020, 13(4): 713–721. doi: 10.37188/CO.2020–0063

WANG Wei, LI Ye, CHEN Wei-jun, SONG De, WANG Xin. Influence of proximity focusing structure and electric field distribution on electron trajectory in the EBCMOS[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 713–721. doi: 10.37188/CO.2020-0063

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2020–0063>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

横向收集结构锗硅半导体雪崩探测器的设计研究

Design and research of Ge/Si avalanche photodiode with a specific lateral carrier collection structure

中国光学. 2019, 12(4): 833 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0833>

基于结构字典学习的图像复原方法

Image restoration approach based on structure dictionary learning

中国光学. 2017, 10(2): 207 <https://doi.org/10.3788/CO.20171002.0207>

超小自聚焦光纤探头的研究进展

Research progress on ultra-small self-focusing optical fiber probe

中国光学. 2018, 11(6): 875 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.0875>

光程补偿近红外光透射反射干涉重构微结构内部形貌

Internal profile reconstruction of microstructures based on near-infrared light transmission reflection interferometry with optical path compensation

中国光学. 2019, 12(2): 395 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0395>

氢原子在少周期强激光场中阈上电离的电子波包干涉图像

Electron wave packet interference images in above-threshold ionization of hydrogen atoms by few-cycle intense laser fields

中国光学. 2019, 12(6): 1376 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1376>

近红外光热转换纳米晶研究进展

Research progress of near-infrared photothermal conversion nanocrystals

中国光学. 2017, 10(5): 541 <https://doi.org/10.3788/CO.20171005.0541>

EBCMOS 近贴聚焦结构及电场分布对 电子运动轨迹的影响

王 巍^{1,2}, 李 野^{1*}, 陈卫军¹, 宋 德^{1*}, 王 新¹

(1. 长春理工大学 理学院, 吉林 长春 130022;

2. 长春工业大学 发展规划与政策法规处, 吉林 长春 130012)

摘要:为获得高分辨率的电子轰击型 CMOS (EBCMOS) 成像器件, 本文就近贴聚焦结构内电场分布对电子运动轨迹的影响进行了研究。设计了不同的 EBCMOS 结构并得到 3 种电场分布情况, 分别为光电阴极和背面轰击型 CMOS (BSB-CMOS) 之间的等势面不平行、部分平行和彼此平行。根据电磁学理论结合蒙特卡洛模拟方法, 分别模拟了每种电场分布情况下的电子运动轨迹。研究表明: 当设计的电子倍增层表面覆盖一层 30 nm 的超薄重掺杂层, 保持极间电压为 4000 V 且极间距为 1 mm 时, 光生电子轰击 BSB-CMOS 表面时扩散直径可减小至 30 μm 。此结构具有电子聚焦作用, 有助于实现高分辨率的 EBCMOS。同时, 进一步研究了光电阴极与 BSB-CMOS 之间的距离和电压对电子扩散直径的影响。研究发现, 近贴间距越小、加速电压越高, 相应的电场强度就越高, 越有利于电子聚焦。本文工作将为改进电子轰击型 CMOS 成像器件的分辨率特性提供理论指导。

关键词: 微光像增强器; 电子轰击成像; 近贴聚焦结构; EBCMOS

中图分类号: TN223 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2020-0063

Influence of proximity focusing structure and electric field distribution on electron trajectory in the EBCMOS

WANG Wei^{1,2}, LI Ye^{1*}, CHEN Wei-jun¹, SONG De^{1*}, WANG Xin¹

(1. School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Division of Development Planning and Policies & Regulations, Changchun University
of Technology, Changchun 130012, China)

* Corresponding author, E-mail: liyecust@163.com; songde614@163.com

Abstract: In order to obtain high-resolution Electron Bombarded CMOS (EBCMOS) imaging devices, we study the effect of electric field distribution on the electron trajectory in proximity focusing EBCMOS devices. Three different electric field distributions are obtained by designing different EBCOMS structure, namely, the nonparallel, partially parallel, and parallel equipotential surfaces between the photocathode and

收稿日期: 2020-04-21; 修订日期: 2020-06-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 11874091); 吉林省科技厅重点科技研发项目 (No. 20180201034GX)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 11874091); Key Scientific and Technological Project of Science and Technology Department of Jilin Province (No. 20180201034GX)

the Back-side Bombarded CMOS (BSB-CMOS). The electron trajectories in each case are simulated according to electromagnetism theory and monte carlo simulation method. The results indicate that, when the BSB-CMOS is bombarded by photoelectrons, the scattering diameter can be reduced to 30 μm under the condition that the surface of the electron multiplying layer is covered with 30 nm ultra-thin heavily doping layer and the voltage between electrodes is maintained at 4000 V while the distance between photocathode and BSB-CMOS is 1 mm. This structure is helpful to realize electrons focusing and achieve EBCMOS with high resolution. Then, the influence of the distance and voltage between the photocathode and BSB-CMOS on scattering diameter is studied. The results indicate that the electric field strength increases with the decrease of proximity distance and the increase of the acceleration voltage. This work will provide theoretical guidance for improving the resolution characteristics of EBCMOS imaging devices.

Key words: low-light-level image intensifier; electron-bombarding image; proximity focusing structure; EB-CMOS

1 引言

数字化微光夜视技术能够实现图像信息的远距离传输,而且可以通过计算机图像处理技术对图像进行降噪、增强及识别等后续处理,极大地拓展了微光夜视技术的应用领域。目前常见的数字化微光成像器件有:像增强型 CCD (ICCD)、电子倍增型 CCD (EMCCD)、电子轰击型 CCD/CMOS (EBCCD/EBCMOS) 等^[1-2]。

ICCD 是由光电阴极、MCP、荧光屏构成的直视型微光器件,其与 CCD 图像传感器耦合而成,目前已经实现商业化。入射光由光电阴极转换为光电子,光电子通过 MCP 倍增,并通过荧光屏再次转换为光学信号,最终通过光学系统耦合进入 CCD 图像传感器转换为电子图像信息,整个过程经过了光-电-光-电三次转换^[3-4]。ICCD 的缺点是耦合光学系统带来了体积和重量的上升,同时耦合过程会对调制传递函数(MTF)产生影响。EMCCD 是在 CCD 的读出寄存器和输出放大器之间增加了多级具有电子倍增作用的增益寄存器,使电荷信号通过碰撞电离效应得到放大从而实现高增益。在制冷工作条件下,EMCCD 能够达到单光子探测水平,目前已经实现商业化,同时 EMCOS 也被提出^[5-6]。EBCCD/EBCMOS 器件是将光电阴极产生的光电子加速后直接入射到固体图像传感器 (CCD/CMOS) 表面,通过电子轰击半导体(EBS)增益特性获得高增益^[7-8]。由于工

作于外光电效应的光电阴极的热噪声显著低于内光电效应型器件,因此,其光电转换过程中信噪比较高,能够实现单光子探测。目前报道的 EB-CMOS 器件工作时无需制冷,成像设备体积小、重量轻、更适用于便携式微光成像等领域^[9-10]。

EBCMOS 器件最初是为军用夜视设备而研发的^[11-12]。在科学研究方面,EBCMOS 器件的研发源自于其在粒子物理学中的应用。2007 年,法国里昂大学首次推出了 Mimosa 5,具有 1024×1024 像素,40 Hz 帧频和 6~10 kV 的加速电压^[13]。随后,帧频达 500 Hz 的电子轰击型图像传感器也被陆续推出^[14-15]。然而,EBCMOS 器件的空间分辨率要远低于光敏型 CMOS 器件。这是由于采用近贴聚焦结构的电真空器件中,光电子由光电阴极运动到 BSB-CMOS 器件表面及轰击 BSB-CMOS 时发生的电子横向扩散现象导致的。目前国内关于如何获得高分辨率特性的 EBCMOS 的相关研究较少,仅有少量报道给出实测的 EB-CMOS 分辨率参数,如刘虎林等报道的高分辨紫外电子轰击 CMOS 的分辨率为 25 lp/mm^[10]。由于真空成像器件(如双近贴像增强器)光生电子的运动轨迹会影响器件的成像分辨率,因此,EB-CMOS 内光生电子运动轨迹的研究可能有利于分析影响 EBCMOS 分辨率的因素。然而,目前关于在近贴聚焦型 EBCMOS 器件中光电子运动轨迹影响的研究,特别是电场分布对运动轨迹影响的相关报道甚少。

本文研究了近贴聚焦型 EBCMOS 中电场分

布对电子运动轨迹的影响。文中利用 Ansoft Maxwell 3D 软件,对 EBCMOS 中的电场分布进行了模拟^[16]。然后,根据电磁学理论结合蒙特卡罗计算方法,模拟研究了不同电场分布下的电子运动轨迹。本研究将为高性能 EBCMOS 的制备提供理论基础。

2 电子运动轨迹模型

EBCMOS 是基于近贴聚焦微光像增强技术实现的,其近贴聚焦结构中采用背面轰击型 CMOS (BSB-CMOS),取代了微通道板和荧光屏^[17]。当入射光射入光电阴极时,基于光电效应,光电阴极将产生初始速度矢量为 (v_i, θ_i, ϕ_i) 的光生电子,该速度取决于光电阴极材料和光电子波长。如图 1 所示,假设在波长为 550 nm 的光照射下,砷化镓 (GaAs) 光电阴极的中心附近能够产生 1000 个光电子,光电阴极和 BSB-CMOS 的间距为 1 mm,对二者施加 4000 V 的电压且电场线垂直于二者表面。根据电磁学理论,在光电阴极发射的光电子向 BSB-CMOS 运动的过程中,随着速度矢量的变化 (v, θ) ,将对光生电子产生聚焦作用。

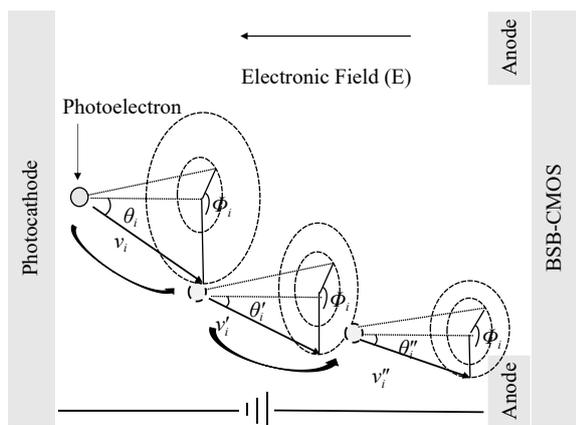


图 1 电场作用下电子运动轨迹变化示意图

Fig. 1 Schematic diagram of changes in a photoelectron trajectory caused by the electric field

由于光电阴极和 BSB-CMOS 间的电场分布会随着阳极结构和 BSB-CMOS 表面结构的变化而变化,本文利用 Ansoft Maxwell 3D 软件,采用有限元模型模拟分析了 EBCMOS 中近贴结构内的电场分布情况。集中构建了光电阴极与 BSB-CMOS 间等势面不平行、部分平行和平行时的

EBCMOS 近贴聚焦结构模型。在此基础上,研究了电子运动轨迹。这对构建 EBCMOS 物理模型,包括光电阴极、阳极和 BSB-CMOS 等具有重要意义。然后,通过优化分配相关参数模拟了电场分布情况。最后,对模型设置激励、设置计算参数、设置自适应计算参数、进行网格剖分设置、检查与运行并查看结果。

3 模拟结果与讨论

3.1 光电阴极与 BSB-CMOS 间的等势面不平行时电子运动轨迹的模拟

图 2(a) 给出了光电阴极与 BSB-CMOS 间的等势面不平行时 EBCMOS 近贴聚焦结构模型示意图。首先对 EBCMOS 中所有参数进行适当赋值,进而对光电阴极与 BSB-CMOS 之间的电场分布情况进行模拟。其中,BSB-CMOS 中的电子倍增层为 P 型半导体材料,掺杂浓度为 1×10^{13} 个原子/cm³。光电阴极材料为砷化镓 (GaAs),阳极材料为铜。如图 2(a) 所示,在该 EBCMOS 近贴结构中,光电阴极、阳极和电子倍增层的尺寸均为 $42 \text{ mm} \times 42 \text{ mm} \times 10 \text{ }\mu\text{m}$ 。其中,阳极为中空,尺寸为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 10 \text{ }\mu\text{m}$;像素尺寸为 $11 \text{ }\mu\text{m} \times 11 \text{ }\mu\text{m}$,光电阴极与阳极之间的直流电压为 4000 V;光电阴极和 BSB-CMOS 之间的距离为 1 mm。利用 Ansoft Maxwell 3D 软件对 EBCMOS 近贴结构中的电场分布情况进行模拟,得到图 2(b)(彩图见期刊电子版),可以看出,此时光电阴极和 BSB-CMOS 之间的等势面并不平行,而且中心没有电场分布。

假设光电阴极产生的光电子符合高斯分布,光电子束直径为 20 nm。当 EBCMOS 表面为无限大时,在光电阴极和 BSB-CMOS 之间没有电场分布,近似为图 2(b)。当光电子从光电阴极射出,轰击到 BSB-CMOS 时,通过模拟 1000 个光电子的运动轨迹可以得出其扩散范围超过了 0.1 m^2 ,如图 3 所示,因此,该结构下的电场分布不具有聚焦电子的作用。如果被电子轰击的 CMOS 尺寸有限,电场分布如图 2(b) 所示,由于靠近阳极的电场强度较大,大多数电子会向阳极运动,也不会产生聚焦。因此,当等势面不平行时,CMOS 中入射光电子的增益特性无法得到保证,电子的收集也相对困难。从图 2(b) 可以看到电极边缘是弯

曲分布的,减小芯片尺寸有望实现光电阴极和阳极间等势面的部分平行。

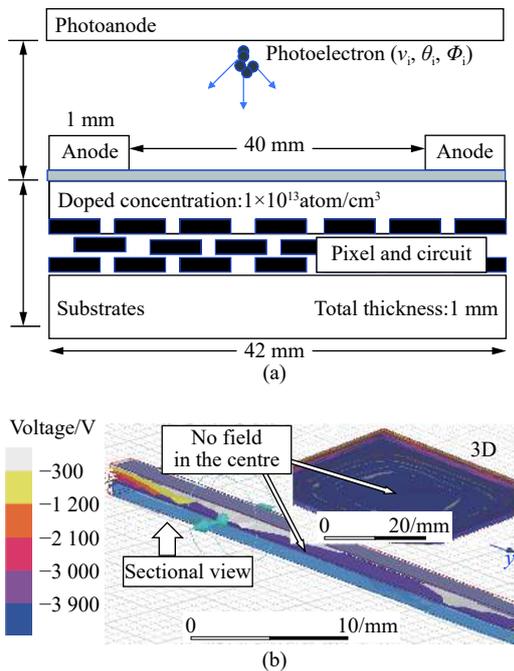


图 2 (a) 光电阴极与 BSB-CMOS 间的等势面不平时 EBCMOS 近贴聚焦结构模型示意图及 (b) 光电阴极与 BSB-CMOS 之间的电场分布模拟图

Fig. 2 (a) Schematic diagram of the EBCMOS model with the proximity focusing structure when the equipotential surfaces between the photocathode and BSB-CMOS are not parallel and (b) electrostatic distribution between the photocathode and BSB-CMOS

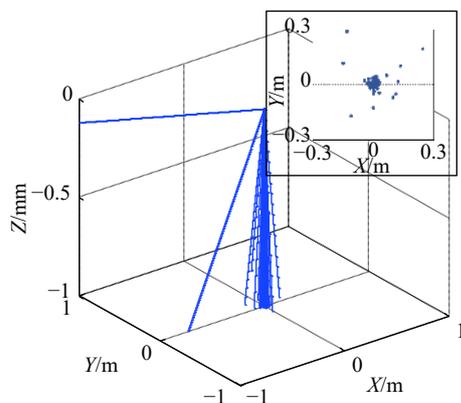


图 3 无电场时的电子运动轨迹模拟图。内图为轰击 BSB-CMOS 表面的光电子分布图(扩散范围超过 0.1 mm^2)

Fig. 3 Simulation of electron trajectories in the absence of electric fields. Inset figure is the distribution diagram of photoelectrons bombarding the surface of BSB-CMOS (scattered over an area exceeding 0.1 mm^2)

3.2 光电阴极与 BSB-CMOS 间的等势面部分平行时电子运动轨迹的模拟

图 4(a) 构建了光电阴极与 BSB-CMOS 间的等势面部分平行时 EBCMOS 近贴聚焦结构模型示意图。除尺寸外, EBCMOS 结构模型中的所有参数均与图 2(a) 相同。图 4(a) 中光电阴极、阳极和电子倍增层的尺寸均为 $4.00 \text{ mm} \times 4.00 \text{ mm} \times 10 \mu\text{m}$ 。其中, 阳极中间空心处的尺寸为 $3.60 \text{ mm} \times 3.60 \text{ mm} \times 10 \mu\text{m}$ 。在光电阴极与阳极之间施加 4000 V 的直流电压, 光电阴极与 BSB-CMOS 之间的距离为 1 mm 。图 4(b) (彩图见期刊电子版) 给出了相对应的 EBCMOS 近贴聚焦结构中的电场分布图, 由图 4(b) 可知, 在光电阴极和 BSB-CMOS 之间, 靠近光电阴极从 0 V 到 1100 V , 等势面近似平行于光电阴极表面。而当电压较高时, 等势面的中心向 BSB-CMOS 弯曲。

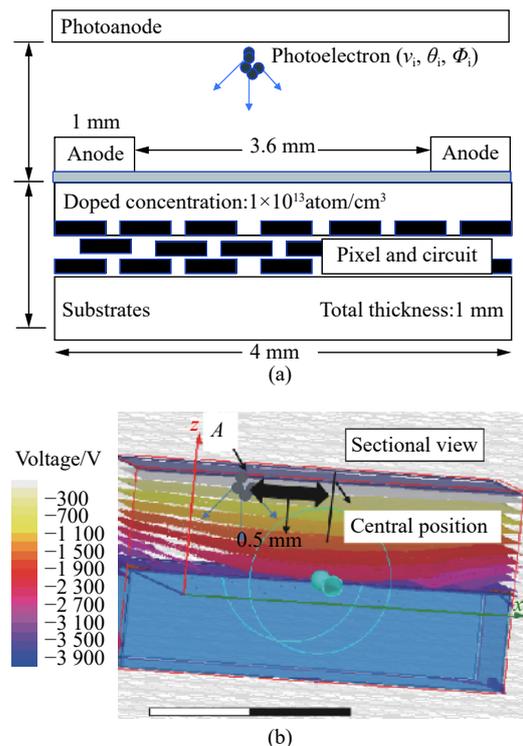


图 4 (a) 光电阴极与 BSB-CMOS 间的等势面部分平行时 EBCMOS 近贴聚焦结构模型示意图及 (b) 光电阴极与 BSB-CMOS 之间的电场分布模拟图

Fig. 4 (a) Schematic diagram of the EBCMOS model with the proximity focusing structure when the equipotential surfaces between the photocathode and BSB-CMOS are partially parallel and (b) electrostatic distribution between the photocathode and BSB-CMOS

图 5 给出了由光电阴极产生的 1000 个光电子, 在高压电场作用下, 轰击到 BSB-CMOS 的运动轨迹。假设光电子产生于图 4(b) 中的 A 位置, 仿真结果表明, 此时电子倍增层表面入射光电子的分布中心, 相对于光电阴极产生的光电子, 在 $x-y$ 平面上的漂移大约为 $15 \mu\text{m}$, 且扩散成为直径约为 $60 \mu\text{m}$ 的圆形区域。当光电子在中心位置产生时, 光电子束的中心不会漂移。由于每个位置的电场分布都不同, 漂移的大小将随着产生光电子的位置而变化, 这种静电分布不利于实现高分辨

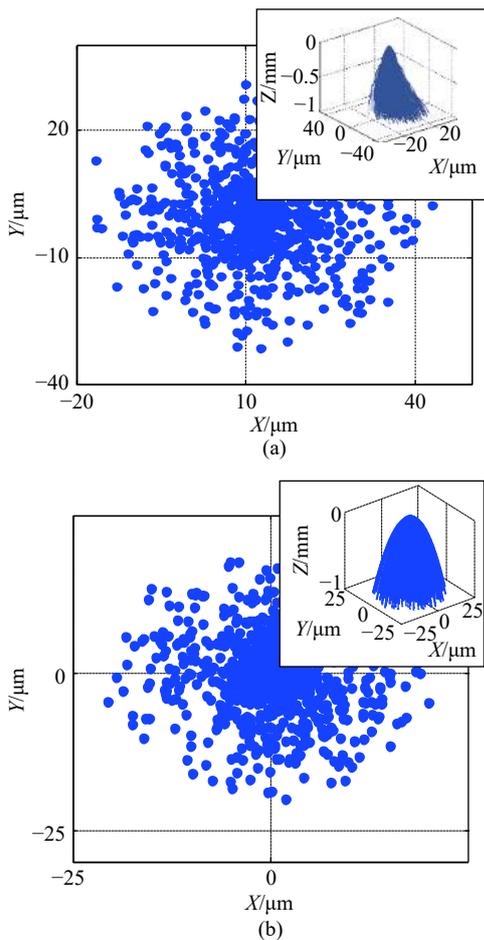


图 5 BSB-CMOS 表面入射光电子分布图。(a) 图 4(b) 中 A 位置所产生的光电子; (b) 光电阴极表面中心位置所产生的光电子 (内图: 电子运动轨迹的三维模拟图)

Fig. 5 Distribution diagram of photoelectrons bombarding the surface of BSB-CMOS. (a) Photoelectrons generated at the position A shown in Figure 4(b); (b) photoelectrons generated at the center of photocathode surface. (Inset figures: 3-D simulation diagram of electron trajectories)

率的 EBCMOS。进一步, 通过 EBCMOS 结构设计, 以实现光电阴极和阳极间等势面平行, 并研究此电场对电子运动轨迹的影响。

3.3 光电阴极与 BSB-CMOS 间的等势面平行时电子运动轨迹的模拟

图 6(a) 给出了光电阴极与 BSB-CMOS 间的等势面平行时 EBCMOS 近贴聚焦结构模型示意图。除了在电子倍增层表面制备一层 30 nm 的超薄重掺杂层 (掺杂浓度为 1×10^{17} 个原子/ cm^3) 外, 该结构模型的大部分参数与图 2(a) 一致。在光电阴极与阳极之间施加 4000 V 的直流电压, 光电阴极与 BSB-CMOS 之间的距离为 1 mm , 对 EBCMOS 近贴结构中的电场分布情况进行模拟, 如图 6(b) (彩图见期刊电子版) 所示。从图 6(b) 可以看出, 在 0 V 到 4000 V 之间, 除了靠近阳极的位置外, 光电阴极和 BSB-CMOS 之间的等势面都平行于光电阴极表面。这意味着大多数位置的电场都垂直于电子倍增层。

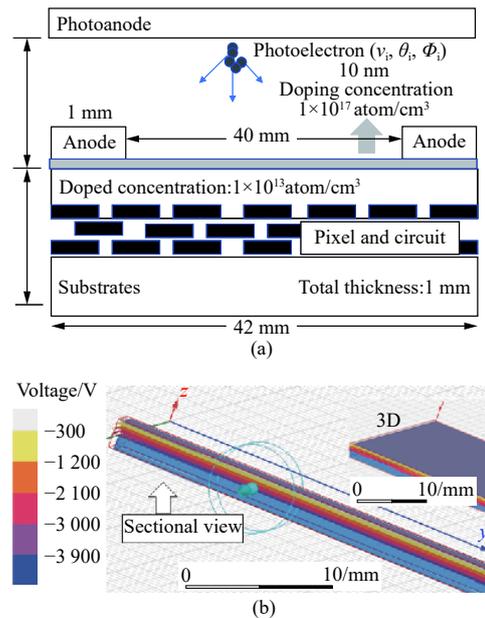


图 6 (a) 光电阴极与 BSB-CMOS 间的等势面平行时 EBCMOS 近贴聚焦结构模型示意图及 (b) 光电阴极与 BSB-CMOS 之间的电场分布模拟图

Fig. 6 (a) Schematic diagram of the EBCMOS model with the proximity focusing structure when the equipotential surfaces between the photocathode and the BSB-CMOS are parallel and (b) electrostatic distribution between the photocathode and BSB-CMOS

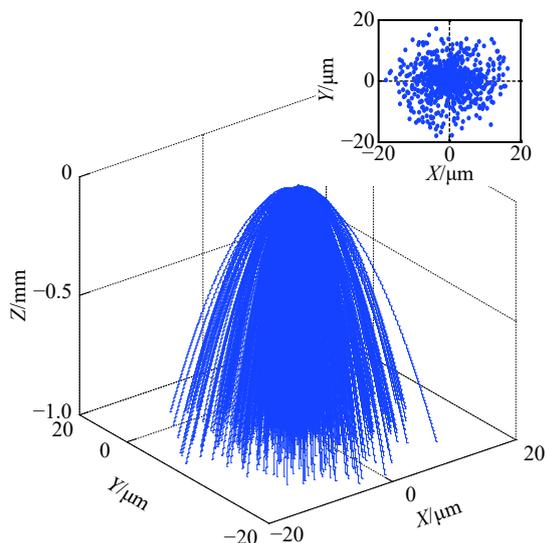


图 7 电子运动轨迹三维模拟图。内图为 BSB-CMOS 表面入射光电子分布图(扩散形成直径约为 $30\ \mu\text{m}$ 的圆)

Fig. 7 3D simulation diagram of electron trajectories. Inset figure is the distribution of photoelectrons bombarding the surface of BSB-CMOS (scattered into a circle with diameter of approximate $30\ \mu\text{m}$)

图 7 给出了当电压为 $4\ 000\text{V}$, 光电阴极与 BSB-CMOS 之间距离为 $1\ \text{mm}$ 时, 由光电阴极产生并轰击到 BSB-CMOS 上的 $1\ 000$ 个光电子的运动轨迹三维图。由光电阴极产生的光电子符合

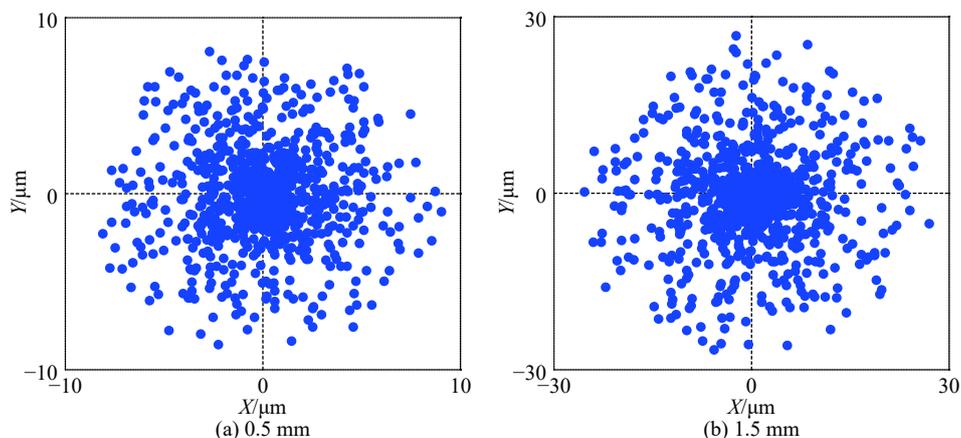


图 8 光电阴极与 BSB-CMOS 间距不同时, BSB-CMOS 表面入射光电子分布图

Fig. 8 Distribution diagrams of photoelectrons bombarding the surface of BSB-CMOS at different distances between photocathode and BSB-CMOS

3.5 电子运动轨迹随光电阴极与 BSB-CMOS 之间电压的变化

图 9 为光电阴极与阳极间电压分别取 8 、

12 、 16 、 $32\ \text{kV}$, 光电阴极与 BSB-CMOS 之间的距离为 $1\ \text{mm}$ 时, BSB-CMOS 表面的入射光电子分布图。除电压取不同值外, 图 9 设计的 EBCMOS

3.4 电子运动轨迹随光电阴极与 BSB-CMOS 之间距离的变化分析

在 $4\ 000\ \text{V}$ 电压下, 光电阴极与 BSB-CMOS 之间距离分别为 $0.5\ \text{mm}$ 和 $1.5\ \text{mm}$ 时, 光电子轰击 BSB-CMOS 表面的分布图如图 8 所示。除了光电阴极与 BSB-CMOS 的间距外, 本节 EBCMOS 结构模型中的大部分参数与图 6 一致。从图 7 和 8 可以看出, 当光电阴极与 BSB-CMOS 的间距分别为 0.5 、 1 和 $1.5\ \text{mm}$ 时, 轰击到电子倍增层表面的光电子在 x - y 平面上的扩散直径分别为 16 、 30 和 $50\ \mu\text{m}$, 即扩散直径随着光电阴极和 BSB-CMOS 之间间距的增大而增大。由此可以得出, 近贴聚焦结构中加速电压相同时, 间距越小, 电子聚焦效果越好。这一结论对提高电子轰击 CMOS 成像器件的分辨率具有重要意义。

结构模型中大部分参数与图 6 一致。从图 7 和图 9 可以看出, 当光电阴极与 BSB-CMOS(或阳极)之间的电压分别取 4, 8, 12, 16 和 32 kV 时, 入射到电子倍增层表面的光电子在 x - y 平面上的扩

散直径分别为 30, 24, 20, 16, 和 12 μm , 即扩散直径随着光电阴极与 BSB-CMOS 之间施加电压的增大而减小。模拟结果表明, 近贴聚焦结构中施加的电压越大, 电场强度越大, 电子聚焦效果越好。

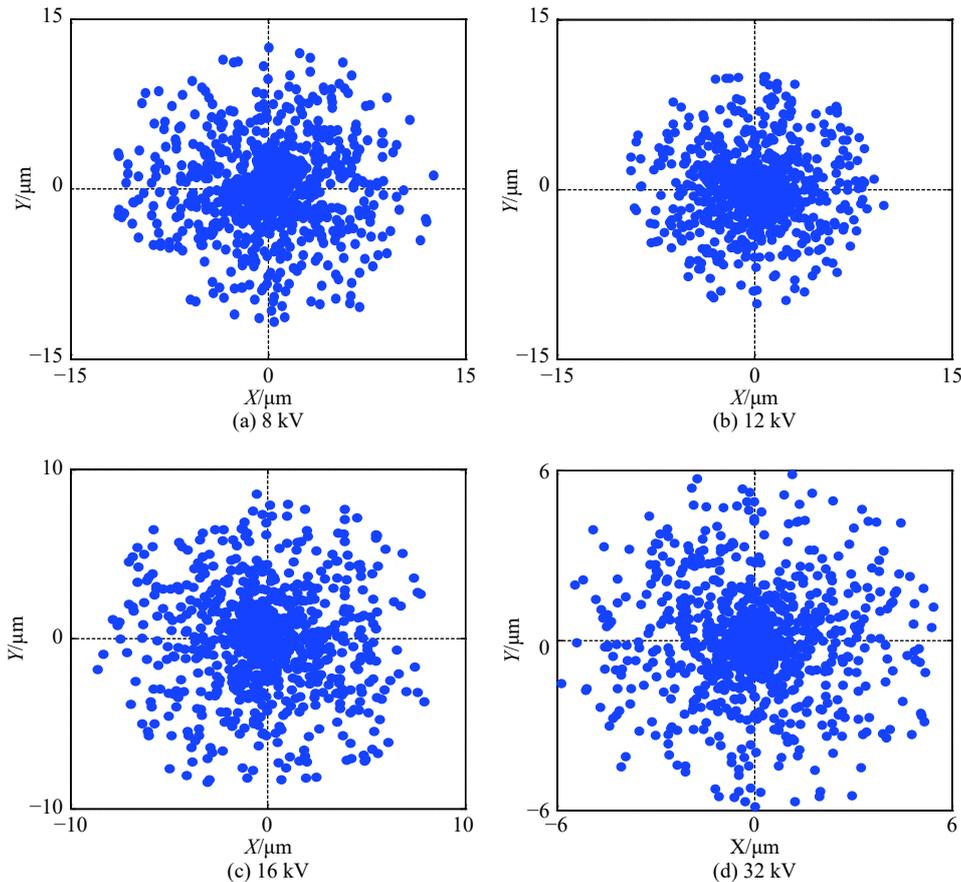


图 9 光电阴极与 BSB-CMOS 之间电压不同时, BSB-CMOS 表面入射光电子分布图

Fig. 9 Distribution diagrams of photoelectrons bombarding the surface of BSB-CMOS when the voltage between photocathode and BSB-CMOS is changed

高能电子会对半导体器件造成损伤, 已报道的 EBCCD 器件的电子加速电压不超过 10 kV^[18]。但高能电子对 EBCMOS 器件的损伤还有待进一步研究, 国外研究者在进行 EBCMOS 器件研究中将加速电压上限设为 30 kV^[15], 当加速电压受限时, 只能通过减小近贴间距来减小电子扩散半径, 提高器件的分辨率, 这依赖于装配工艺水平的提高。

4 结 论

本文利用 Ansoft Maxwell 3D 软件对设计的 3 种 EBCMOS 结构中的电场分布进行了模拟,

并进一步研究了 EBCMOS 器件近贴聚焦结构中电场分布对电子运动轨迹的影响规律。研究表明, 近贴结构中电场强度越高, 间距越小, 对电子的聚焦效果越好, 但受电真空器件近贴结构制作工艺的限制, 近贴结构间距的减小程度有限。当设计的电子倍增层表面覆盖一层 30 nm 超薄重掺杂层, 且保持极间电压为 4000 V, 极间距为 1 mm 时, 光电子到达 BSB-CMOS 表面时的电子扩散直径可减小至 30 μm , 有利于 EBCMOS 器件分辨率的提高, 并在工艺上具有可实施性。这项工作将为 EBCMOS 成像器件的研制提供理论指导。

参考文献:

- [1] 金伟其, 陶禹, 石峰, 等. 微光视频器件及其技术的进展[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(11): 3167-3176.
JIN W Q, TAO Y, SHI F, *et al.*. Progress of low level light video technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3167-3176. (in Chinese)
- [2] 郭晖, 向世明, 田民强. 微光夜视技术发展动态评述[J]. *红外技术*, 2013, 35(2): 63-68.
GUO H, XIANG SH M, TIAN M Q. A review of the development of low-light night vision technology[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(2): 63-68. (in Chinese)
- [3] QI L, JUST F, LEUCHS G, *et al.*. Autonomous absolute calibration of an ICCD camera in single-photon detection regime[J]. *Optics Express*, 2016, 24(23): 26444-26453.
- [4] TORR M R, TORR D G, BAUM R, *et al.*. Intensified-CCD focal plane detector for space applications: a second generation[J]. *Applied Optics*, 1986, 25(16): 2768-2777.
- [5] BRUGIÈRE T, MAYER F, FERREYRE P, *et al.*. First measurement of the in-pixel electron multiplying with a standard imaging CMOS technology: Study of the EMCMOS concept[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2015, 787: 336-339.
- [6] 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.
- [7] HIRVONEN L M, JIGGINS S, SERGENT N, *et al.*. Photon counting imaging with an electron-bombarded CCD: Towards wide-field time-correlated single photon counting (TCSPC)[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2015, 787: 323-327.
- [8] 朱敏, 田进寿, 温文龙, 等. 基于电子轰击式CCD的大动态条纹相机研究[J]. *物理学报*, 2015, 64(9): 098501.
ZHU M, TIAN J SH, WEN W L, *et al.*. Research on large dynamic range streak camera based on electron-bombarded CCD[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(9): 098501. (in Chinese)
- [9] HIRVONEN L M, SUHLING K. Photon counting imaging with an electron-bombarded pixel image sensor[J]. *Sensors*, 2016, 16(5): 617.
- [10] 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): 014209.
LIU H L, WANG X, TIAN J SH, *et al.*. High resolution electron bombarded complementary metal oxide semiconductor sensor for ultraviolet detection[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(1): 014209. (in Chinese)
- [11] AEBI V W, COSTELLO K A, ARCUNI P W, *et al.*. EBAPS: Next generation, low power, digital night vision[C]. *Presented at the OPTRO 2005 International Symposium*, OPTRO, 2005: 1-10.
- [12] AEBI V W, BOYLE J J. Electron bombarded active pixel sensor: US, 6285018B1 [P]. 2001-09-04.
- [13] BARBIER R, DEPASSE P, BAUDOT J, *et al.*. First Results from the development of a new generation of hybrid photon detector: EBCMOS[C]. *Proceedings of the 10th Conference on Astroparticle, Particle and Space Physics, Detectors and Medical Physics Applications*, World Scientific, 2008: 23-27.
- [14] CAJGFINGER T, DOMINJON A, BARBIER R. Single photon detection and localization accuracy with an EBCMOS camera[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2015, 787: 176-181.
- [15] DOMINJON A, CHABANAT E, DEPASSE P, *et al.*. LUSIPHER large-scale ultra-fast single photo-electron tracker[C]. *2009 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record (NSS/MIC)*, IEEE, 2009: 1527-1531.
- [16] 宋德, 朴雪, 拜晓锋, 等. 近贴型像增强器中微通道板输入端电场模拟研究[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(10): 2981-2986.
SONG D, PIAO X, BAI X F, *et al.*. Simulation research of electrostatic field of MCP input in proximity image intensifier[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 2981-2986. (in Chinese)
- [17] 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): 0203002.
SONG D, SHI F, LI Y. Simulation of charge collection efficiency for EBAPS with uniformly doped substrate[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0203002. (in Chinese)

- [18] BARBIER R, CAJGFINGER T, CALABRIA P, *et al.*. A single-photon sensitive ebCMOS camera: The LUSIPHER prototype[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2011, 648(1): 266-274.

作者简介:



王 巍(1983—), 女, 吉林和龙人, 理学硕士, 助理研究员, 2011年于长春理工大学获得硕士学位, 现在长春工业大学工作, 主要从事光电成像器件与系统方面的研究。E-mail: wangwei83@ccut.edu.cn



李 野(1969—), 男, 吉林镇赉人, 理学博士, 教授, 2011年于长春理工大学获得博士学位, 主要从事光电成像器件与系统方面的研究。E-mail: liyecust@163.com



宋 德(1981—), 男, 吉林靖宇人, 理学博士, 副教授, 2009年于中国科学院长春应用化学研究所获得博士学位, 现在长春理工大学工作。主要从事光电成像器件与系统方面的研究。E-mail: songde614@163.com