

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

刘虎林 王兴 田进寿 赛小锋 韦永林 温文龙 王俊锋 徐向晏 王超 卢裕 何凯 陈萍 辛丽伟

High resolution electron bombarded complementary metal oxide semiconductor sensor for ultraviolet detection

Liu Hu-Lin Wang Xing Tian Jin-Shou Sai Xiao-Feng Wei Yong-Lin Wen Wen-Long Wang Jun-Feng Xu Xiang-Yan Wang Chao Lu Yu He Kai Chen Ping Xin Li-Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 014209 (2018) DOI: 10.7498/aps.20171729

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171729>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[利用表面微结构提高波长上转换红外探测器效率](#)

Improvement on the efficiency of up-conversion infrared photodetectors using surface microstructure

物理学报.2016, 65(10): 108501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.108501>

[红外波长上转换器件中载流子阻挡结构的研究](#)

Studies on carrier-blocking structures for up-conversion infrared photodetectors

物理学报.2015, 64(17): 178502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.178502>

[基于电子轰击式 CCD 的大动态条纹相机研究](#)

Research on large dynamic range streak camera based on electron-bombarded CCD

物理学报.2015, 64(9): 098501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.098501>

[光声内窥镜系统在人体直肠癌离体组织中的实验研究](#)

The human colorectal cancer tissue in vitro experimental study based on photoacoustic endoscopic system

物理学报.2014, 63(8): 084204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.084204>

[微通道板的饱和效应对条纹相机动态范围的影响分析](#)

Influence analysis of saturation effect of microchannel plate on dynamic range of streak cameras

物理学报.2012, 61(19): 194211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.194211>

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*

刘虎林 王兴[†] 田进寿 赛小锋 韦永林 温文龙 王俊锋 徐向晏
王超 卢裕 何凯 陈萍 辛丽伟

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 中国科学院超快诊断技术重点实验室, 西安 710119)

(2017年7月27日收到; 2017年8月30日收到修改稿)

基于真空紫外光电阴极和背照式互补金属氧化物半导体 (CMOS) 图像传感器研制了紫外光响应的电子轰击 CMOS (EBCMOS) 器件, 实现了 EBCMOS 器件在 40 mlx 光照度环境下的高分辨探测, 电子图像灰度随电子能量的变化呈现出极好的线性关系. 对器件成像分辨率测试的结果表明, 在电场强度为 5000 V/mm 时, 器件的空间分辨率可以达到 25 lp/mm, 与国际相关报道水平相当. 研制的 EBCMOS 器件可直接在紫外弱光探测领域应用, 如天文观察、高能物理、遥感测绘等, 同时也可为进一步研制可见光和近红外敏感的 EBCMOS 器件提供参考.

关键词: 互补金属氧化物半导体, 电子轰击增益, 微光成像, 紫外探测

PACS: 42.79.Pw, 84.45.-w, 85.60.Bt

DOI: 10.7498/aps.67.20171729

1 引言

极低照度微光成像^[1,2]是基于光电效应将微弱光子信号转化为电荷信号, 再将电荷信号放大后对信号进行采集、处理和显示的高新技术. 微光成像的最终目的是将探测灵敏度提高到单光子水平、具有微米级的空间分辨力、1 kHz 以上的成像速度以及极低的暗噪声.

目前的成像探测器大都基于电荷耦合器件 (CCD), 常用的几种探测器包括增强型 CCD (ICCD)^[3,4]、电子倍增型 CCD (EMCCD)^[5-7]、电子轰击型 CCD (EBCCD)^[8-10]. 其中 ICCD 是将真空像增强器与固体 CCD 器件通过光纤耦合并附加其他信号处理单元组合而成, 具有高灵敏度和高速成像的优点. 但由于成像过程要经历多次光电转换过程, 图像经多次传递后噪声增加, 成像质量下降. 同时, 光纤耦合与像增强器的引入也增加了器件的体积和重量, 使整体结构变得复杂. EMCCD 是一类具有单光子探测能力的成像器件, 通过在视

频信号和读出放大器之间增加一个具有二次电子倍增功能的倍增移位寄存器将电荷信号放大. 这种器件最大的优点是能够实现 512 以上的内部增益. 然而 EMCCD 中存在时钟感生电荷噪声, 会对成像质量有一定的影响. 为了降低噪声, EMCCD 必须工作在制冷模式, 这使得器件的成本、体积、重量和能耗都大大增加, 限制了其应用范围. EBCCD 是由光电阴极与 CCD 以近贴聚焦的结构组成的一种混合型光电器件. EBCCD 借助光电阴极产生的光电子, 从外置高压电源获得高能量轰击背照式 CCD 产生电子轰击半导体增益^[11]. EBCCD 减少了图像转换的物理过程, 显著提高了成像质量, 减小了体积和重量. 同时, 电子轰击半导体产生的增益可达 1000 以上, 且几乎没有增益噪声, 因此 EBCCD 具有极高的信噪比. 但是受限于 CCD 本身结构的缺陷, 其成像帧速率较低.

互补金属氧化物半导体 (CMOS) 图像传感器是另一种与 CCD 相竞争的器件. 与 CCD 相比, CMOS 有很多的优点^[12]: 1) 在 CMOS 传感器中,

* 国家自然科学基金 (批准号: 11304374) 和中国科学院创新基金 (批准号: CXJJ-16S015) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: wangxing@opt.ac.cn

每个像素都会连接一个放大器及模数转换电路, 用类似内存电路的方式将数据输出, 因此更容易获得高帧速率; 2) CMOS的信号是以点为单位的电荷信号, 与CCD以行为单位的电流信号相比更为敏感, 信号读出速度也更快; 3) CMOS的结构简单, 制造技术基于大规模集成电路工艺, 生产成本可以大幅降低; 4) CMOS的功耗远低于CCD; 5) CMOS易与周边电路集成. 正因为这些优点, 在EBCCD中将CCD更换为CMOS, 就可发展成一种高性能的图像传感器, 即EBCMOS (electron bombarded CMOS) 器件^[13-16]. EBCMOS器件由玻璃窗、真空光电阴极、真空腔、CMOS传感器、图像采集系统等组成. 入射光照射光电阴极产生光电子, 光电子在高压电场作用下被加速至固体CMOS传感器背部, 在高压电子轰击下硅层内部产生大量电子-空穴对从而将光电子信号放大, 被放大的信号最终通过视频电极输出. EBCMOS器件可通过电子轰击半导体材料产生高的增益, 与高量子效率光电阴极和高性能CMOS传感器结合, 具有高灵敏度、高帧速率、低噪声、低成本、低功耗和可进行单光子成像等优点, 是一种理想的微光成像器件.

作为一种新型的微光成像器件, EBCMOS的研制需要同时具有真空器件和固体器件的基础和技术, 其研究和研制还处于起步阶段, 目前只有美国的INTEVAC公司和法国的PHOTONIS公司在开展这方面的工作, 取得了很好的效果, 部分产品已在微光夜视、深海探测等领域得到了应用^[17,18]. 但关于紫外光照射条件下的实验研究却很少, 尤其是EBCMOS的分辨率与电场强度的直接关系未见报道. 目前, 我国在自主研制的EBCMOS器件研究方面的报道几乎为空白, 基本停留在少量理论^[19]和综述国外进展的状态^[18,20], 极大地限制了

EBCMOS器件在微光成像应用中的发展.

本文基于金属光电阴极与背照式CMOS图像传感器, 针对EBCMOS在紫外光波段潜在的应用, 首次研制了紫外光敏感的EBCMOS器件. 在优于 10^{-4} Pa真空条件下研究了EBCMOS的图像灰度增益与电子加速电压的关系, 并对EBCMOS的空间分辨率与电场强度的关系做了详细研究, 实现了空间分辨率达25 lp/mm的EBCMOS器件, 可在紫外单光子探测领域得到应用, 同时也可为进一步研制可见光和近红外EBCMOS器件提供参考和依据.

2 实验

EBCMOS器件的基本原理如图1(a)所示. 入射光打在光电阴极上产生光电子, 光电子在高压电场作用下被加速至CMOS背部, 在高压电子轰击下硅层内部产生大量电子-空穴对从而将光电子信号放大, 被放大的信号通过视频输出电极输出. 为了获得高的增益并提高器件的空间分辨率, 需要在光阴极与CMOS之间加上千伏的高压.

实验中采用的光源为汞灯, 辐射波长为253.7 nm, 在距离光阴极玻璃窗处的光照度为40 mlx. 光电阴极的材料为金, 采用电子束蒸发工艺在石英基底上形成, 厚度为20 nm, 在250 nm波长附近的光电转换效率约 3.6×10^{-6} . 背照式CMOS图像传感器包含 2048×2048 个像素, 每个像素的大小为 $11 \mu\text{m}$, 帧速率为48 Hz, 在275 nm处的量子效率为77%. CMOS芯片通过电极引线及陶瓷封接管壳连接, 陶瓷管壳外部的引脚再与图像采集电路连接, 从而实现电子图像的读出.

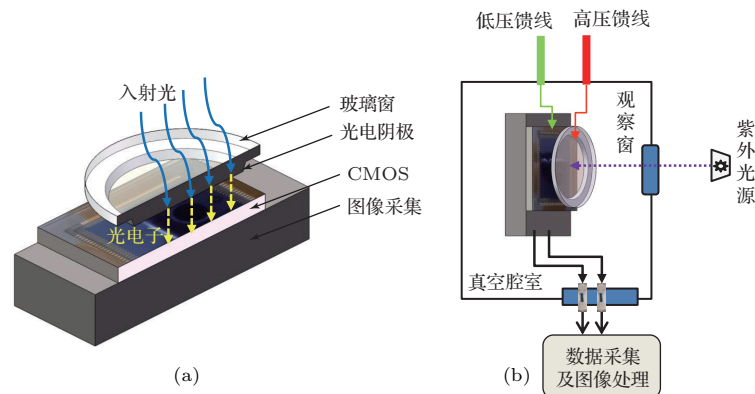


图1 (a) EBCMOS结构以及基本工作原理图; (b) EBCMOS测试方案图
Fig. 1. (a) Structure and principle of EBCMOS; (b) the experiment setup.

具体实验装置如图 1 (b) 所示, 其中光电阴极、CMOS 图像传感器和读出电路均放置于一个小的真空腔室内, 真空度小于 5×10^{-4} Pa. 该真空腔室具备紫外光入射、高压电极引线接入、低压电极引线接入、图像信号输出等多种功能. 在真空室外部安装有高压电源、图像信号输出线缆、数据采集卡以及显示器, 用于 EBCMOS 器件的信号传输与图像采集. 实验中, 采用高压电源实现对光电阴极电压的实时调整, 光电阴极与 CMOS 之间的距离则通过每次做完实验后将器件从真空室取出进行调节. 图像采集过程中 CMOS 图像的灰度等级设置为 12 bit, 积分时间为 20—200 ms.

3 实验结果与讨论

3.1 EBCMOS 器件的电子图像灰度增益

电子轰击半导体产生电子轰击增益是 EBCMOS 器件能实现微弱光探测的关键. 在测量电子图像的灰度增益时, 首先对光电阴极进行部分遮挡, 保证只有部分光入射至 CMOS 器件的感光面, 最大程度地降低图像的背景. 其次, 由于实验中采用的背照式 CMOS 器件对于 250 nm 波长的紫外光也有较高的探测效率, 为了区分光学图像与电子图像, 入射光方向为斜入射, 进而可以精确对电子图像灰度增益进行测量. 具体实验方案如图 2 (a) 所示. 从图中可以看出, 光照在阴极上以后, 由于遮挡物的阻挡, 部分光被挡住, 不能到达 CMOS 器件的背面, 即图中的黑色区域内不会产生光学图像; CMOS 背面有光照射的区域, 都会形成光学图像, 即图中绿色区域; 在光能到达 CMOS 背面同时阴极又没有被光阻挡的区域, 将会同时探测到 CMOS 自身的电子图像和阴极发射电子的电子图像; 在光照射到光阴极上但没有到达 CMOS 的区域, 则只有阴极发射电子的电子图像, 这部分图像由于没有光学图像的干扰, 非常适合电子图像的研究, 也是本文的主要研究区域.

EBCMOS 器件在不同电子加速电压情况下电子图像的灰度变化情况如图 2 (b) 所示, 光电阴极与 CMOS 之间的距离为 6 mm. 从图中可以看出, 在电子能量为 2000 eV 时基本看不到电子的图像, 而随着电子能量不断增加, 电子图像的亮度也越来越强, 图像的边缘也越来越清晰, 表明 EBCMOS 器件的图像增益和分辨率均随着电场强度的增大而

增大.

由于 CMOS 图像传感器的上表面还有一层约 100 nm 厚的保护层, 这个保护层的存在会使电子穿过该层进入半导体材料内部时损失能量. EBCMOS 器件的电子增益可由如下简化公式进行计算 [13]:

$$G_{\text{ebcmos}} = CE \times \frac{E - E_{\text{dead}}}{W},$$

其中, E 为电子能量, E_{dead} 为电子穿越死层所需的能量, W 为半导体内产生一个电子空穴对所需的能量, CE 为 CMOS 器件对于电子的收集效率. 因此, 当 $E > E_{\text{dead}}$ 时, EBCMOS 的电子增益与入射电子的能量成正比关系. 其次 CMOS 对于光学信号探测时, 成像灰度与入射光信号强度也呈现较好的线性. 可以预见, EBCMOS 电子图像的增益与入射电子能量也将具有较好的线性关系.

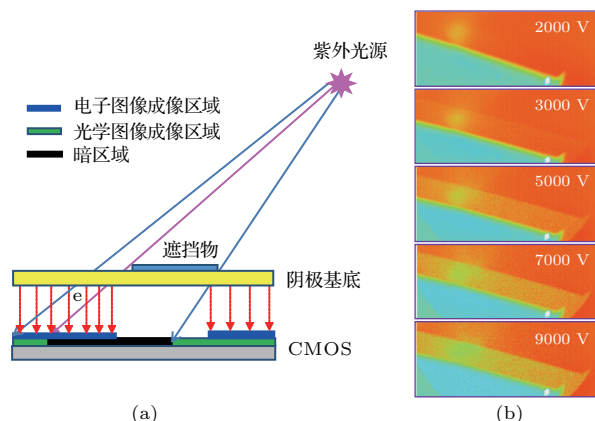


图 2 (a) 电子图像采集方案示意图; (b) 不同电子加速电压时 EBCMOS 器件的电子图像亮度变化图

Fig. 2. (a) Schematic diagram of electronic image acquisition; (b) EBCMOS electronic image brightness changes with different accelerating voltage.

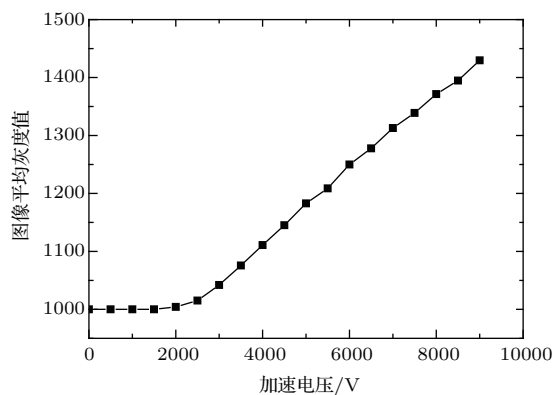


图 3 EBCMOS 电子图像灰度值与入射电子能量变化曲线
Fig. 3. Relationship of EBCMOS electronic image gray and electron energy.

对电子图像区域图像灰度值进行统计分析可得电子图像灰度值与电子能量的关系曲线如图3所示. 测量结果表明, 电子穿越CMOS器件死层所需的最小能量为约2500 eV, 当电子能量高于2500 eV后, 电子图像的灰度值与入射电子能量具有非常好的线性关系.

3.2 EBCMOS的空间分辨率

为了进行空间分辨率的测量, 得到EBCMOS的最佳分辨率, 首先需采用光刻和刻蚀的工艺在石英基底上形成具有不同宽度的条纹状图案. 该条纹图案分为7组, 每组包含4个相同宽度、占空比为50%的亮条纹, 7组图案的宽度分别为100, 50, 33, 25, 20, 17, 14 μm , 对应的空间分辨率分别为5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 lp/mm, 每个图案的长度均为3 mm.

实验中, 将光电阴极与CMOS之间的距离调节为1 mm, 电子加速电压由0 V逐渐增加至5000 V, 测量得到了不同加速电压情况下EBCMOS的分辨率变化, 如图4所示. 可以看出, 随着加速电压的增加, 电子图像的分辨率不断提高. 当加速电压为3500 V时, 可以清晰地分辨出第三组图案中的线条, 也即分辨率为15 lp/mm, 当电子加速电压增加至5000 V时, 可以分辨出第五组图案中的线条, 而线条再窄的图案则不能分辨, 此时EBCMOS的空间分辨率达到25 lp/mm. 根据图4中的结果, 可以得出不同电场强度下EBCMOS空间分辨率的变化, 如表1所列. 由表1可以看出, EBCMOS的分辨率与电场强度有关, 即与施加在光电阴极上的加速电压以及光电阴极与CMOS之间的距离有关, 为了获得高的空间分辨率, 需要减小光电阴极与CMOS之间的距离, 同时提高阴极的加速电压. 我们在实验中还测试了阴极与CMOS之间的距离为3 mm、加速电压为10000 V条件下的分辨率, 其值为10 lp/mm.

需要说明的是, 由于CMOS的像元尺寸为11 μm , 因此就CMOS自身而言可以达到45 lp/mm的极限分辨率. 然而, 由于阴极发射电子具有一定的角度分布, 从而在电子运动至CMOS光敏面时存在空间展宽效应, 因此EBCMOS的空间分辨率只能趋近45 lp/mm. 在现有的实验条件下, 可以通过进一步增加电子运动区域的电场强度提高空间分辨率. 此外, 也可以提升光电阴极的光电转换效率, 增加阴极发射的电子密度, 降低图像采集的曝

光时间, 通过提高EBCMOS器件的信噪比提高空间分辨率.

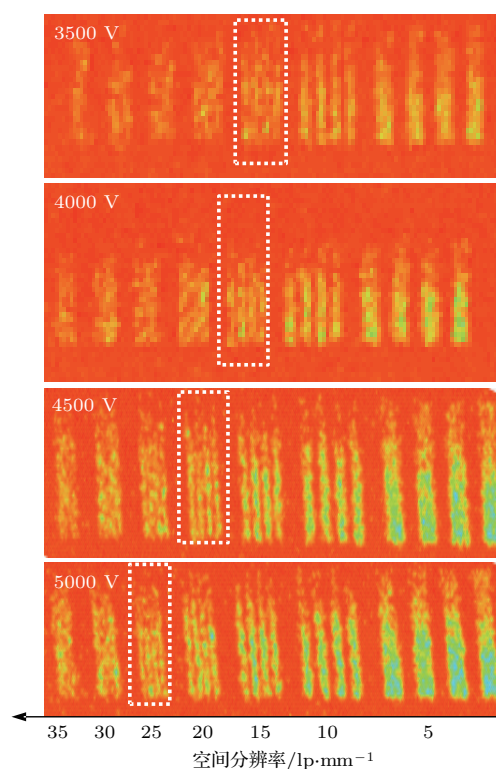


图4 不同加速电压情况下测得分辨率图

Fig. 4. The experimental result of spatial resolution with different accelerating voltage.

表1 不同电场强度下EBCMOS空间分辨率表

Table 1. The value of spatial resolution with different electric field intensity.

电场强度/ $\text{V}\cdot\text{mm}^{-1}$	3500	4000	4500	5000
空间分辨率/ $\text{lp}\cdot\text{mm}^{-1}$	15	15	20	25

此外, 上述结果是在40 mlx的光照度条件下测试得到的, 理论上, EBCMOS的弱光探测极限可小于 10^{-4} lx. EBCMOS的弱光探测极限主要受两方面因素的制约. 1) 光电阴极的量子效率. 高的量子效率意味着光子转换为电子的光电转换效率高, 因此会提高EBCMOS器件的弱光探测能力; 2) EBCMOS器件的电子轰击增益. 电子轰击增益主要由光电阴极的加速电压以及CMOS器件的阈值电压决定, 为了提高电子轰击的增益, 就需要提高加速电压, 同时使背照式CMOS器件的背部保护层的厚度足够小. 本文中为了实现紫外探测, 采用的光电阴极材料为金属金, 其量子效率很低, 比可见光光电阴极的量子效率低4个量级以上, 是制约弱光探测的主要因素. 如果将光电阴极材料换

为CsI或其他阴极材料,可有效提高EBCMOS器件的弱光探测能力.

4 结 论

EBCMOS作为新型的光电探测器件,结合了光电阴极的高灵敏度、电子轰击半导体的高增益和CMOS半导体器件的帧速率高、功耗低、数字化图像显示等优点,同时又具有制备结构简单、体积小、噪声低等特点,在天文观察、高能物理、微光夜视以及遥感测绘等领域具有广阔的应用前景.本文研制了紫外光敏感的EBCMOS器件,实现了EBCMOS器件在40 mlx光照度环境下的高分辨探测.研究表明电子轰击CMOS器件所需的阈值电压约为2500 V,探测图像的灰度随着电子加速电压的增加呈现较好的线性关系.对器件成像分辨率测试的结果表明,在电场强度为5000 V/mm时,器件的空间分辨率可达到25 lp/mm,与国际相关报道水平相当.本文研制的EBCMOS器件可直接在紫外弱光探测领域应用,同时也可为进一步研制可见光和近红外敏感的EBCMOS器件提供参考.

参考文献

- [1] Seitz P, Theuwissen A J P 2011 *Single-Photon Imaging* (Berlin Heidelberg: Springer) pp1-344
- [2] Jin W Q, Tao Y, Shi F, Li B Q 2013 *Infrared Laser Eng.* **11** 44 (in Chinese) [金伟其, 陶禹, 石峰, 李本强 2013 红外与激光工程 **11** 44]
- [3] Huiskamp T, Sengers W, Pemen A J M 2016 *Rev. Sci. Inst.* **87** 12
- [4] Qi L, Just F, Leuchs G, Chekhova M V 2016 *Opt. Express* **24** 23
- [5] Mortensen K I, Flyvbjerg H 2016 *Sci. Rep.* **6** 28680
- [6] Denvir D J, Conroy E 2003 *P. Soc. Photo-Opt. Ins.* **4796** 164
- [7] Robbins M S, Hadwen B J 2003 *IEEE Trans. Electron Dev.* **50** 5
- [8] Hirvonen L M, Jiggins S, Sergent N, Zanda G, Suhling K 2015 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **787** 1
- [9] Hirvonen L M, Barber M J, Suhling K 2016 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **820** 121
- [10] Zuo F, Gao Y, Gao Z Y, Lui G R 2003 *Opt. Tech.* **9** 2 (in Chinese) [左昉, 高岳, 高稚允, 刘广荣 2003 光学技术 **9** 2]
- [11] Aris S, David J B, Aaron B 1974 *Proc. IEEE* **62** 8
- [12] Pierre M 2003 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **504** 199
- [13] Barbier R, Baudot J, Chabanat E, Depasse P, Duliniski W, Estre N, Kaiser C T, Laurent N, Winter M 2009 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **610** 54
- [14] Verle W, Kenneth A C, Philip W A, Patrick G, Stephen J G 2005 *OPTRON International Symposium Paris, France May* **10** 2005
- [15] Hirvonen L M, Suhling K 2016 *Sensors* **16** 5
- [16] Cajgfinger T, Dominjon A, Barbier R 2015 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **787** 176
- [17] Dominjon A, Ageron M, Barbier R, Billault M, Brunner J, Cajgfinger T, Calabria P, Chabanat E, Chaize D, Doan Q T, Guerin C, Houles J, Vagneron L 2012 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **695** 172
- [18] Xiong Z P, Li Q, Wang Q 2012 *Laser & Infrared* **42** 7 (in Chinese) [熊智鹏, 李琦, 王琪 2012 激光与红外 **42** 7]
- [19] Song D, Shi F, Li Y 2016 *Infrared Laser Eng.* **45** 2 (in Chinese) [宋德, 石峰, 李野 2016 红外与激光工程 **45** 2]
- [20] Xu P X, Tang G H, Tang J Y, Yang J, Chen X L, Zhong W J, Zhao W J 2016 *Opt. Tech.* **36** 4 (in Chinese) [徐鹏霄, 唐光华, 唐家业, 杨杰, 陈鑫龙, 钟伟俊, 赵文锦 2016 光电子技术 **36** 4]

High resolution electron bombarded complementary metal oxide semiconductor sensor for ultraviolet detection*

Liu Hu-Lin Wang Xing[†] Tian Jin-Shou Sai Xiao-Feng Wei Yong-Lin
Wen Wen-Long Wang Jun-Feng Xu Xiang-Yan Wang Chao
Lu Yu He Kai Chen Ping Xin Li-Wei

(Key Laboratory of Ultra-fast Photoelectric Diagnostics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(Received 27 July 2017; revised manuscript received 30 August 2017)

Abstract

High resolution and high sensitive low light level imaging sensors are crucial in many applications such as astronomical observation, high energy physics, night vision and remote sensing. The electron bombarded complementary metal oxide semiconductor (EBCMOS) sensor is a novel imager in which very high gain can be produced by hitting the semiconductor with high voltage without any noise generation. In addition, it can process high-definition image with kHz frame rate. These advantages make the EBCMOS an ideal device for ultrafast single-photon imaging. In this article, we present an EBCMOS sensor working in the ultraviolet range by combining the technology of vacuum photocathode and back illuminated CMOS together. This EBCMOS sensor can realize very high resolution in 40 m \times light illumination environment. The achieved spatial resolution is 25 lp/mm (line pairs per millimeter) when the electric field intensity is 5000 V/mm. The linear relation between electric field intensity and the resolution indicates that much better performance can be achieved if the electric field intensity increases to a much higher value. The EBCMOS sensor developed in this paper can be directly applied to UV weak light detection, moreover it will provide a good reference for further developing the visible and near infrared sensitive EBCMOS sensors.

Keywords: complementary metal oxide semiconductor, electron bombarded gain, low light level imaging, UV detection

PACS: 42.79.Pw, 84.45.-w, 85.60.Bt

DOI: 10.7498/aps.67.20171729

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11304374) and the Innovation Foundation of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. CXJJ-16S015).

[†] Corresponding author. E-mail: wangxing@opt.ac.cn