

## 宽谱光源对 CMOS 阵列电串扰的影响

赖莉萍<sup>1</sup>, 付 博<sup>2</sup>, 张蓉竹<sup>1</sup>

- (1. 四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064 ;
2. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** CMOS 阵列探测器中, 像素单元间的串扰会影响其成像质量。为了解不同光源对 CMOS 电串扰的影响, 针对 CMOS 图像传感器的电串扰特性建立了一个分析模型, 结合 CMOS 图像传感器的工作原理定量计算了单色光、宽谱光源入射条件下的电串扰特性。分析结果表明 CMOS 图像传感器的电串扰随单色光波长、宽谱光源谱宽和中心波长的增大而增大, 但中心波长与单色光波长相同的宽谱光源, 其对电串扰的影响大于单色光。辐照功率为 600  $\mu\text{W}$ , 单色光波长为 1 064 nm, 电串扰大小约为 50.611 mV; 宽谱光源中心波长为 1 064 nm, 谱宽为 400 nm 时, 电串扰的大小约为 50.914 mV, 相比于单色光电串扰增加了约 0.303 mV。

**关键词:** 宽谱光源; 阵列探测器; CMOS 图像传感器; 电串扰

**中图分类号:** TN211 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0120005

## Effect of broadband sources on electrical crosstalk of CMOS array

Lai Liping<sup>1</sup>, Fu Bo<sup>2</sup>, Zhang Rongzhu<sup>1</sup>

- (1. School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China;
2. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyan 621900, China)

**Abstract:** The crosstalk between the pixel units is the key parameter for the imaging quality of CMOS array detector. The mathematical analysis model of the electrical crosstalk was established in order to explore the influence of different light sources on the electrical crosstalk of CMOS. Furthermore, the characteristics of electrical crosstalk under the illumination of monochromatic light and broadband sources were also numerically simulated. The results show that, the electrical crosstalk increases with the increase of the wavelength of monochromatic light, as well as the spectrum bandwidth and the center wavelength of broadband sources. Moreover, the impact of broadband sources on the electrical crosstalk is greater than monochromatic light when their center wavelengths are the same. The electrical crosstalk for the monochromatic light with the radiation power of 600  $\mu\text{W}$  and the wavelength of 1 064 nm is about 50.611 mV, and the electrical crosstalk for broadband source with the spectrum bandwidth of 400 nm is about 50.914 mV in the same radiation power and wavelength. Consequently, the electrical crosstalk of broadband source increased by about 0.303 mV compared to the monochromatic light.

**Key words:** broadband sources; array detector; CMOS image sensors; electrical crosstalk

收稿日期: 2016-05-20; 修订日期: 2016-06-17

基金项目: 四川省教育厅创新团队资助项目(13TD0048)

作者简介: 赖莉萍(1991-), 女, 硕士, 主要从事光电子技术方面的研究。Email: lailiping\_ll@sina.cn

通讯作者: 张蓉竹(1975-), 女, 教授, 博士, 主要从事光学精密检测及光电子技术方面的研究。Email: zhang\_rz@scu.edu.cn

## 0 引言

互补金属氧化物半导体器件(CMOS)图像传感器于 20 世纪 70 年代诞生于美国,但由于与 CCD 相比,其尺寸较大及性能较差,使其没有被广泛的投入到商业应用中。然而,20 世纪 90 年代以后随着大规模集成电路技术的不断发展,过去 CMOS 图像传感器所存在的问题开始找到了相应的解决办法,从而逐渐改善了 CMOS 图像传感器的成像质量,使 CMOS 图像传感器得到迅速发展。如今,CMOS 图像传感器已成为光电子成像领域重要的图像传感器。作为摄录相机、安全保卫照相机和图像导引头的关键部件,被广泛应用于测量、监控、制导、识别、侦察等民用和军用领域。

CMOS 图像传感器中每一个感光元件都直接整合了信号放大器和模数转换器,只需要单一的工作电源,在采集光信号的同时就可以读取电信号,信号读取相对简单,还能实时处理各像素的图像信息。但实际应用中发现入射光照范围内,像素间存在一定的串扰,像素间串扰是指相邻的像素间互相干扰的现象,即图像传感器中特定的像素产生的响应,不仅取决于该像素的入射光,而且还受其相邻的其他像素的影响,从而对成像质量造成影响。因此 CMOS 图像传感器在激光辐照下的串扰问题一直受到人们的关注。

以往人们对串扰做了大量的研究,Brouk I 和 Nemirovsky Y<sup>[1]</sup> 实验测量了波长分别为 543 nm 和 633 nm 的光源辐照下 CMOS 像素间的串扰,并在光电二极管中设计了一种双层结来减小串扰。Shcherback I 和 Yadid-Pecht O 等人<sup>[2-5]</sup>,通过实验观测提出了 CMOS 图像传感器像素间电串扰的分析模型并通过实验进行了验证。Chien-Hsien Tseng 和 Shou-Gwo Wu 等人<sup>[6]</sup> 提出通过改进减薄外延层和气隙保护环技术来减小串扰。这些研究都是针对单色光来进行实验分析的,而对宽谱光源辐照下 CMOS 产生的电串扰特性分析甚少。文中基于前照式有源 CMOS 图像传感器像素间的电串扰模型,结合 CMOS 的工作原理分析了单色光波长、宽谱光源谱宽、宽谱光源中心波长和一实际宽谱红外光源对电串扰的影响,且对比分析了单色光与宽谱光源对

电串扰的影响。

## 1 原理模型

CMOS 图像传感器工作时,成像透镜将物光聚焦到图像传感器的二维像素阵列上,每个像素上的光电二极管将光功率信息转换为电信号,然后通过行列选择电路选取要操作的像素,并将像素上的电信号读取出来,经模拟信号处理器后信号传输到数模转换器上转换成数字信号然后输出。电串扰是 CMOS 图像传感器的难题之一,在正常工作范围内也会产生一定的串扰信号,CMOS 图像传感器中的电串扰是指当入射光进入感光区产生的非平衡载流子,在扩散进入耗尽区被收集前,有一定的几率发生横向扩散进入相邻像素区域,被相邻区域收集。电串扰的直接原因就是光生电子的横向扩散,如图 1 所示。

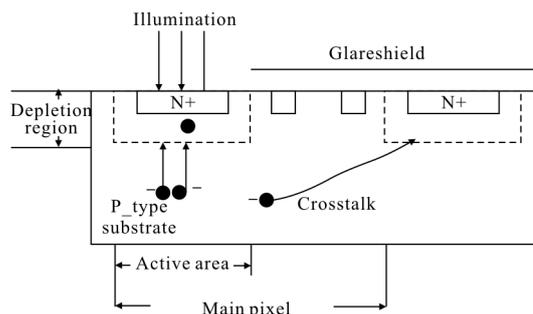


图1 电串扰发生的机理

Fig.1 Mechanism of electrical crosstalk

CMOS 图像传感器像素间的电串扰可以用以下模型来表示<sup>[2]</sup>:

$$\frac{V_{\text{diff}}(\lambda)}{N_{P\lambda}} = C_g \times k(c_1 A + c_2 P d) \left( \frac{S-A}{S} \right) \left( 1 - \frac{4P_i - P}{8L_{\text{diff}}} \right) \quad (1)$$

式中:  $C_g$  为电子转换为电压的转换增益;  $k$  为传感器收集电子总量中光电二极管侧壁单位面积扩散进入的电子数量;  $A$  为光电二极管感光区面积;  $P$  为光电二极管感光区周长;  $d$  为光电二极管耗尽层宽度;  $S$  为像素单元面积;  $P_i$  为像素单元尺寸;  $L_{\text{diff}}$  是基体内电子的扩散长度; 系数  $c_1, c_2$  分别表示产生的载流子通过底部和侧边扩散进入相邻像素单元光电二极管耗尽区的量;  $V_{\text{diff}}(\lambda)$  为像素单元与相邻像素单元间的电串扰信号;  $N_{P\lambda}$  为入射的光子数量。

$$c_1 \propto \int_{y_{\text{junction}}}^{\text{top}} \alpha e^{-\alpha y} dy$$

$$c_2 \propto \int_0^{y_{\text{junction}}} \alpha e^{-\alpha y} dy \quad (2)$$

$$dN_{p\lambda}/dt = 5.03 \times 10^{15} P_{\lambda} \lambda$$

式中:  $l_{op}$  表示像素中光电二极管区域的厚度;  $y_{\text{junction}}$  表示耗尽区的厚度;  $P_{\lambda}$  为入射光功率;  $\lambda$  为入射光的波长;  $\alpha$  为碲镉汞(HgCdTe)材料对光的吸收系数, 可表示为<sup>[7]</sup>:

$$\alpha = \beta(E - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中:

$$\beta = 2.109 \times 10^5 \left( \frac{1+x}{81.9+T} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$E_g = E_0 + (6.29 \times 10^{-2} + 7.68 \times 10^{-4} T) \left( \frac{1-2.14x}{1+x} \right) \quad (5)$$

$$E_0 = 1.838x - 0.3424 + 0.148x^4 \quad (6)$$

式中:  $E_g$  为 HgCdTe 禁带宽度;  $x$  为 HgCdTe 的组分;  $T$  为绝对温度。

从公式(1)~(3)可知 CMOS 的整个电串扰过程是与波长相关的, 即如果同时有不同波长的激光入射, 得到的实际电串扰结果与单色光入射得到的电串扰结果必然不同, 下面对其进行具体的计算。

## 2 数值模拟结果和分析

CMOS 图像传感器的像素单元内结构参数一定时, 根据公式(1~6)可定量研究波长对像素单元间电串扰的影响。像素单元材料为 HgCdTe, 组分  $x=0.29$ , 温度  $T=125$  K, 像素单元尺寸为  $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ , 耗尽层宽度  $d=1 \mu\text{m}$ , 感光区的面积为  $A=540 \mu\text{m}^2$ , 量子效率为 0.6, 转换增益为  $C_g=0.32 \mu\text{V}/e$ , 扩散长度  $L_{\text{diff}}=170 \mu\text{m}$ 。

### 2.1 单色光波长对电串扰的影响

利用以上参数, 在辐照功率密度  $p=15 \text{ W}/\text{cm}^2$ , 光持续辐照时间  $t=3 \text{ ms}$ , 入射光波长取  $1000 \sim 1950 \text{ nm}$  时, 计算了可见光对 CMOS 图像传感器像素间电串扰的影响, 计算结果如图 2 所示。

由图 2 可看出, 在像素结构参数不变, 辐照功率强度恒定的情况下, 相邻像素受到电串扰的影响随波长的增长而增强。波长  $\lambda=1000 \text{ nm}$ , 串扰电压为  $10.38 \text{ mV}$ ; 波长  $\lambda=1300 \text{ nm}$ , 串扰电压增加为  $15.385 \text{ mV}$ , 串扰电压增大了约  $5.005 \text{ mV}$ , 当波长增加为  $\lambda=1600 \text{ nm}$ , 串扰电压增加为  $21.06 \text{ mV}$ , 增加了

约  $5.675 \text{ mV}$ 。即像素单元受波长越大的光源辐照后电串扰更为严重。这是因为在材料吸收谱范围内, 吸收率越高, 吸收深度则越浅。由于耗尽层靠近像素上表面, 波长较短的入射光激发出的电子距离耗尽层较近, 短距离内容易被耗尽层收集, 因此很难扩散至相邻像素单元, 从而对像素间电串扰的影响较小。而对于波长较长的入射光激发出的电子距离耗尽层较远, 激发出的电子即在底部较深的位置附近发生扩散运动, 扩散至相邻像素, 被相邻像素所收集, 使像素间电串扰受波长越长的光源影响更严重。

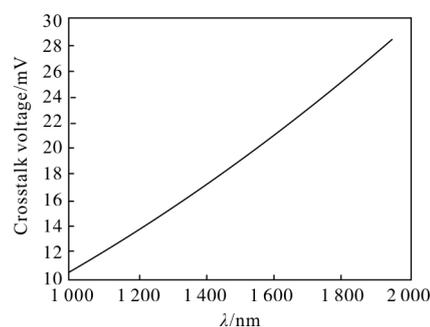


图 2 电串扰随单色光波长变化的关系

Fig.2 Electrical crosstalk changes with wavelength of homogeneous light

### 2.2 宽谱光源的谱宽对 CMOS 电串扰的影响

单色连续激光波长对 CMOS 图像传感器电串扰具有较大影响, 而实际光源不是绝对的单色, 且在实际应用中都具有一定的谱。以下计算分析了宽谱光源谱宽对电串扰的影响。计算使用参数: 光源光谱为高斯光谱, 宽谱光源的中心波长  $\lambda_0=1064 \text{ nm}$ , 辐照光源总功率  $P=0.135 \text{ mW}$ , 谱宽  $\Delta\lambda$  在  $10 \sim 500 \text{ nm}$  范围内, 图 3 为总功率恒定, 谱宽分别为  $40 \text{ nm}$ 、 $100 \text{ nm}$  和  $300 \text{ nm}$  的光谱图。电串扰随谱宽变化关系如图 4 所示。

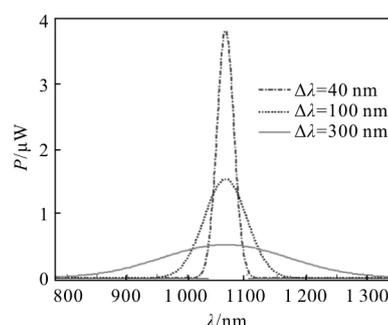


图 3 宽谱光源的光谱图

Fig.3 Spectra of broadband sources

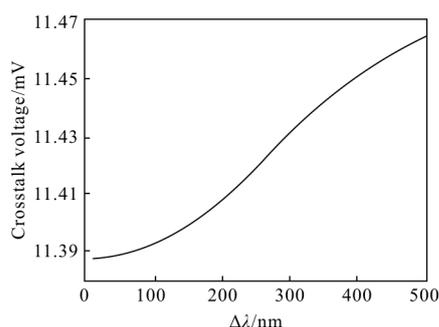


图 4 电串扰随谱宽变化的关系

Fig.4 Electrical crosstalk changes with spectrum bandwidth

由图 4 可知, 宽谱光源功率不变, 中心波长确定, 谱宽  $\Delta\lambda=20$  nm 时, 电串扰大小约为 11.388 mV; 谱宽增加为  $\Delta\lambda=40$  nm 时, 电串扰大小仍为 11.388 mV, 电串扰没有增加; 当谱宽增加为  $\Delta\lambda=240$  nm 时, 电串扰大小约增加为 11.417 mV, 电串扰增加了 0.029 mV; 谱宽继续增加为  $\Delta\lambda=440$  nm 时, 电串扰大小约增加为 11.457 mV, 电串扰增加了 0.04 mV。当光源为一单色光, 波长为 1064 nm, 即  $\Delta\lambda=0$  nm 时, 电串扰大小约为 11.387 mV。由以上数据可知, 功率相同的宽谱光源和单色光, 对 CMOS 电串扰的影响宽谱光源大于单色光, 且谱宽较窄时, 在一定的谱宽范围内电串扰大小不变, 但是随着谱宽的显著增加, CMOS 电串扰大小逐渐缓慢增加。

### 2.3 宽谱光源中心波长对 CMOS 的电串扰影响

中心波长是宽谱光源的一个重要参数, 分析宽谱光源对电串扰的影响时中心波长是其中一重要的关键点。以下计算分析了宽谱光源中心波长对电串扰的影响。计算使用参数: 宽谱光源光谱为高斯光谱, 光源的谱宽分别取  $\Delta\lambda=80$  nm 和 400 nm, 辐照光源总功率  $P=0.135$  mW, 中心波长  $\lambda_0$  在 1000~1200 nm 范围内, 电串扰随中心波长变化关系如图 5 所示。

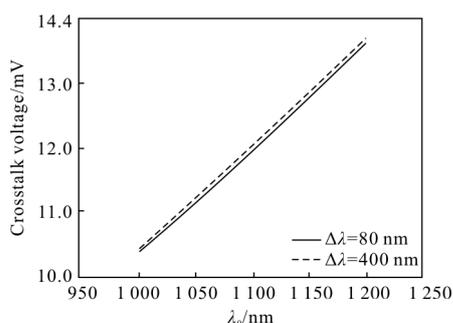


图 5 电串扰随中心波长变化的关系

Fig.5 Electrical crosstalk changes with center wavelength

图 6 是波长  $\lambda=1064$  nm 的单色光和中心波长  $\lambda_0=1064$  nm、谱宽  $\Delta\lambda=400$  nm 的宽谱光源对 CMOS 电串扰的影响。

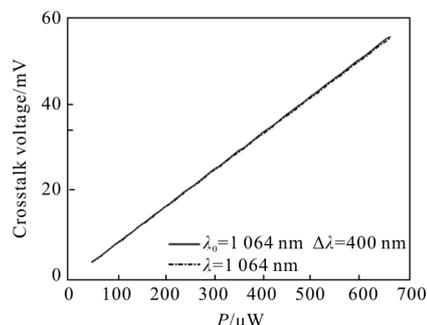


图 6 单色光与宽谱光源对电串扰的影响

Fig.6 Effect of monochromatic light and broadband source on electric crosstalk

由图 5 可知, 在像素结构参数确定, 宽谱光源功率不变, 谱宽  $\Delta\lambda=80$  nm, 中心波长  $\lambda_0=1000$  nm 时, 电串扰大小约为 10.383 mV; 当中心波长增加为  $\lambda_0=1100$  nm 时, 电串扰大小约为 12.136 mV; 电串扰增加了约 1.753 mV。当谱宽为  $\Delta\lambda=400$  nm, 中心波长  $\lambda_0=1000$  nm 时, 电串扰大小约为 10.445 mV; 当中心波长增加为  $\lambda_0=1100$  nm 时, 电串扰大小约为 12.195 mV; 电串扰增加了 1.75 mV。由以上数据可知, 宽谱光源谱宽不变时, 电串扰随中心波长的增长而增加; 中心波长相同时, 谱宽更宽的光源对 CMOS 电串扰的影响较大。

从图 6 可知, 单色光和宽谱光源功率相同  $P=100$   $\mu$ W 时, 单色光入射电串扰大小约为 8.435 mV, 宽谱光源入射电串扰大小约为 8.496 mV, 电串扰增加了约 0.061 mV。当功率  $P=600$   $\mu$ W 时, 单色光辐照电串扰大小约为 50.611 mV, 宽谱光源辐照电串扰大小约为 50.914 mV, 电串扰增加了约 0.303。由此可知, 电串扰随单色光和宽谱光源功率的增加而增大, 此外相同功率下, 宽谱光源对电串扰的影响略大于单色光。

### 2.4 宽谱红外光源对 CMOS 电串扰的影响

在定量分析了宽谱光源的谱宽、中心波长等参数对电串扰的影响后, 为了明确在宽谱光源工作下器件的串扰特性, 具体针对一个实际的光源对电串扰的影响进行了计算, 其光谱分布如图 7 所示。计算辐照光源功率在 40~600  $\mu$ W, 电串扰随光源功率变

化关系如图 8 所示。

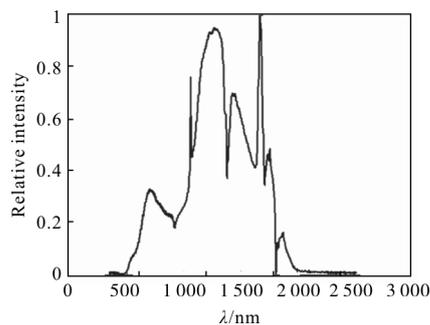


图 7 红外光源光谱

Fig.7 Spectrum of infrared source

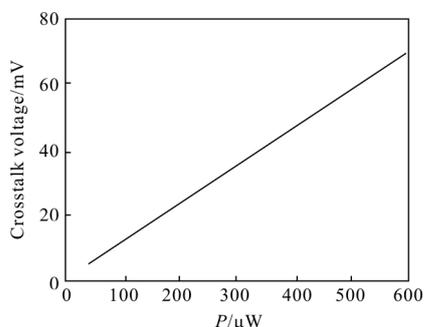


图 8 红外光源对电串扰的影响

Fig.8 Effect of infrared source on electrical crosstalk

由图 8 可知,电串扰随宽谱红外光源功率的增大而增加,光源功率为  $87 \mu\text{W}$  时,电串扰大小约为  $10.18 \text{ mV}$ ;当光源功率增加为  $170 \mu\text{W}$  时,电串扰大小约为  $19.892 \text{ mV}$ ,电串扰增加了  $9.712 \text{ mV}$ 。这主要是由于随辐照光源功率的增大,CMOS 像素内光生载流子密度增大,而在像素结构确定时,像素单元对光生载流子的收集能力不变,使得向相邻像素扩散的载流子也增加。

### 3 结 论

通过对不同光源下 CMOS 电串扰的计算模拟,分析了单色光波长、宽谱光源谱宽、宽谱光源中心波长对 CMOS 电串扰的影响。得到结论:在其他条件不变时,当单色光波长由  $1300 \text{ nm}$  增加到  $1600 \text{ nm}$  时,串扰电压增加了  $5.675 \text{ mV}$ ,说明在 CMOS 响应波段内,单色光波长越长,电串扰越大。对于中心波长为  $1064 \text{ nm}$  的宽谱光源,当谱宽由  $20 \text{ nm}$  增加为  $440 \text{ nm}$  时,电串扰大小增加了  $0.069 \text{ mV}$ ,这表示在中心波长不变的情况下,随着谱宽的显著增加,CMOS 电串扰大小逐渐缓慢增

加。当辐照功率为  $600 \mu\text{W}$  时,中心波长为  $1064 \text{ nm}$ 、谱宽为  $400 \text{ nm}$  的宽谱光源辐照下产生的电串扰比波长为  $1064 \text{ nm}$  的单色光辐照时产生的电串扰增加了约  $0.303 \text{ mV}$ ,表明宽谱光源对 CMOS 电串扰的影响大于单色光。

### 参考文献:

- [1] Brouk I, Nemirovsky Y. Characterization of crosstalk between CMOS photodiodes [J]. *Solid-State Electronics*, 2002, 46(1): 53-59.
- [2] Shcherback I, Yadid Pecht O. CMOS APS photoresponse and crosstalk optimization analysis for scalable CMOS technologies [C]//11th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, 2004: 153-155.
- [3] Shcherback I, Danov T, Yadid Pecht O. A comprehensive CMOS APS crosstalk study: Photoresponse model, technology, and design trends [J]. *IEEE*, 2004, 51(12): 2033-2041.
- [4] Shcherback I, Yadid-Pecht O. Photoresponse analysis and pixel shape optimization for CMOS active pixel sensors [J]. *Trans Electron Devices*, 2003, 50(1): 12-18.
- [5] Shcherback I, Yadid Pecht O. CMOS APS crosstalk characterization via a unique submicron scanning system [J]. *Trans Electron Devices*, 2003, 50(9): 1994-1997.
- [6] Tseng Chien Hsien, Wu Shou Gwo. Crosstalk improvement technology applicable to  $0.14 \mu\text{m}$  CMOS image sensor [C]// Electron Devices Meeting IEDM Technical Digest: IEEE International, 2004: 997-1000.
- [7] Schacham S E, Finkman E. Recombination mechanisms in p-type HgCdTe: Freezeout and background flux effects [J]. *Journal of Applied Physics*, 1985, 57(6): 2001-2009.
- [8] Yan Yu, Qin Chen, Long Wen. Spatial optical crosstalk in CMOS image sensors integrated with plasmonic color filters [J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 21994-22003.
- [9] Aull B F, Schuette D R, Young D J. A study of crosstalk in a  $256 \times 256$  photon counting imager Based on silicon geiger-mode avalanche photodiodes [J]. *IEEE*, 2014, 15(4): 2123-2132.
- [10] Ning Yonghui, Guo Yongfei, Qu Lixin, et al. Radiometric calibration and pixel data real-time processing of multi-tip TDICCD [J]. *Opt Precision Eng*, 2015, 23(10): 2952-2961.

宁永慧, 郭永飞, 曲利新, 等. 多通道时间延迟积分 CCD 辐射标定和像元实时处理 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(10): 2952-2961.

- [11] Zhang Jianmin, Feng Guobin, Yang Pengling, et al. Thermal issues of photoconductive HgCdTe detector in mid-infrared laser parameter measurement [J]. *Opt Precision Eng*, 2015, 23(1): 22–30. (in Chinese)  
张俭民, 冯国斌, 杨鹏翎, 等. 碲镉汞光导探测器在中红外激光测量中的热问题[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(1): 22–30.
- [12] Chen Jun, Wang Qingsong. Recent progress of infrared upconversion device based on the integration of OLED [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(1): 17–27. (in Chinese)  
陈俊, 王青松. 基于 OLED 显示单元的红外上转换器件研究进展[J]. *中国光学*, 2015, 8(1): 17–27.
- [13] Yang Mingyu. Detecting of photoelectric peeping devices based on active laser detection [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 255–262. (in Chinese)  
杨名宇. 利用激光主动探测技术实现光电窥视设备检测[J]. *中国光学*, 2015, 8(2): 255–262.
- [14] Shi Yanli, Guo Qian, Li Long, et al. Visible-extended InP/InGaAs wide spectrum response infrared detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3177–3180. (in Chinese)  
史衍丽, 郭骞, 李龙, 等. 可见光拓展 InP/InGaAs 宽光谱红外探测器[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(11): 3177–3180.
- [15] Kang Bingxin, Cai Yi, Wang Lingxue, et al. Technologies of performance improvement for platinum silicide infrared focal plane array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 742–748. (in Chinese)  
康冰心, 蔡毅, 王岭雪, 等. 硅化铂红外焦平面探测器性能改进技术分析[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(3): 742–748.