

doi:10.3788/gzxb20174606.0604002

# CMOS 传感器紫外敏化膜层的厚度 优化及其光电性能测试

刘琼, 马守宝, 钱晓晨, 阮俊, 卢忠荣, 陶春先

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海市现代光学系统重点实验室,  
教育部光学仪器与系统工程研究中心, 上海 20009)

**摘 要:**采用真空热阻蒸方式在 CMOS 图像传感器感光面上镀制不同厚度性价比高的 Lumogen 薄膜。研究发现不同 Lumogen 薄膜厚度的 CMOS 传感器的暗电流噪声未发生明显变化,说明真空热蒸发方式对互补金属氧化物半导体器件本身未造成热损伤;光响应非均匀度随膜厚增加而增大;动态范围却随膜厚增加而减小;量子效率随膜厚增加呈现先增大后减小。同时,研究发现敏化膜层最佳厚度为 389 nm,此时 CMOS 传感器的量子效率提高了 10%,且光响应非均匀度,动态范围均在相对较好的范围内。

**关键词:**传感器技术;薄膜技术;紫外敏化;互补金属氧化物半导体传感器;荧光材料;量子效率;动态范围

中图分类号:TN206; TN209

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)06-0604002-6

## Thickness Optimization and Photoelectric Performance Test of UV Sensitized Film of CMOS Sensor

LIU Qiong, MA Shou-bao, QIAN Xiao-chen, RUAN Jun, LU Zhong-rong, TAO Chun-xian

(Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, School of Optical~Electrical and Computer  
Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** The Lumogen as a low-cost organic material is deposited on the surface of the CMOS imaging sensor using a vacuum thermal evaporation system. The constant dark current noise of the CMOS is shown that no damage to the CMOS is caused in the process of the depositing film. The photo response nonuniformity is increased while the dynamic range is decreased with the argument of the Lumogen-film thickness. Furthermore, the quantum efficiency is increased firstly and then decreased and reach to the optimum 10% when the thickness of the Lumogen film is 389 nm. Meanwhile, the photo response nonuniformity and dynamic range are in a relatively good condition.

**Key words:** Sensor technology; Thin film technology; Ultraviolet sensitizing; Complementary Metal Oxide Semiconductor(CMOS); Quantum efficiency; Dynamic range

**OCIS Codes:** 040.0040; 040.1490; 310.0310

## 0 引言

随着互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)工艺技术的不断发展,CMOS 图像传感器广泛应用到紫外刑侦探测仪、宽光谱及高光谱仪等科学仪器开发领域<sup>[1]</sup>。针对宽波段探测需求,尤其是紫外特征峰及紫外激发荧光信号的高灵敏捕获需求,国内外芯片厂家研究开发了不同的制造方案,其中高端光谱仪采用的背照式图像传感器采用芯片减薄和减反射的复杂工艺,在增强紫外响应的同

基金项目:上海高校青年教师培养资助计划

第一作者:刘琼(1992-),女,硕士研究生,主要研究方向为高灵敏宽光谱紫外 CCD 探测器应用研究. Email:liuqiong0322@126.com

导师(通讯作者):陶春先(1981-),男,博士,讲师,主要研究方向为功能性光学薄膜及其应用等. Email:tao@usst.edu.cn

收稿日期:2017-01-06;录用日期:2017-03-01

<http://www.photon.ac.cn>

时存在云纹信号干扰等问题. 国外对有机荧光材料制备成薄膜的稳定性<sup>[2]</sup>做过部分研究, 即薄膜对强紫外光和可见光、较高的温度下具有高耐受性的特征, 为实验的可行性提供了依据. 而本文采用在常规 CMOS 芯片表面的紫外敏化镀膜工艺是一种低成本、高效率的技术<sup>[3-5]</sup>. 本文采用的是价格低廉, 并与 CMOS 图像传感器响应匹配度高的 Lumogen 有机荧光材料. Lumogen<sup>[6-11]</sup>有机荧光材料主要吸收 200~500 nm 紫外波段范围的光, 然后转化为 450~650 nm 波段的可见光.

敏化镀膜工艺优化对最优膜厚参量的选择以及对应的粗糙度、内吸收效应等将直接影响镀膜芯片的光电性能参量. 本文针对当前紫外探测仪器对高灵敏度、大视场探测的需求, 对上述镀膜工艺下的发光机制进行了系统地分析研究. 为得到 CMOS 敏化镀膜器件的最佳光电性能, 采用热蒸发方式在 CMOS 传感器上镀制不同厚度的紫外敏化膜层. 通过对 CMOS 传感器光电性能参量的系统测量, 研究特定镀膜工艺下不同膜厚的 CMOS 器件的光电性能, 包括量子效率、动态范围、光响应不均匀性、以及暗电流噪声等.

## 1 实验

### 1.1 样品制备

图像传感器样品和石英基片样品制备主要利用 ZZS~800 型镀膜机, 采用真空热阻蒸方式制备. 镀膜所用的芯片是来自陆华公司的 DMK22CUA03 单色相机, 镀膜部分为镜头的 CMOS 图像传感器.

镀制光学薄膜过程主要包括镀膜前期准备和样品镀膜. 首先, 镀膜前期准备主要是除窗. 芯片就是用工具将 CMOS 图像传感器从镜头拆卸出来, 除窗处理后直接镀膜. 样品镀膜步骤如下: 1) 将 CMOS 图像传感器和石英基片样品固定在工件盘上. Lumogen 膜料放置在钼舟上预蒸镀; 2) 实验的本底真空度设置为合适的真空度值  $1 \times 10^{-3}$  Pa<sup>[12]</sup>; 3) 蒸镀. 本底真空达到  $1 \times 10^{-3}$  Pa 后, 预融膜料, 蒸镀速率保持在 1.5 A/S~2.0 A/S, 可一定程度地减小膜层表面粗糙度. 为保证膜层均匀性沉积过程中工件盘旋转速率保持  $30 \text{ rad} \cdot \text{min}^{-1}$ <sup>[12]</sup>; 4) 监控. 镀膜中采用晶体膜厚仪编程自动控制镀膜速率和厚度.

### 1.2 样品测试方法

CMOS 图像传感器的测量采用的是 CCD/CMOS 成像评价系统. CCD/CMOS 成像评价系统是上海理工大学微纳光学实验室与台湾光焱科技有限公司共同依据欧洲视觉协会制定的 EMVA1288 标准共同搭建而成, 其通用性强、准确度高, 稳定性高. 该评价系统利用 NI~MAX 软件进行相机本身控制参量的设定, 其次采用 Photon Transfer Method 计算可见光激发下的相机光电性能参量数值, 最后通过 Photon Transfer Method 计算出的系统增益值  $K$  测试出设定光谱范围的量子效率数值. 该测试装置能够精确、稳定地测量 CMOS 传感器的量子效率和其他光电性能参量. 实验利用测试系统研究量子效率在紫外波段的变化趋势, 以及可见光波段范围 CMOS 传感器的光电性能参量的数值变化. 在可见光波段范围测量光电性能参量(包括暗电流噪声、光响应非均匀度、动态范围等)时, 实验采用的是激发波长为 530 nm 的激发光, 其主要原因是 Lumogen 有机材料的最佳发射波长在 530 nm.

石英基片样品分别采用 XP-1 台阶仪对薄膜厚度进行测试, 分光光度计对透射光谱进行测试 AFM 原子力显微镜对薄膜表面粗糙度进行测试. 其中理论厚度为 350 nm、400 nm、450 nm、496 nm 的薄膜层实际厚度分别为 334 nm、389 nm、441 nm、496 nm.

## 2 测试结果及分析

### 2.1 暗电流噪声

图像成像器件在既无光注入又无电注入情况下的输出信号称暗信号, 即暗电流<sup>[13]</sup>. 图 1 中暗电流噪声数值可以看出芯片本身引起的噪声数值是  $1.7734 \mu\text{V}$ . 薄膜厚度为 334 nm、389 nm、441 nm 和 496 nm 的样品暗电流数值分别为  $1.7544 \mu\text{V}$ 、 $1.8137 \mu\text{V}$ 、 $1.7462 \mu\text{V}$ 、 $1.7802 \mu\text{V}$ . 在镀膜前后芯片的暗电流噪声数值上虽有起伏变化, 但是从总体上保持稳定趋势. 这充分说明在蒸镀过程中, 真空室内的温度并没有对器件本身造成损伤, 也进一步体现了热蒸发蒸镀方式的优势. 暗电流噪声的变化可以在一定程度上说明, 真空热蒸发蒸镀的方式是否对 CMOS 图像传感器本身造成影响.

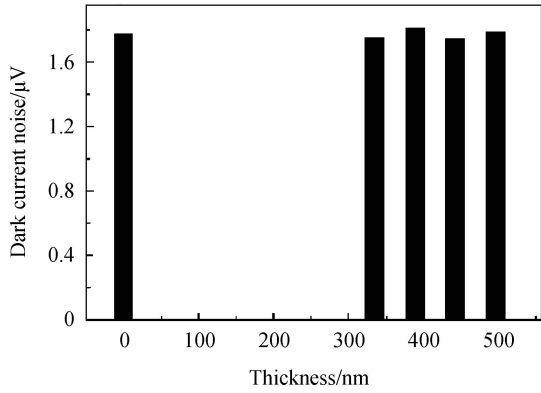


图1 四种膜层厚度下的暗电流噪声

Fig. 1 Dark current noise under different film thickness

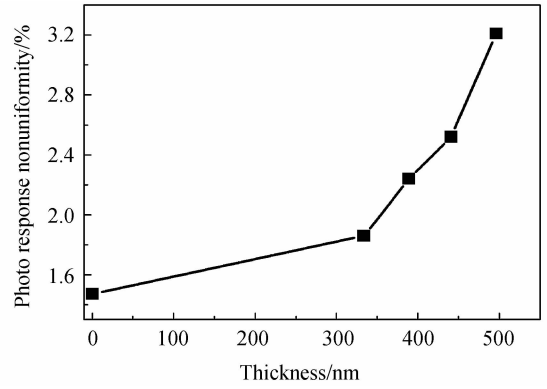


图2 四种膜层厚度下的光响应非均匀度

Fig. 2 Photo response nonuniformity under four different film thickness

## 2.2 光响应非均匀度

CMOS 传感器器件光电转换的非均匀性是影响图像质量的主要因素之一<sup>[14]</sup>. 光响应非均匀度(Photo Response Nonuniformity, PRNU)为 50%饱和曝光量,各像素输出信号标准偏差与平均值之比<sup>[15]</sup>为

$$PRNU = \frac{\sqrt{S_{y,50}^2 - S_{y,dark}^2}}{\mu_{y,50} - \mu_{y,dark}} \quad (1)$$

式中  $S_{y,50}^2$  与  $S_{y,dark}^2$  分别为 50%饱和曝光量下和暗背景下的空间变异数<sup>[15]</sup>. 实验运用上述测试装置测试了不同背景下的灰阶信号值和空间变异数,然后根据公式 1 计算出镀制紫外敏化层不同厚度下 CMOS 传感器的光响应非均匀度数值,如图 2 所示.

从图 2 中可以看出,CMOS 图像传感器在镀制四种几何厚度的 Lumogen 薄膜后,CMOS 图像传感器的光响应非均匀度从未镀膜的 1.47% 逐渐增大到 496 nm 厚度的 3.21%. 334 nm、389 nm、441 nm 薄膜层厚度下的光响应非均匀度的数值分别为 1.86%、2.24%、2.52%. 随着薄膜层厚度的增加,其光响应非均匀度的数值逐渐增大,其中 496 nm 的数值为 3.21%. 通过图 3 可以发现 CMOS 图像传感器的表面粗糙度随着薄膜层厚度的增加而逐渐增大,其表面粗糙度数值由 19.5 nm 增加至 25.1 nm. 光响应非均匀度数值增大主要因

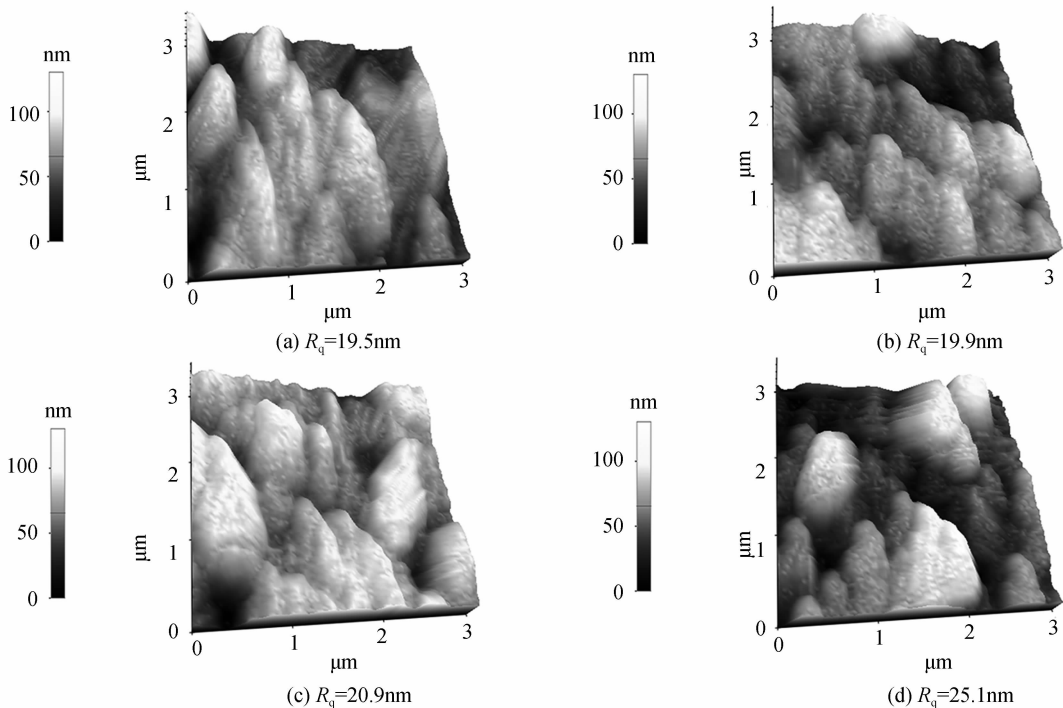


图3 四种膜层厚度的表面粗糙度数值图

Fig. 3 Surface roughness under four different film thickness

为薄膜膜层表面粗糙度的影响. 由于膜层厚度和表面粗糙度的变化, 入射光到达膜层表面时, 会出现不同程度的漫反射. 因此, 当光束透过薄膜层后, 部分出射光线光束会出现减弱, 光敏面接收到的入射光照度出现一定程度的不均匀性, 进而影响了器件本身所接收到入射光强度的均匀性.

### 2.3 动态范围

动态范围(Dynamic Range, DR), 对于感光元件而言, 表示图像中所包含的从“最暗”至“最亮”的范围. 其定义为饱和照射光子数( $\mu_{p, sat}$ )与最小可侦测照射光子数( $\mu_{p, min}$ )<sup>[15]</sup>为

$$DR = 20 \log \frac{\mu_{p, sat}}{\mu_{p, min}} \quad (2)$$

图像传感器的动态范围越大, 其能记录的暗部细节和亮部细节越详细. 测试系统采用 KE6485 皮安表来测量光照在标准探测器上时电流大小, 以此表示光能量的大小, 最后反推出光子数  $\mu_p$ . 实验根据公式 2 计算出各个膜层厚度下的动态范围数值, 如图 3 所示.

由图 4 可以看出随着膜层几何厚度的增大, 在可见光波段的透过率逐渐降低. CMOS 图像传感器的透过率虽在可见光波段下降, 但是其透过率仍在 70% 以上. 这说明入射光可以穿透薄膜层到达光敏面被其接收. 图 5 中 CMOS 图像传感器的动态范围随薄膜层厚度增加而逐渐减小. 334 nm、389 nm、441 nm、496 nm 厚度下的动态范围数值分别为 53.09 dB、52.21 dB、51.6 dB、51.5 dB. 未镀膜的 CMOS 图像传感器的动态范围数值为 53.2 dB. 动态范围数值直接反映的是图像的亮暗程度差值. 动态范围数值变化原因主要是膜层厚度增大和透过率随之减小影响光子数的数量, 即透过率减小直接改变了光敏面的入射光强度, 从而使得产生的饱和照射光子数减少.

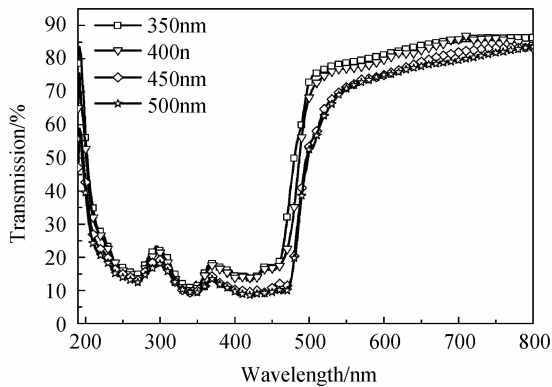


图 4 四种膜层厚度下的透射光谱

Fig. 4 Transmission under different film thickness

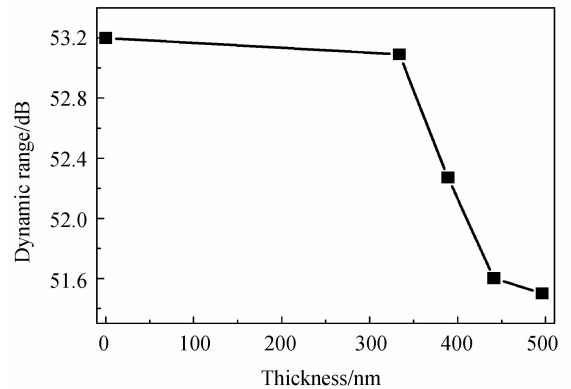


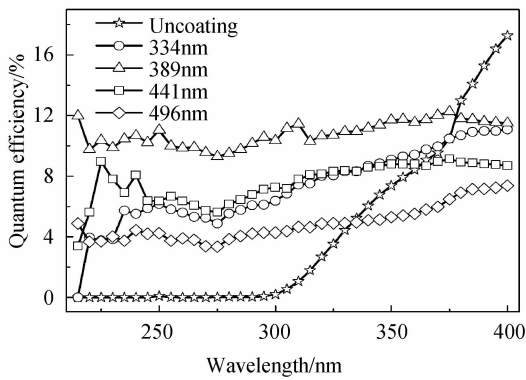
图 5 四种膜层厚度下的动态范围数值

Fig. 5 Dynamic range under different film thickness

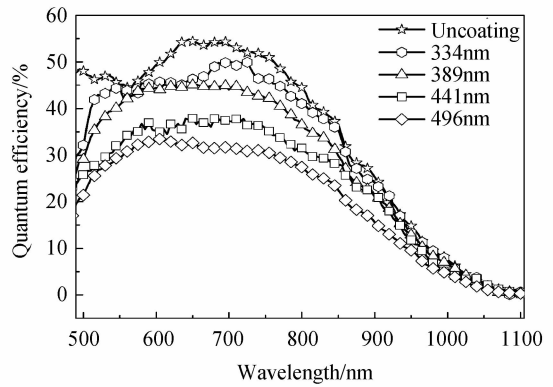
### 2.4 量子效率

由图 6(a) 可看出, 镀制四种几何厚度的 Lumogen 薄膜均能不同程度地提高 CMOS 图像传感器的量子效率. 从化学分子角度来说 Lumogen 材料本身具有光致发光的必要条件, 即 Lumogen 分子中具有能够吸收紫外或可见光并引起电子跃迁的基团(生色团), 如 C=N 键, 同时该分子中还具有能使吸收峰向近紫外波段移动的带有杂原子的饱和基团(助色团). 因此, Lumogen 薄膜能够吸收紫外波段的光, 将其转换为可见光, 从而被 CMOS 图像传感器探测到, 这样 CMOS 器件本身就能间接地探测到紫外波段的光.

几何厚度的不同对量子效率的提高程度也是不一样的. 其中镀制几何厚度为 389 nm 的 Lumogen 薄膜的 CMOS 图像传感器的量子效率提高最为明显, 在紫外波段提高了 10% 左右. 总体来说, 在紫外波段, 随着 Lumogen 薄膜几何厚度的变化, 量子效率呈现先增大后减小的趋势. 薄膜几何厚度为 334 nm 相比几何厚度为 389 nm 的 CMOS 图像传感器的量子效率提高了 3% 左右. 图 6(b) 中可以看出在可见光波段, 已镀膜的 CMOS 图像传感器的量子效率相比未镀膜传感器的量子效率有不同程度地下降. 随着紫外敏化膜层厚度的增加, CMOS 图像传感器的量子效率呈现递减的变化趋势. 其中膜层为 496 nm 厚的 CMOS 图像传感器的量子效率相比于未镀膜 CMOS 图像传感器的量子效率下降了约 20%. 334 nm 和 389 nm 厚度下的 CMOS 图像传感器的量子效率下降数值较小, 数值大概在 7% 左右.



(a) Quantum efficiency of in the 200~400nm



(b) Quantum efficiency of in the 490~1100nm

图 6 四种膜层厚度下的 CMOS 图像传感器在紫外波段范围内的量子效率  
Fig. 6 Quantum efficiency of COMS in the ultraviolet band range under four different film thickness

上述主要原因是几何膜厚的增加提高了生色团和助色团的数量,提升了薄膜对紫外光的吸收能力.随着薄膜几何厚度的进一步增加,CMOS 图像传感器的量子效率逐渐降低.原因是薄膜膜层几何厚度增大导致激发光束透过膜层到达光敏面的能力逐渐降低,即薄膜透过率降低.但是,实验过程中尽可能控制实验条件的一致性,避免实验中实验条件的差异导致在同一厚度下的表面粗糙度不同.为了保证 CMOS 图像传感器在紫外波段有较高的响应,同时不影响 CMOS 图像传感器在可见光波段的响应,紫外敏化膜层的最佳几何厚度为 389 nm.由于工艺条件差异性,实验建议薄膜厚度在 334~389 nm 之间.

从图 7 可以看出同一厚度下不同表面粗糙度的 CMOS 图像传感器的量子效率值差异不大,样品表面粗糙度值为 25.12 nm 的量子效率值略高于样品表面粗糙度为 28.1nm 的量子效率值.这说明不同表面粗糙度值对量子效率数值有一定的影响,但影响并不明显.表面粗糙度在同一厚度下差值较大时,其膜层表面对入射光的散射会相应增大,膜层的透射光通量值会有所下降,从而影响到感光面接收的光子数,然后直接影响量子效率的数值.为保证数据准确性,在实验中控制样品制备条件一致性是非常重要的.

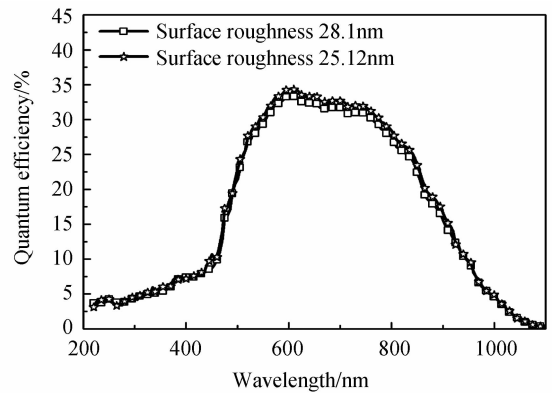


图 7 500 nm 理论厚度下二种不同表面粗糙度 CMOS 芯片的量子效率图  
Fig. 7 The quantum efficiency figure of the two CMOSs with different surface roughnesses under the same theoretically 500 nm thin film layer

### 3 结论

为了提高 CMOS 传感器在紫外波段灵敏度,拓宽 CMOS 传感器的光谱响应范围,使用真空热阻蒸发的方式在 CMOS 图像传感器上镀制四种几何厚度的 Lumogen 薄膜,利用实验室搭建的 CCD/CMOS 成像评价系统对结果进行测试.结果表明 CMOS 图像传感器在采用真空热阻蒸发镀膜前后,其器件本身没有受到影响. CMOS 图像传感器的光响应非均匀度随着膜层几何厚度的增加,呈现出线性增加的趋势,但是 CMOS 图像传感器的动态范围数值随着膜层几何厚度的增加,呈现出线性减小的趋势.薄膜本身对 CMOS 图像传感器在紫外波段灵敏度的提高会有一个最佳值的存在,并非越厚越好.实验通过对 CMOS 图像传感器的量子效率的测试结果分析,可以更好地确认 Lumogen 薄膜几何厚度在 389 nm 时,CMOS 图像传感器在紫外波段的响应是最佳的,量子效率提高了 10%.由于工艺条件的差异性以及操作人员不同,建议最佳膜厚范围为 334~389 nm.实验确定了 Lumogen 薄膜的最佳几何厚度以及对其它性能参量的变化趋势的研究,对推动国内外 CMOS 图像传感器的研发和紫外波段探测工作具有重要意义.

## 参考文献

- [1] JOOST S. Development and application of image sensor[M]. China Public Security, 2015: 86-87.  
Joost Seijnaeve. 图像传感器的发展及应用现状[M]. 中国公共安全, 2015: 86-87.
- [2] MICHAL A D, ANDREW A B. Stability of lumogen film on CCDs[J]. *The International Society for Optical Engineering*, 2013, **2415**: 205-210.
- [3] WANG Li-hui, WANG Xiao-kun, CHEN Bo, *et al.* Study of ultraviolet and extreme ultraviolet phosphors for imaging detector[J]. *Optical Technique*, 2006, **32**: 479-481.  
王丽辉, 王孝坤, 陈波, 等. 增强 CCD 紫外和极紫外成像的荧光物质的研究[J]. 光学技术, 2006, **32**: 479-481.
- [4] TIAN Xin, ZHANG Da-wei, HUANG Yuan-shen, *et al.* Research progress in thin film technology applied in UV enhanced image sensors[J]. *Laser Journal*, 2008, **29**(5): 9-10.  
田鑫, 张大伟, 黄元申, 等. 成像器件紫外增强薄膜技术研究进展[J]. 激光杂志, 2008, **29**(5): 9-10.
- [5] LIU Meng, ZHANG Da-wei, XIE Pin, *et al.* Investigation in UV-enhanced coatings based on Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>:Mn for image sensors[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2009, **9**(9): 12-14.  
刘猛, 张大伟, 谢品, 等. 增强光电图像传感器紫外探测薄膜的制备[J]. 仪表技术与传感器, 2009, **9**(9): 12-14.
- [6] DU Chen-guang, SUN Li-qun, DING Zhi-tian, *et al.* Experiment study of enhancing CCD ultraviolet response using coronene[J]. *Optical Technique*, 2010, **36**(5): 735-757.  
杜晨光, 孙利群, 志田. 利用晕苯增强 CCD 紫外响应的实验研究[J]. 光学技术, 2010, **36**(5): 735-757.
- [7] BASF A G. Technical Information; Lumogen J Yellow S 0790. Germany; BASE SE, 2005, 1.
- [8] WENDY A R, FRANKS, MARTIN J K, *et al.* Inorganic phosphor coatings for UV responsive CCD image sensors[J]. *The International Society for Optical Engineering*, 2000, **33**: 33-41.
- [9] BEBEK C J, EMES J H, GROOM D E, *et al.* CCD development for the dark energy spectroscopic instrument[J]. *IOP Science*, 2015: 1-10.
- [10] ZHANG Da-wei, TIAN Xin, HUANG Yuan-shen, *et al.* Preparation and spectral characterization of lumogen coatings for UV responsive CCD image sensors[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(5): 1171-1174.  
张大伟, 田鑫, 黄元申, 等. CCD 紫外敏感 lumogen 薄膜制备与光谱表征[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, **30**(5): 1171-1174.
- [11] JIANG Lin, ZHANG Da-wei, TAO Chun-xian, *et al.* Preparation by spin coating technology and characterization of UV~enhanced lumogen film[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, **33**(2): 468-470.  
姜霖, 张大伟, 陶春先, 等. 紫外增强 lumogen 薄膜旋涂法制备及其性能表征[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, **33**(2): 468-470.
- [12] LU Zhong-rong, NI Zheng-ji, TAO Chun-xian, *et al.* The research of UV-responsive sensitivity enhancement of fluorescent coating films by MgF<sub>2</sub> layer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, **34**(3): 709-712.  
卢忠荣, 倪争技, 陶春先, 等. MgF<sub>2</sub> 薄膜对荧光薄膜紫外响应灵敏度的增强特性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, **34**(3): 709-712.
- [13] REN Hang, ZHANG Tao. Study on grade CCD camera reduction noise[J]. *Microcomputer Information*, 2009, **25**(2): 129-131.  
任航, 张涛. 科学级 CCD 相机的降噪技术研究[J]. 微计算机信息, 2009, **25**(2): 129-131.
- [14] HAN Cai-qin, TAO Yue-zhen, LI Hua, *et al.* Research for response nonuniformity of digital CCD camera in different intensity of illumination[J]. *Journal of Jiangxi Normal University*, 2009, **33**(4): 398-400.  
韩采芹, 陶跃珍, 李华, 等. 不同光照条件下数字 CCD 相机响应不均匀性研究[J]. 江西师范大学学报, 2009, **33**(4): 398-400.
- [15] EMVA Standard 1288; Standard of characterization of image sensors and cameras. Release 3, 0, 2010, 11: 5-9.