

doi:10.3788/gzxb20174609.0923001

# 基于标准 CMOS 工艺的 UV/blue 光电探测器

董威锋<sup>1</sup>, 谢生<sup>1</sup>, 毛陆虹<sup>2</sup>, 廖建文<sup>2</sup>, 朱长举<sup>2</sup>, 乔静<sup>1</sup>

(1 天津大学 微电子学院, 天津市成像与感知微电子技术重点实验室, 天津 300072)

(2 天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

**摘 要:**基于 UMC 0.18 $\mu\text{m}$  CMOS 工艺, 提出一种适合紫外/蓝光探测的探测器, 该器件由栅体互联的 NMOS 晶体管和横向/纵向光电二极管构成。其中, 浅结的光电二极管由 UMC 工艺中 Twell 层(浅 P 阱)和 Nwell 层形成, 以增强其对紫外/蓝光的吸收, 栅体互联的 NMOS 晶体管可以放大光电流, 提高探测器的灵敏度和动态范围。仿真结果表明, 本文设计的紫外/蓝光探测器具有低的工作电压和暗电流, 对 300~550 nm 波长范围的光具有高的响应度和宽的动态范围。在弱光条件下(光强小于  $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ), 响应度优于  $10^5 \text{ A}/\text{W}$ , 随着光强增大, 响应度逐渐降低, 但总体仍超过  $10^3 \text{ A}/\text{W}$ 。

**关键词:**光电器件; 响应度; 弱光探测; 紫外/蓝光; CMOS 工艺; 动态范围; 选择性

中图分类号: TN364.1; TN386.6 文献标识码: A 文章编号: 1004-4213(2017)09-0923001-6

## UV/blue Photodetector Based on CMOS Technology

DONG Wei-feng<sup>1</sup>, XIE Sheng<sup>1</sup>, MAO Lu-hong<sup>2</sup>, LIAO Jian-wen<sup>2</sup>, ZHU Chang-ju<sup>2</sup>, QIAO Jing<sup>1</sup>

(1 School of Microelectronics, Tianjin Key Laboratory of Imaging and Sensing  
Microelectronic Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(2 School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Ultraviolet/blue photodetector based on UMC 0.18 $\mu\text{m}$  CMOS technology is proposed, which is constructed by a lateral/vertical PN diode and an NMOS transistor. The shallow PN diode formed by the Twell layer and Nwell layer is used to enhanced the absorption efficiency of Ultraviolet/blue light and separate the photogenerated carriers. Since the gate of NMOS is tied with the Twell layer, it can be adjusted by the Twell voltage induced by the incident illumination. The sensitivity and the dynamic range of the proposed detector are improved. The simulation results show that the detector has extra high responsivity and wide dynamic range for the wavelength window of 300~550 nm. Under the condition of weak light ( $<1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ), the detector has a responsivity more than  $10^5 \text{ A}/\text{W}$ . With the increase of light intensity, the responsivity decreases but it still better than  $10^3 \text{ A}/\text{W}$  in the interesting range.

**Key words:** Photoelectric devices; Responsivity; Weak-light detection; Ultraviolet/blue light; CMOS technology; Dynamic range; Selectivity

**OCIS Codes:** 230.0040; 230.0250; 230.5160; 040.5160; 040.7190; 040.3780; 160.6000

## 0 引言

紫外探测是继红外和激光探测之后发展起来的又一新型探测技术, 在通信、空间交流、环境监测等领域有着广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。随着紫外探测技术的进步, 紫外图像传感器在生化分析、光存储系统和臭氧层监测等弱光探测领域得到迅猛发展<sup>[3-4]</sup>。作为像素单元的核心组件, 紫外/蓝光(Ultraviolet/blue, UV/blue)探测器在相应波段具有良好的波长选择性和高的灵敏度, 可以满足微弱光信号探测的应用需求。尽管基于 SiC、ZnO

基金项目: 国家自然科学基金(Nos.61474081, 11673019)资助

第一作者: 董威锋(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为 CMOS 图像传感器像素单元设计。Email: ahudongweifeng@163.com

导师(通讯作者): 谢生(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为半导体器件和集成电路设计。Email: xie\_sheng06@tju.edu.cn

收稿日期: 2017-03-27; 录用日期: 2017-05-09

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

或 GaN 等宽禁带材料制造的光电探测器<sup>[5-6]</sup>具有较高的灵敏度和良好的波长选择性,但这类探测器的稳定性较差,且难以兼容 CMOS 读出电路,因而在实际应用中受到很大的限制。

硅基光电探测器<sup>[7-8]</sup>不仅克服了上述缺点,而且具有成本低、功耗小,可与 CMOS 读出电路单片集成等优点.因此,基于硅基标准 CMOS 工艺的 UV 探测器受到极大关注,并得到广泛研究<sup>[9-10]</sup>.Pauchard A 等人<sup>[11]</sup>利用标准 CMOS 工艺研制出一种雪崩光电二极管,其对 400 nm 波长光的灵敏度可达 2.3 A/W.汪涵等人<sup>[12]</sup>设计了一种条纹结构的光电二极管,不仅实现了良好的波长选择性<sup>[13]</sup>,而且改善了光电二极管对紫外光的灵敏度.然而上述探测器的灵敏度相对偏低,难以满足其对微弱光信号的探测需求.Shin J K 等人<sup>[14]</sup>提出了一种栅体互联的 PMOS 型光电探测器,其在微弱光环境下的电流增益超过  $10^5$  倍,但对 UV/blue 光的选择性较差.陈长平等人<sup>[15]</sup>提出了一种基于横向 PN 结二极管的探测器结构,提高了其对 UV/blue 光的选择性,但仅对小于  $1\mu\text{W}$  的光强具有较高的灵敏度,因而探测的动态范围有限。

本文基于 UMC 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS 工艺,提出一种适合紫外探测的器件结构.该探测器由栅体互联的 NMOS 晶体管和横向/纵向光电二极管构成,其中,利用 UMC 特有的 Twell 层(浅 P 阱)和 Nwell 层形成横向/纵向二极管,用来分离/收集光生载流子,而用栅体互联的 NMOS 晶体管放大光电流.所设计探测器不仅对 UV/blue 光具有极高的灵敏度和较好的选择性,而且大大扩展了探测器的动态范围。

## 1 器件结构和工作原理

基于 UMC 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS 工艺,设计了一种由 NMOS 晶体管和横向/纵向光电二极管构建的 UV 探测器结构,见图 1.利用 UMC 特有的 Twell 层(浅 P 阱)和 Nwell 层形成横向/纵向结构的浅 PN 结,以增强探测器对 UV/blue 光的吸收.NMOS 晶体管的多晶硅栅与 Twell 互联,使二者具有相同的电势,并保持悬空.除 PN 结感光区外,其它区域皆用遮光金属覆盖,避免入射光信号干扰。

探测器工作时, Nwell 外接电源电压 VDD, NMOS 管源端和 Psub 衬底接最低电位 GND, 而

NMOS 管的漏端作为光响应电流的输出端.当入射光照射探测器光敏面时,纵向/横向 PN 结用来产生和分离光生电子-空穴对.其中,光生空穴沿电势梯度迁移至 Twell,随着空穴不断积累,Twell 电势逐渐升高,进而调节 NMOS 晶体管的阈值电压和栅源电压.因此,PN 结二极管感应的光电压经 NMOS 晶体管转化为放大的漏电流后,由漏端输出.由 PN 结理论可知<sup>[16]</sup>, Twell 光生电势  $V_{\text{Twell}}$  随入射光强的变化为

$$V_{\text{Twell}} = n_j V_T \cdot \ln\left(1 + \frac{I_{\text{PH}}}{I_S}\right) = n_j V_T \cdot \ln\left(1 + \frac{F \cdot P}{I_S}\right) \quad (1)$$

式中,  $n_j$  为 PN 结二极管的理想因子,  $V_T = KT/q$  为热电压,  $I_{\text{PH}}$  为二极管光电流,  $P$  为入射光功率,  $F$  是与半导体材料、PN 结耗尽区面积等有关的光电转换常数,  $I_S$  为反向饱和电流。

受 Twell 电势的影响, NMOS 晶体管的阈值电压和栅源电压表示为

$$V_{\text{TH}} = V_{\text{TH0}} + \left[ \frac{\sqrt{2\epsilon_s e N_T}}{C_{\text{OX}}} \cdot \left( \sqrt{2\phi_F - n_j V_T \cdot \ln\left(1 + \frac{F \cdot P}{I_S}\right)} - \sqrt{2\phi_F} \right) \right] \quad (2)$$

$$V_{\text{GS}} = V_{\text{Twell}} = n_j V_T \cdot \ln\left(1 + \frac{F \cdot P}{I_S}\right) \quad (3)$$

式中,  $V_{\text{TH0}}$  为 Twell 零偏置时的阈值电压,  $\epsilon_s$  为相对介电常数,  $e$  是电子电量,  $N_T$  表示 Twell 掺杂浓度,  $C_{\text{OX}}$  为单位面积栅氧电容,  $\phi_F$  为费米势。

类似于传统 MOSFET 的放大机制,设计的探测器可实现对光电压的转换和放大.光照 NMOS 晶体管在亚阈值区和饱和区工作时的漏电流分别表示为

$$I_{\text{Dweak}} = K_n \frac{C_d}{C_{\text{OX}}} \cdot V_T^2 \cdot \exp\left[\frac{V_{\text{Twell}} - V_{\text{TH}}}{\eta V_T}\right] \quad (4)$$

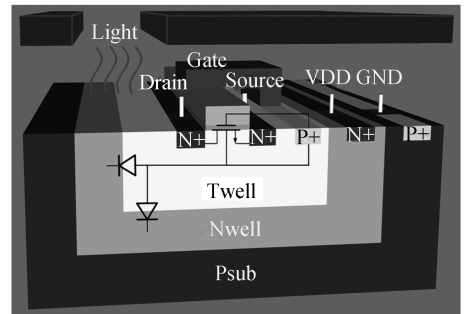


图 1 UV 光电探测器的结构示意图  
Fig.1 Schematic diagram of UV photodetector

$$I_{Dstr} = \frac{K_n}{2n_m} \cdot [V_{Twell} - V_{TH}]^2 \quad (5)$$

式中,  $K_n = (W/L)\mu_n C_{OX}$  是 MOS 管的增益因子,  $L$  和  $W$  分别为栅长和栅宽,  $\mu_n$  表示电子迁移率,  $C_d$  为耗尽层电容,  $\eta = (1 + C_d/C_{OX})$  反映栅与硅表面之间的电容耦合,  $n_m$  为沿沟道方向的体电荷变化因子。

由上述理论分析可知,当光强较弱时, NMOS 管处于弱反型区,漏电流随入射光强指数增加,故响应度极高;而当光强较强时, MOS 管处于强反型区,漏电流与光强呈平方对数关系。因此,本文设计的探测器结构具有极高的响应度和宽的动态范围。

## 2 结果和讨论

利用 ATLAS 二维器件仿真软件分析了结构参数和偏置条件对探测器阈值电压、漏电流及光谱响应等特性的影响。器件仿真时,各层材料的厚度和掺杂浓度见表 1,器件外加偏置分别为漏源电压  $V_{DS} = 0.3$  V, Nwell 电压  $V_{VDD} = 1.8$  V,器件光敏面积为  $3 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ 。为了更好地模拟探测器的工作模式,迁移率模型中包括了 cvt、conmob 和 fldmob 模型。其中, conmob 和 fldmob 模型考虑了掺杂浓度和电场的影响。由于光生载流子在扩散和漂移过程中不断复合而消失,故器件复合模型包含 Auger 复合、Oprr 复合和 Shockley-Read-Hall 复合。此外,器件模拟时也考虑了温度和表面陷阱电荷的影响,并选用 Newton 迭代方法进行数值求解。

表 1 探测器的材料结构参数

Table 1 Material structure parameter of photodetector

Layer	Doping/cm <sup>-3</sup>	Depth/ $\mu\text{m}$	Length/ $\mu\text{m}$	Width/ $\mu\text{m}$
P-Sub	$1 \times 10^{15}$	20	23	1(default)
N-Well	$4 \times 10^{16}$	2.0	17	1(default)
T-Well	$1 \times 10^{17}$	1.0	11	1(default)
N <sup>+</sup>	$1 \times 10^{20}$	0.17	2	1(default)

图 2 给出了探测器 Twell 电势随入射光强的变化曲线。由图 2 可见,在极弱光照 ( $< 1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ) 下,由于光生载流子在输运过程中不断复合,故其对 Twell 电势的贡献可忽略不计。当光强超过  $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  后,大部分光生空穴被收集到 Twell,所以阱电势近似随光强呈线性对数增长。这与式(1)的理论分析结果是一致的。

在保持 Twell 悬空,栅压从 0 V 扫描至 1.8 V 的条件下,分析了四种不同光强对 NMOS 晶体管阈值电压的影响,如图 3 所示。由图 3 可知,光照 NMOS 晶体管的阈值电压随光强的增大而降低。

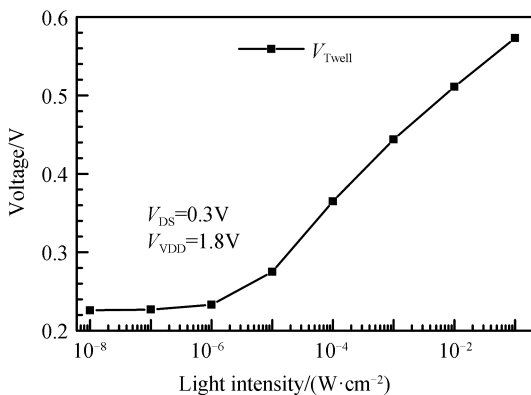


图 2 T-well 电势随光强的变化

Fig.2 Variation of T-well potential with light intensity

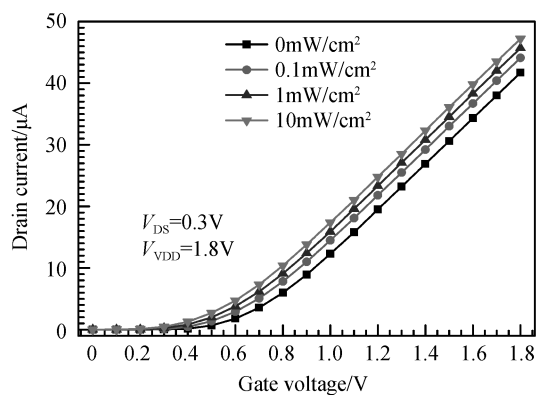


图 3 NMOS 晶体管转移特性

Fig.3 Transfer characteristics of NMOS

图 4 给出了不同光强下 NMOS 晶体管漏电流的输出特性。其中,晶体管的源极接 GND, Nwell 接 VDD,而漏电压从 0V 扫描至 1.8 V。无光照时, NMOS 晶体管处于关闭状态,漏电流极小,可以忽略不计。随着光强不断增大,与 Twell 互连的栅压逐渐使沟道反型, NMOS 晶体管开启,漏电流随漏电压的增大而增大。当漏电压超过 0.3 V 后, NMOS 晶体管达到饱和状态,漏电流几乎保持不变。由于光照越强,诱导的阱电势  $V_{Twell}$  越高,沟道反型越强烈,故晶体管的漏电流越大。由此可见,入射光强间接调制 NMOS 晶体管的输出特性。

图 5 为探测器的光谱响应特性.由图 5 可知,当入射光波长小于 550 nm 时,NMOS 晶体管具有较高的漏电流和响应度,且随波长变化较小,当波长大于 550 nm 时,高光强对应的漏电流和响应度明显下降.因此,本文设计的探测器与其他探测器相比<sup>[17]</sup>,提高了对紫外/蓝光(波长为 300~450 nm)的吸收选择性.

图 6 为探测器输出漏电流和直流响应度随光强变化的曲线.在光强小于  $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  时,漏源电压对探测器输出漏电流和直流响应有一定的影响,漏源电压越大,输出漏电流和直流响应度越大.光强大于  $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  时,探测器输出漏电流和直流响应

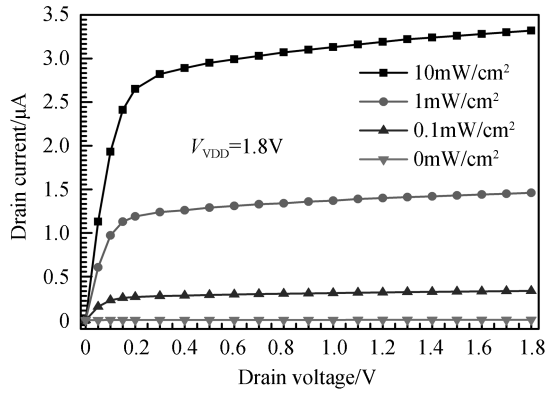


图 4 NMOS 晶体管输出特性  
Fig.4 Output characteristic of NMOS

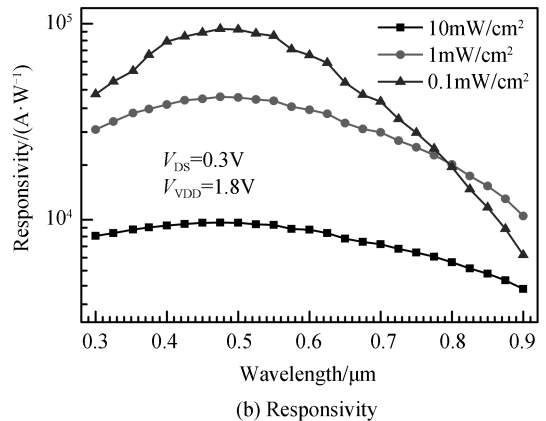
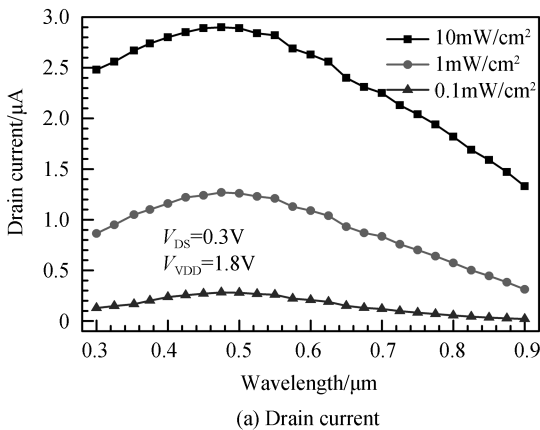


图 5 探测器的光谱响应

Fig.5 Spectral response of photodetector

度不再随漏源电压而变化.由图 6(a)可见,探测器的暗电流也随漏源电压的增大而增大.为了降低探测器的暗电流和提高信噪比,并保证 NMOS 晶体管工作在饱和状态,漏电压应维持在 0.3 V 左右.探测器在微弱光强下表现出极高的响应度,如图 6(b)所示.在  $0.1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  光强时的响应度可达  $10^6 \text{ A}/\text{W}$ ,随着光强的增加,响应度明显下降,但感兴趣范围内的响应度仍大于  $10^3 \text{ A}/\text{W}$ .在微弱光时响应度极高,而中等光强时响应度适中的特性使得所设计探测器不仅适合于 UV/blue 波段的弱光探测,而且具有更宽的动态范围.

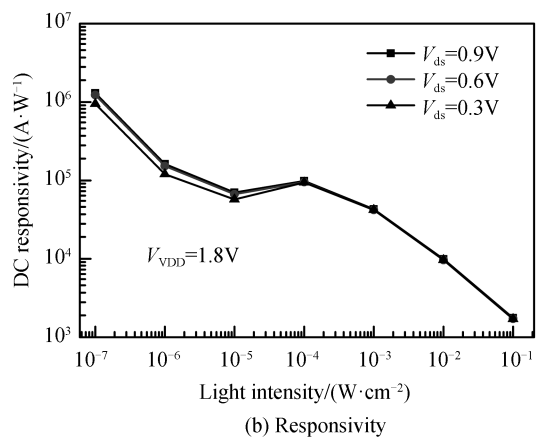
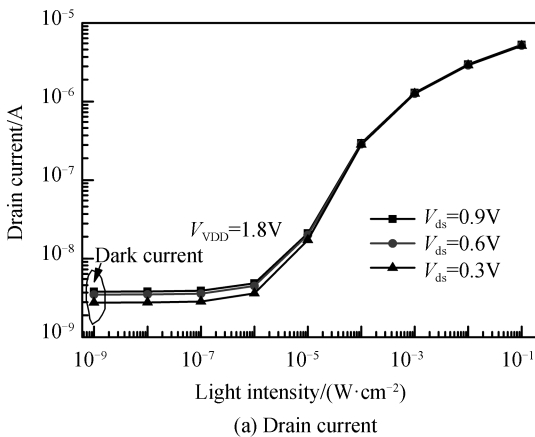


图 6 探测器漏电流和直流响应( $\lambda = 400 \text{ nm}$ )

Fig.6 Drain current and DC responsivity of photodetector

在实际图像传感器应用中,注入 Twell 空穴的抽取由外加复位信号控制,可在极短时间内完成,探测器的瞬态响应时间主要由空穴的注入决定.图 7 给出了入射波长  $\lambda = 400 \text{ nm}$ ,光功率  $P = 1 \text{ mW}/\text{cm}^2$  时探测器

的瞬态响应曲线.若快门开启时间为  $1 \mu\text{s}$ (即光强从零突变到  $1 \text{ mW}/\text{cm}^2$ ),则漏电流的上升时间约为  $4 \mu\text{s}$ ,完全满足紫外图像传感器的瞬态响应要求.

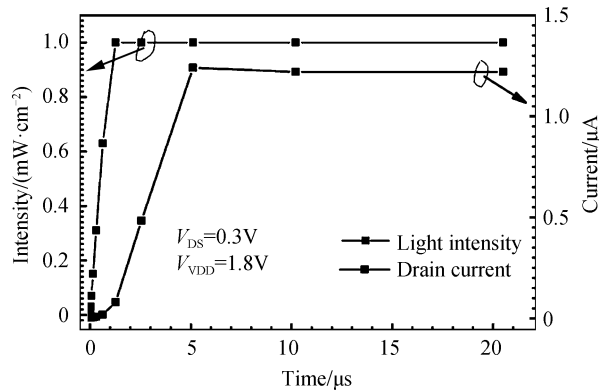


图7 探测器瞬态响应

Fig.7 Transient response of photodetector

表2总结了所设计探测器的性能参数,并与基于标准 CMOS 工艺的其它探测器进行了对比.由表2可知,本文设计的探测器在响应度和功耗方面具有明显优势.

表2 基于 CMOS 工艺的 UV 探测器性能对比

Table 2 Performance comparison of UV photodetector based on CMOS technology

Parameter	Ref.[11]	Ref.[12]	Ref.[15]	This work
Structure	APD	PD	NMOS	Gate-body tied NMOS
Maximum responsivity/( $\text{A} \cdot \text{W}^{-1}$ )	2.3	0.27	$>10^4$	$>10^5$
Bias voltage/V	19.1	3.3	3	$0.3(V_{\text{DS}})$

### 3 结论

基于 UMC  $0.18 \mu\text{m}$  CMOS 工艺,本文提出了一种由栅体互联 NMOS 晶体管和横向/纵向光电二极管构成的复合型 UV 光电探测器结构.该探测器利用 UMC 特有的 Twell 层(浅 Pwell)和 Nwell 层形成横向/纵向光电二极管结构,提高了对 UV/blue 光的吸收效率,而利用栅体互联的 NMOS 晶体管放大光电流,改善了探测器的灵敏度和动态范围.与传统硅基 UV 光电探测器相比,本文所设计探测器结构不仅可在低压、低功耗下正常工作,而且对波长小于  $550 \text{ nm}$  的 UV/blue 光具有高的响应度和宽的动态范围.在光强小于  $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  时,响应度优于  $10^5 \text{ A}/\text{W}$ ,随着光强增大,响应度逐渐降低,但在感兴趣的范围内仍超过  $10^3 \text{ A}/\text{W}$ ,非常适用于 UV/blue 弱光探测.

### 参考文献

- [1] NIKZAD S, HOENK M, JEWELL A D, *et al.* Single photon counting UV solar-blind detectors using silicon and III-Nitride materials[J]. *Sensors*, 2016, **16**(6): 927-947.
- [2] SUN Xing-min, JIN Yi-min, JIAO Shu-jie, *et al.* Fabrication of ZnO nanorods by electrochemical deposition and research on the self-powered zno ultraviolet photodetector[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(5): 591-596. 孙兴敏, 金轶民, 矫淑杰, 等. 电化学沉积法制备 ZnO 纳米柱及自驱动紫外探测性能研究[J]. *发光学报*, 2016, **37**(5): 591-596.
- [3] CHANG Y W, HUANG Y T. The ring-shaped CMOS-based phototransistor with high responsivity for the UV/blue spectral range[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, **21**(13): 899-901.
- [4] LEE C J, WON C H, BAE M, *et al.* Hybrid UV active pixel sensor implemented using GaN MSM UV sensor and Si-based circuit[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, **15**(9): 5071-5074.
- [5] PRAKASH N, SINGH M, KUMAR G, *et al.* Ultrasensitive self-powered large area planar GaN UV-photodetector using reduced graphene oxide electrodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, **109**(24): 1-5.
- [6] GAO Jiang-dong, LIU Jun-lin, XU Long-quan *et al.* Dependence of electroluminescence on barriers temperature in GaN base blue LED on silicon substrate[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(2): 202-207. 高江东, 刘军林, 徐龙权, 等. 垒温对硅衬底 GaN 基蓝光 LED 发光效率的影响[J]. *发光学报*, 2016, **37**(2): 202-207.
- [7] KE Ang, WEN Hua-feng, LONG Dan-gui, *et al.* Design of high-performance diode groups traveling-wave photodiode arrays[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(1): 0104003. 柯昂, 文化锋, 龙丹桂, 等. 二极管组高性能光电探测器阵列的设计[J]. *光子学报*, 2016, **45**(1): 0104003.



- [8] WANG Wei, BAO Xiao-yuan, CHEN Li, *et al.* A CMOS single photo avalanche diode device with high photon detection efficiency[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(8): 0823001.  
王巍, 鲍孝圆, 陈丽, 等. 高探测效率 CMOS 单光子雪崩二极管器件[J]. 光子学报, 2016, **45**(8): 0823001.
- [9] LI Gui-ke, FENG Peng, WU Nan-jian. A novel monolithic ultraviolet image sensor based on a standard CMOS process [J]. *Journal of Semiconductors*, 2011, **32**(10): 133-138.
- [10] CHEN Chang-ping, ZHAO Yong-jia, ZHOU Xiao-ya, *et al.* Modeling, fabrication and measurement of a novel CMOS UV/blue-extended photodiode[J]. *Journal of Central South University*, 2014, **21**(10): 3821-3827.
- [11] PAUCHARD A, ROCHAS A, RANDJELOVIC Z, *et al.* Ultraviolet avalanche photodiode in CMOS technology[C]. *International Electron Devices Meeting Technical Digest*, 2000: 709-712.
- [12] WANG Han, JIN Xiang-liang, CHEN Chang-ping, *et al.* A novel integrated ultraviolet photodetector based on standard CMOS process[J]. *Chinese Physics B*, 2015, **24**(3): 418-422.
- [13] SHI L, SARUBBI F, NANVER L K, *et al.* Optical performance of B-layer ultra-shallow-junction silicon photodiodes in the VUV spectral range[J]. *Procedia Engineering*, 2010, **5**(3): 633-636.
- [14] JO S H, BAE M, ChOI B S, *et al.* High-sensitivity active pixel sensor with variable threshold photodetector[C]. *SPIE Sensing Technology + Applications. International Society for Optics and Photonics*, 2015: 1-7.
- [15] CHEN Chang-ping, JIN Xiang-liang, LUO Jun. A novel composite UV/blue photodetector based on CMOS technology: design and simulation[J]. *Optoelectronics Letters*, 2013, **9**(6): 414-417.
- [16] 艾罗拉 N. 用于 VLSI 模拟的小尺寸 MOS 器件模型:理论与实践[M]. 张兴, 李映雪, 等译. 北京:科学出版社, 1999: 259-283.
- [17] CAMPOS F S, FARAMARZPOUR N, MARINOV O, *et al.* Photodetection with gate-controlled lateral BJTs from standard CMOS technology[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, **13**(5): 1554-1563.