

## GaN 基紫外探测器读出电路注入效率

马 丁<sup>1,2,3</sup>, 刘福浩<sup>1,2</sup>, 李向阳<sup>1,2</sup>, 张 燕<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 读出电路的注入效率是决定紫外焦平面探测器性能的重要因素。基于 GaN 基 p-i-n 结构日盲紫外探测器以及 CTIA 结构读出电路的等效模型, 对探测器信号读出的电荷注入效率进行了分析, 得到了注入效率的表达式。分析了注入效率与积分时间、探测器等效电阻、探测器等效结电容、CTIA 电路中运算放大器增益的依赖关系, 并指出了放大器增益是有效影响注入效率的重要可控因素之一, 可以用提高增益的方法获得更大的注入效率。设计了几种不同增益的运算放大器电路, 并分别构成 CTIA 结构读出电路。采用 GF 0.35  $\mu\text{m}$  2P4M 标准 CMOS 工艺设计电路版图并进行流片。将紫外探测器分别连接至具有不同放大器增益的 CTIA 读出电路并进行测试, 通过对比注入效率的理论分析结果与实际测试结果, 可以得知, 注入效率的理论分析与实验结果吻合较好。

**关键词:** 注入效率; 紫外探测器; CTIA 结构读出电路

**中图分类号:** TN23 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1120001

## Injection efficiency of GaN based ultraviolet detector readout circuit

Ma Ding<sup>1,2,3</sup>, Liu Fuhao<sup>1,2</sup>, Li Xiangyang<sup>1,2</sup>, Zhang Yan<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The injection efficiency of the readout circuit is an important factor that determines the performance of ultraviolet (UV) focal plane array detectors. Based on the equivalent model of the gallium nitride (GaN) based p-i-n structure solar blind UV detector and the capacitor feedback transimpedance amplifier (CTIA) readout circuit, the injection efficiency of photo-generated carrier of the detector was analyzed, then the expression of injection efficiency was obtained. The relationship among injection efficiency and integration time, the equivalent resistor and capacitor of UV detector, the gain of amplifier in

收稿日期: 2017-03-25; 修订日期: 2017-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(61106097, 61204134, 11304335); 上海市自然科学基金(16ZR1441300)

作者简介: 马丁(1984-), 男, 博士生, 主要从事红紫外探测器读出电路相关方向的研究。Email: mading@mail.sitp.ac.cn

导师简介: 李向阳(1969-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事窄禁带半导体红外探测器和宽禁带半导体紫外探测器方面的研究。  
Email: lixy@mail.sitp.ac.cn

CTIA was analyzed. The result indicates the gain of amplifier in CTIA is one of the crucial importance controllable factor that can affect the injection efficiency. Meanwhile, higher injection efficiency can be obtained by improving the gain of amplifier in CTIA. Several amplifiers with different gain were presented, and the CTIA structure readout circuits were made up by using these different amplifiers. A chip was designed and fabricated by using 0.35  $\mu\text{m}$  2P4M mixed signal CMOS process. The ultraviolet detector was individually connected to the CTIA readout circuit with different amplifier gain and the test was carried out. Then the theoretical analysis result of injection efficiency was compared with the testing results. It indicates that the theoretical analysis of injection efficiency agrees well with the actual experimental test result.

**Key words:** injection efficiency; UV detector; CTIA structure readout circuit

## 0 引言

紫外探测技术是继红外和激光探测之后的又一项重要的光电探测技术,近年来得到了极大关注。紫外探测技术拥有极为广泛的应用前景,在空间紫外大气探测、火焰探测、生物医药分析、电晕放电检测、海洋溢油、指纹识别、保密通信等方面都有紫外探测的需求<sup>[1-5]</sup>。

随着微电子技术和半导体制造水平的不断提高,GaN 材料制备工艺逐渐成熟,新型的 GaN 基紫外探测器逐渐成为了研究的热点。GaN 材料是宽禁带直接带隙半导体材料,载流子迁移率高,并且能够耐高温,是制作紫外探测器的理想材料。使用 GaN 材料制备的紫外探测器具有响应波段可调、响应速度快、暗电流低、抗辐射能力强等优点,同时,在恶劣环境中仍具有优良的器件性能<sup>[6-7]</sup>。因此,GaN 基材料在紫外探测领域具有极高的研究意义及应用价值。

紫外焦平面探测器一般是由紫外探测器阵列和读出电路两部分通过钢柱倒焊连接而成。读出电路的作用是将紫外探测器阵列感光后产生的电信号经过积分放大、采样保持后,通过多路传输器输出至后续信号处理电路,其性能直接影响了紫外焦平面探测器的性能<sup>[8]</sup>。目前,主流的读出电路结构有直接注入(DI)型、源跟随器(SFD)型、电容跨导放大器(CTIA)型等<sup>[9-12]</sup>。读出电路的注入效率是衡量读出电路性能的一个重要指标,定义为流入读出电路的电流与探测器光生电流的比值。由于紫外探测器光电信号很弱,为了获得高性能的紫外焦平面探测器,则要求读出电路具有较高的注入效率。CTIA 结构读出电路具有噪声低、偏置电压稳定、输出线性度好等优点,

同时在低背景下具有较高的注入效率,是设计紫外焦平面探测器读出电路的一种常用结构<sup>[13-15]</sup>。

在之前紫外焦平面探测器读出电路的研究工作中,对注入效率的研究均为理论推导及电路仿真。结合探测器与 CTIA 读出电路互连后测试结果的分析,则国内外均未见有报道。因此,为了完善紫外探测器读出电路的相关理论,并为日后读出电路的设计工作提供理论依据,文中对紫外探测器读出电路的注入效率展开了进一步的研究。

在焦平面探测器中,每个像元具有相同的探测器结构与读出电路结构,不同的像元其等效模型一致。因此,为了分析读出电路的注入效率及其影响因素,文中所选择的研究对象为 CTIA 结构读出电路中单元读出电路的注入效率。基于 GaN 基 p-i-n 结构单元紫外探测器及单元 CTIA 电路的等效模型进行了分析及理论计算,同时进行了实验验证。

## 1 CTIA 结构读出电路及等效模型

紫外探测器在偏置电压为零时暗电流最小,在应用中为了减小暗电流带来的影响,一般将探测器两端分别接在运算放大器的正、反向输入端。由于运算放大器具有虚短路的特性,可以保证探测器在近似零偏的状态下工作。图 1 为 CTIA 读出电路结构图。此电路中采用传输门作为复位开关,可以有效减小在开关过程中由于电荷馈通效应产生的噪声。 $C_{\text{int}}$  为积分电容。在复位开关打开时,放大器输出端将为复位至参考电压  $V_{\text{ref}}$ 。当复位开关关闭时,CTIA 电路将对光电流  $I_{\text{ph}}$  进行积分。此时  $V_o = V_{\text{ref}} - \frac{I_{\text{int}} t_{\text{int}}}{C_{\text{int}}}$ 。注入效率定义为积分的光电流  $I_{\text{int}}$  与探测器产生的光电流  $I_{\text{ph}}$  之比,即  $\eta = \frac{I_{\text{int}}}{I_{\text{ph}}}$ 。

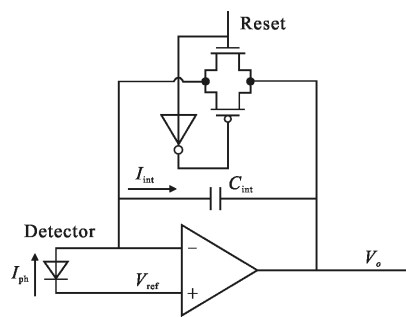


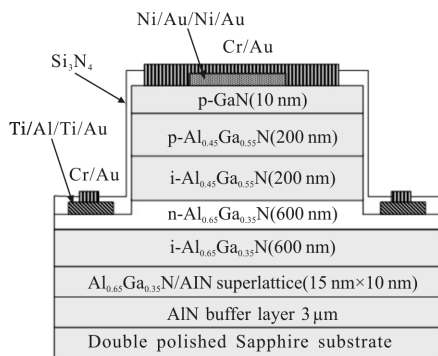
图 1 CTIA 读出电路结构

Fig.1 CTIA readout circuit structure

GaN 基 p-i-n 结构日盲紫外探测器的器件结构如图 2(a)所示。探测器可以等效为电流源、电容与电阻的并联组合,其等效模型如图 2(b)所示。其中,  $I_{ph}$  为探测器光电流,大小由公式(1)决定:

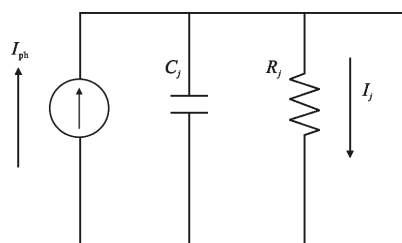
$$I_{ph} = R_\lambda E_\lambda A \quad (1)$$

式中:  $R_\lambda$  为探测器响应率;  $E_\lambda$  为辐照强度;  $A$  为探测器光敏面面积。



(a) p-i-n 结构日盲紫外探测器结构图

(a) Structure diagram of p-i-n solar blind UV detector



(b) 探测器等效模型

(b) Equivalent model of UV detector

图 2 p-i-n 结构暗紫外探测器结构图及探测器等效模型

Fig.2 Structure diagram of p-i-n solar blind UV detector and equivalent model of UV detector

$C_j$  为探测器结电容,由公式(2)决定:

$$C_j = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (2)$$

式中:  $\epsilon_0$  为真空介电常数;  $\epsilon_r$  为相对介电常数;  $d$  为耗尽层宽度,其值在  $10^{-12}$  F 量级。

$R_j$  为探测器等效并联电阻,其值与探测器暗电流相关,通常为  $10^9 \Omega$  量级。

由于存在密勒效应(Miller Effect),积分电容  $C_{int}$  在输入端等效为一个电容值为  $(1+A)C_{int}$  的电容,则如图 1 所示的 CTIA 结构读出电路等效模型如图 3 所示。

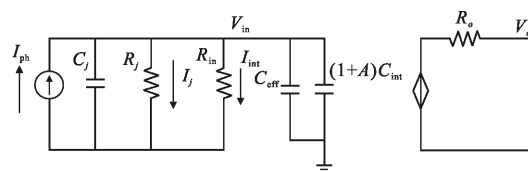


图 3 探测器与读出电路互联后的等效电路模型

Fig.3 Equivalent circuit model after the interconnection between detector and the CTIA structure readout circuit

图中  $C_{eff}$  为探测器等效输入电容,  $R_{in}$  为运算放大器输入等效电阻。

## 2 注入效率理论推导

探测器在有光照和无光照情况下的电流变化即为光电流  $I_{ph}$ ,由光电流引起的输入电压变化为  $v_{in}(t)$ ,则有:

$$C_j = \frac{dv_{in}(t)}{dt} + \frac{v_{in}(t)}{R_j} + (1+A)C_{int} \frac{dv_{in}(t)}{dt} + \frac{v_{in}(t)}{R_{in}} + C_{eff} \frac{dv_{in}(t)}{dt} = I_{ph} \quad (3)$$

于是可以得到:

$$v_{in}(t) = \int_0^t \frac{1}{C_j + C_{eff} + (1+A)C_{int}} \exp \frac{-(t-\xi)}{R_{eq}[C_j + C_{eff} + (1+A)C_{int}]} I_{ph} d\xi \quad (4)$$

式中:  $R_{eq} = R_j || R_{in}$ ,为探测器等效并联电阻与运算放大器输入电阻并联后的等效值。由于 CMOS 放大器输入电阻  $R_{in} \gg 10^9 \Omega$ ,所以并联后电阻等效值  $R_{eq} \approx R_j$ 。  $C_{eff}$  为运算放大器输入端等效杂散电容,由于其值  $C_{eff} \ll (1+A)C_{int}$ ,故  $C_j + C_{eff} + (1+A)C_{int} \approx C_j + (1+A)C_{int}$ 。由公式(4)可以得出  $v_{in}(t)$ ,如公式(5)所示:

$$v_{in}(t) = I_{ph}R_j \left\{ 1 - \exp\left[ \frac{-t_{int}}{R_j[C_j + (1+A)C_{int}]} \right] \right\} \quad (5)$$

利用  $v_{in}(t)$  可以求出积分电流  $I_{int}$  为:

$$I_{int} = (1+A)C_{int} \frac{dv_{in}(t)}{dt} \quad (6)$$

综上所述, 可得到 CTIA 结构读出电路注入效率为:

$$\eta = \frac{I_{int}}{I_{ph}} = \exp\left( \frac{-t_{int}}{R_j[C_j + (1+A)C_{int}]} \right) \quad (7)$$

由公式(7)可以看出, 注入效率  $\eta$  由积分时间  $t_{int}$ 、积分电容  $C_{int}$ 、放大器增益  $A$  以及探测器的等效电阻  $R_j$  与等效结电容  $C_j$  决定。其中,  $t_{int}$  一般由探测器实际应用条件决定;  $C_{int}$  受单元面积限制, 同时为了获得高电荷增益, 一般都取值较小;  $C_j$  与  $R_j$  由探测器的器件结构及相关的工艺条件决定;  $A$  为 CTIA 结构中放大器的增益, 可以通过改变放大器的结构或电路参数来得到不同的增益值。在焦平面探测器读出电路设计中, 积分时间  $t_{int}$  与积分电容  $C_{int}$  所受限制较多, 其值变化余地较小, 而放大器增益  $A$  则可以通过对放大器结构或参数的改变得到较大幅度的改变, 是影响注入效率的一个有效且可控的因素。

### 3 电路设计及测试结果分析

CTIA 结构读出电路输出电压  $V_o = V_{ref} - \frac{I_{int}t_{int}}{C_{int}}$ , 则在有光照与无光照条件下的输出电压差值  $\Delta V$  表示为:

$$\Delta V = V_{ref} - V_o = \frac{I_{int}t_{int}}{C_{int}} \quad (8)$$

文中所设计的 CTIA 结构电路中, 放大器采用两级运算放大器, 电路结构如图 4 所示, M1~M5 管构成放大器的第一级, M6、M7 管构成第二级,  $C_c$  为补偿电容。

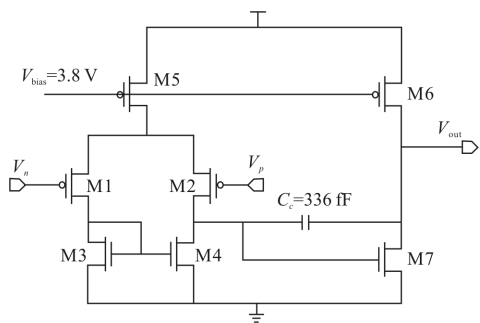


图 4 放大器电路结构图

Fig.4 Schematic of amplifier circuit

放大器增益可以表示为第一级与第二级增益的乘积, 即:

$$A = A_{V1}A_{V2} = \frac{g_{M1}}{g_{ds2} + g_{ds4}} \cdot \frac{g_{M7}}{g_{ds6} + g_{ds8}} = \frac{g_{M1}g_{M7}}{I_5 I_6 (\lambda_2 + \lambda_4) (\lambda_6 + \lambda_8)} \quad (9)$$

其中, MOS 管跨导  $g_m$  表示为:

$$g_m = \sqrt{2\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} I_D} \quad (10)$$

由公式(9)与(10)可以看出, 通过调整 MOS 管的宽长比, 可以使运算放大器具有不同的增益。为了研究运算放大器增益对注入效率的影响, 使用图 4 中的两级运算放大器结构, 通过调整 MOS 管参数, 设计了七种增益不同的运算放大器。各放大器第一级参数相同, 具体参数值如表 1 所示。

表 1 放大器第一级参数

Tab.1 Parameters of the first stage of the amplifier

MOSFET	$\Delta V/\mu\text{m}$
M1	5/2
M2	5/2
M3	2/2
M4	2/2
M5	4/1

通过改变第二级 M6、M7 管的宽长比, 使放大器具有不同的电压增益, 不同 MOS 管参数对应的放大器的增益如表 2 所示。

表 2 不同 MOS 管参数所对应放大器增益

Tab.2 Amplifier gain with different MOSFET parameter

$(W/L)_{M6}/\mu\text{m}$	$(W/L)_{M7}/\mu\text{m}$	Gain/dB
5/1	5/1	78.9
9.2/1	10/1	77.6
6.7/1	7/1	75.7
7.5/1	8/1	72.2
5/1	8/2	67.1
2.9/1	6.5/2	62.5
5/1	12/2	60.2

将 p-i-n 结构日盲紫外探测器分别连接至由不同增益的放大器构成的 CTIA 读出电路, 所构成的测试电路如图 5 所示, 积分电容  $C_{int} = 10 \text{ fF}$ , 积分时间为 10 ms。

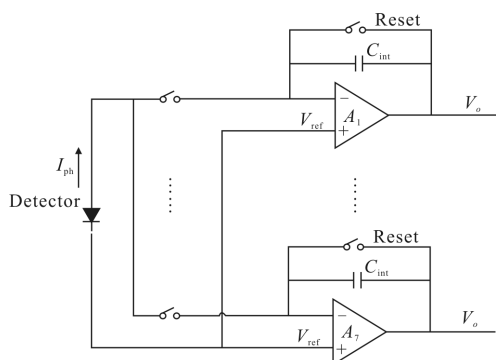


图 5 测试电路图

Fig.5 Schematic of test circuit

将与紫外探测器连接后的 CTIA 结构读出电路进行测试,测试系统框图如图 6 所示。

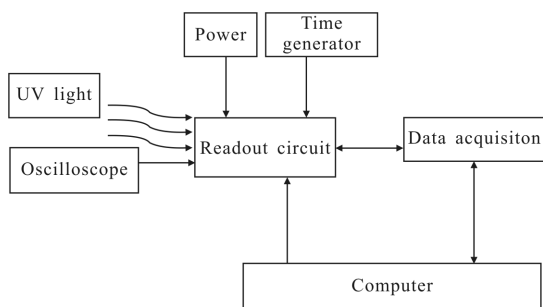


图 6 CTIA 读出电路测试系统框图

Fig.6 Block diagram of CTIA readout circuit test system

测试时,由脉冲发生器给出电路正常工作所需的时序脉冲。调整紫外光源,使出射光波长为 270 nm。然后使用数据采集系统,对有紫外光照射与无紫外光照射时的输出电压  $\Delta V$  进行采集。则可以得到测试电路  $A_1 \sim A_7$  在有光照与无光照情况下输出电压差值  $\Delta V$ ,测试结果如表 3 所示。

表 3 不同 CTIA 读出电路测试结果

Tab.3 Test result of different CTIA readout circuit

Gain/dB	$\Delta V/V$
78.9	0.3
77.6	0.28
75.7	0.28
72.2	0.24
67.1	0.18
62.5	0.18
60.2	0.14

由表 3 可知,在每种增益条件下都对应不同的注入效率,导致了输出电压不同。由公式(11)可得到:

$$\Delta V_{Ax} = \frac{I_{int} t_{int}}{C_{int}} = \frac{I_{ph} \eta_{Ax} t_{int}}{C_{int}} \quad (x=1,2, \dots, 7) \quad (11)$$

则有:

$$\frac{\Delta V_{Ax}}{\Delta V_{max}} = \frac{\eta_{Ax}}{\eta_{max}} \quad (12)$$

该实验中所采用紫外探测器并联等效电阻阻值  $R_j \approx 1 \times 10^9 \Omega$ ,等效结电容  $C_j \approx 1 \times 10^{-12} F$ ,则可结合公式(12)得到不同增益下的注入效率理论值,如表 4 所示。

表 4 不同 CTIA 读出电路注入效率理论值

Tab.4 Theoretical value of the injection efficiency of different CTIA readout circuit

Readout circuit	Gain/dB	Injection efficiency
$A_1$	78.9	89.4%
$A_2$	77.6	87.8%
$A_3$	75.7	85.1%
$A_4$	72.2	78.7%
$A_5$	67.1	65.5%
$A_6$	62.5	49.8%
$A_7$	60.2	41.1%

根据表 3 与表 4 的结果,对测试得到的输出电压与注入效率理论值进行归一化处理,得到  $\frac{\eta_{Ax}}{\eta_{max}}$  与  $\frac{\Delta V_{Ax}}{\Delta V_{max}}$  的曲线如图 7 所示。

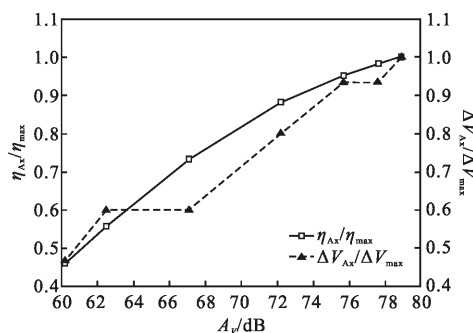


图 7  $\eta_{Ax}$  与  $\Delta V_{Ax}$  的归一化曲线

Fig.7 Normalized curves of  $\eta_{Ax}$  and  $\Delta V_{Ax}$

由于存在测量误差及测试系统噪声的影响,图 7 中所得到的不同 CTIA 电路的输出电压的归一化曲线与注入效率理论值的归一化曲线并非严格一

致。但仍可看出,两条曲线符合较好,CTIA 结构读出电路的注入效率随着增益提高而升高。由此则可验证,文中所推导的注入效率计算公式(7)的正确性。同时证明了使用高增益运算放大器构成的 CTIA 结构读出电路具有更高的注入效率。

## 4 结 论

文中对 GaN 基 p-i-n 结构紫外探测器与 CTIA 结构读出电路互连后的注入效率进行了理论分析,得到了注入效率的计算公式。而后将同一紫外探测器分别与所设计的具有不同放大器增益的 CTIA 读出电路互联,在探测器接收相同紫外辐照能量的条件下,测试各读出电路的输出电压,并得到各读出电路的输出电压值  $\Delta V_{Ax}(x=1, 2, \dots, 7)$ 。通过对比不同增益条件下读出电路注入效率理论值  $\eta_{Ax}$  与输出电压  $\Delta V_{Ax}$  的归一化曲线,验证了文中对紫外探测器读出电路注入效率理论分析的正确性。同时,所得公式可以作为注入效率计算的理论依据。从所得曲线中还可以得知,采用高增益运算放大器构成的 CTIA 结构读出电路,具有更高的注入效率。所以,在设计高注入效率的 CTIA 结构读出电路时,应首先考虑设计高增益的运算放大器。

## 参考文献:

- [1] Ni Qiliang, He Lingping, Liu Shijie, et al. Extreme ultraviolet single photon-counting imaging system based on induced charge position-sensitive anode [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(12): 2543–2548. (in Chinese)
- [2] Xue Qingsheng. Spaceborne multiband UV atmospheric sounder with two fields[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(9): 2101–2108. (in Chinese)
- [3] Chen Jian, Wang Weiguo, Gao Huibin, et al. Radiation calibration for UV detectors and standard transferring [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 423–429. (in Chinese)
- [4] Zhou Ying, Lou Hongwei, Zhou Yue, et al. Automatic real-time detection method of faint solar-blind ultraviolet corona [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(6): 926–932. (in Chinese)
- [5] Liu Wanjin, Hu Xiaoyan, Yu Songlin. Development overview of GaN-based ultraviolet detector [J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(11): 1210–1214. (in Chinese)
- [6] Wang Xiaoyong, Chong Ming, Zhao Degang, et al. Back-illuminated 283 nm AlGaIn solar-blind ultraviolet p-i-n photodetector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 1011–1014. (in Chinese)
- [7] Zhang Yan, Gong Haimei, Bai Yun, et al. UV detection applied to space and the research development of AlGaIn detector [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(11): 1009–1012. (in Chinese)
- [8] Hao Lichao, Chen Honglei, Li Hui, et al. Design of IRFPA ROIC with high injection efficiency [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1782–1787. (in Chinese)
- [9] Hsieh Chih-Cheng, Wu Chung-Yu, Jih Far-Wen, et al. Focal-Plane-Arrays and CMOS readout techniques of infrared imaging systems [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology August*, 1997, 7(4): 594–603.
- [10] Scribner D, Kruer M, Killiany J. Infrared focal-plane-array technology[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1991, 79(1): 66–85.
- [11] Xu Bin. Research on pixel level analog to digital conversion for ultraviolet focal plane array [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [12] Yao Libin. CMOS readout circuit design for infrared image sensors[C]//SPIE, 2009, 7384: 73841B.
- [13] Song Pengyun, Ye Zhenhua, Hu Weida, et al. Injection efficiency of DI and CTIA readout integrated circuit [C]// 2015 International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices, 2015: 7292832.
- [14] Wang Gang, Lu Shengli. Design of IRFPA ROIC with high injection efficiency[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2009, 32(2): 351–353. (in Chinese)
- [15] Wang Pan, Ding Ruijun, Ye Zhenhua. High frequency weak signal analog chain design of short-wavelength IRFPAs [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1370–1374. (in Chinese)