

# 一种紫外焦平面探测器电流响应率测试方法

邵秀梅<sup>1,2</sup> 丁洁莹<sup>1</sup> 陈新禹<sup>1</sup> 张 燕<sup>1</sup> 方家熊<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 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)  
<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 电流响应率是紫外探测器的重要特性参数,光敏芯片与读出电路芯片耦合成焦平面组件后,不能通过测试焦平面组件直接得到电流响应率参数。对  $128 \times 1$  电容反馈互阻抗放大器(CTIA)读出电路芯片进行了系统的测试,得到了读出电路的积分电容、源随器增益。同时,采用自研的紫外探测器高精度定标测试系统,分别对  $128 \times 1$  铝镓氮 (AlGaN) 紫外探测器光敏芯片、 $128 \times 1$  紫外焦平面探测器组件进行测试,求得了从焦平面探测器推算电流响应率的方法。结果表明,直接标定光敏芯片的电流响应率与测试焦平面组件间接推算的电流响应率基本一致,相对偏差约 5%。该方法简便、准确,可以为综合评价紫外焦平面探测器的性能提供重要参数。

**关键词** 探测器;紫外焦平面;测试;电流响应率

中图分类号 O434 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200929s1.0242

## A Test Method for Current Responsivity of UV FPA Detector

Shao Xiumei<sup>1,2</sup> Ding Jieying<sup>1</sup> Chen Xinyu<sup>1</sup> Zhang Yan<sup>1</sup> Fang Jiaxiong<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 200083, China  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

**Abstract** Current responsivity is an important characteristic of UV detector which cannot be measured directly after the coupling between detector array and readout integrated circuit (ROIC) chip. It's very significant on the measurement for current responsivity of UV Focal plane array (FPA) detector. The  $128 \times 1$  ROIC chip were measured. The integration capacitance and gain of source follower of ROIC chip were analyzed. Then,  $128 \times 1$  AlGaN photosensitive chip and  $128 \times 1$  UV FPA detector were tested by using a special system which was developed independently for high-accuracy measurement of UV detector. An indirect test method for current responsivity of UV FPA detector was studied and set up. The current responsivities by testing photosensitive chip directly were basically consistent with those by testing UV FPA indirectly. The relative deviation is about 5%. This test method is very easy and reliable, so can provide significant parameters to the comprehensive evaluation of UV FPA.

**Key words** detectors; ultraviolet focal plane array; measurement; current responsivity

## 1 引 言

近年来,紫外探测在军事、民用领域的研究与应用越来越广泛,从而促进了紫外探测器的迅速发展<sup>[1~4]</sup>。对紫外焦平面探测器(FPA)的研制者和用户而言,电流响应率是评价探测器性能的重要特性参数<sup>[5,6]</sup>,光敏芯片与读出电路芯片耦合成 FPA 组

件后,不能通过测试 FPA 直接得到电流响应率参数。目前常用的方法是在读出电路与光敏芯片互连之前,对光敏芯片进行性能测试,获得的电流响应率作为最终评价紫外 FPA 性能的参数之一。

本文采用自研的紫外探测器高精度定标测试系统,分别对  $128 \times 1$  AlGaN 紫外探测器光敏芯片、

**基金项目:** 国家自然科学基金(60708028)资助项目

**作者简介:** 邵秀梅(1978—),女,博士研究生,助理研究员,主要从事紫外电学定标热释电探测器的研制、高精度紫外探测器定标测试等方面的研究。E-mail: shaoxm@mail. sitp. ac. cn

**导师简介:** 方家熊(1939—),男,院士,研究员,主要从事光传感器方面的研究。E-mail: jxfang@mail. sitp. ac. cn

128×1 电容反馈互阻抗放大器(CTIA)读出电路芯片、128×1紫外 FPA 组件进行测试,通过测试和分析得到了读出电路的积分电容、源随器增益,研究直接测试 FPA 组件性能间接得到其电流响应率的方法,对紫外 FPA 的性能评价和使用具有积极意义。

## 2 原理分析

本文研究的紫外探测器光敏芯片是 128×1 背照射铝镓氮(AlGaN)线列光伏器件,像元的光敏面尺寸为 200 μm×85 μm,像元中心距为 100 μm,光敏芯片与宝石过渡电极板通过钢柱倒焊互连。128×1 CMOS 读出电路输入级采用的是电容反馈互阻抗放大器(CTIA)结构<sup>[7]</sup>,输出级为源随器结构,采用相关双采样技术,两路输出。读出电路与宝石过渡电极板通过键压互连,从而实现光敏芯片与读出电路的耦合,组件采用双列直插金属管壳封装,无窗口。

文中采用的 CTIA 型读出电路,当光敏元接收光信号并产生与信号值相关的电荷,光电流积累在积分电容上,积分电容的输入端与光敏元相连并保持恒定,输出端的电压随着积分过程的进行而线性下降。积分时间结束后进行采样并通过多路开关采样保持,信号电压为参考电压与积分后采样电压的差值,保持的信号最终由源随器输出,光电流  $I_{det}$  可以按照下式推算<sup>[8]</sup>：

$$I_{det} = \frac{V_{out} \cdot (C_{int} + \frac{C_{int} + C_{det}}{A_{v_{op}}})}{A_v \cdot T_{int}}, \quad (1)$$

式中  $V_{out}$  为 FPA 的信号电压,  $C_{int}$  为电路积分电容,  $C_{det}$  为探测器寄生电容,  $A_{v_{op}}$  为运放的电压增益,  $T_{int}$  为积分时间,  $A_v$  为电路源随器增益。一般情况下,运放的电压增益  $A_{v_{op}} \gg 1000$ , (1)式可以简化为

$$I_{det} = \frac{V_{out} \cdot C_{int}}{A_v \cdot T_{int}}, \quad (2)$$

其中  $A_v$  和  $C_{int}$  可以通过实际测试确定,再测试 FPA 的信号电压,即可通过(2)式计算光电流。结合紫外辐射功率的定标,得到 FPA 的电流响应率。

## 3 读出电路测试

### 3.1 读出电路源随器增益

采用图 1 所示的系统对读出电路进行测试。源

随器在线性段的电压增益  $A_v$  为输出电压  $V_{out}$  与输入电压  $V_{in}$  的比值<sup>[9]</sup>。由于读出电路为集成电路,源随器的输入端没有芯片片外引脚,无法直接将电压加载到输入端。实际测试中将参考电压  $V_{ref}$  加载到运放的正输入端,根据运放的输入虚地原理,其正输入端和负输入端电压在正常工作区间内相同,通过调整外加的控制电压,使加载到源随器的  $V_{in}$  与外加的  $V_{ref}$  相同。根据在不同  $V_{ref}$  条件下  $V_{out}$  的输出,可以计算得到源随器的增益:

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{V_{out1} - V_{out2}}{V_{ref}}, \quad (3)$$

式中  $V_{out2}$  即为参考电压  $V_{ref}$ 。

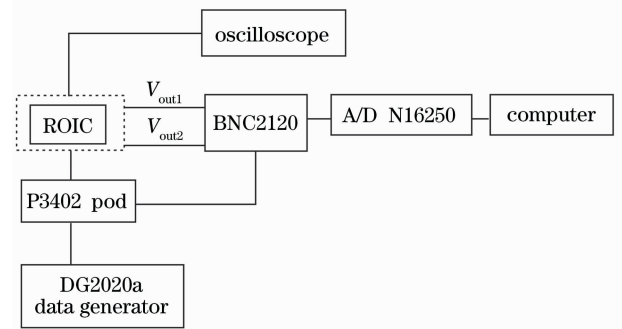


图 1 测试系统连接示意图

Fig. 1 Connection diagram of test system

在实际测试中,改变  $V_{ref}$  数值,采集输出电压  $V_{out1}$ ,在线性区间内进行拟合,得到的曲线斜率即为源随器的增益。随机挑选了 9 条 128×1 读出电路,按照以上的测试方法进行测试。图 2 为编号分别为 ODD-T4、EVEN-T4 电路上读出单元 1、读出单元 40、读出单元 80、读出单元 120、读出单元 128 在不同  $V_{ref}$  下的  $V_{out1}$ 。

从图可见,同一条电路上不同读出单元的测试数据基本一致,因此可以计算每条电路 128 个读出单元的平均值,对于不同的  $V_{ref}$ ,在线性区间内用最小二乘法拟合曲线的斜率,即源随器的  $A_v$ 。以 ODD-T4、EVEN-T4 电路为例,其线性区间约为 1.6~3.5 V,将 1.7~3.4 V 区间内的测试数据通过 origin 软件进行拟合,其  $A_v$  分别为 0.78236 和 0.77665。按照同样方法测试了 7 条电路,拟合得到的结果见表 1。从表中可见,随机抽测的 9 条电路,其  $A_v$  基本一致,相对标准偏差仅为 0.25%,平均值为 0.779。

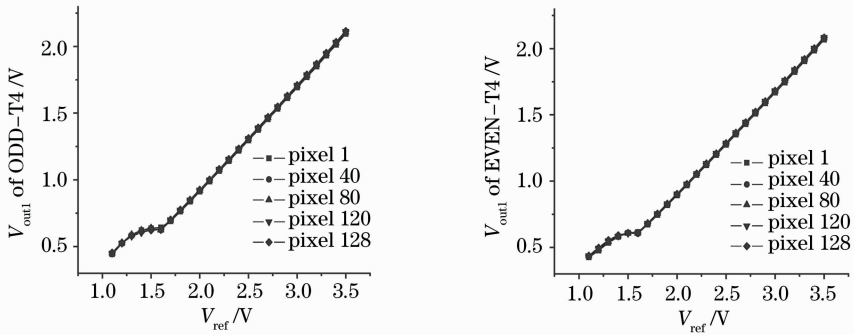
图 2 不同  $V_{ref}$  下的  $V_{out}$ Fig. 2 The relationship between  $V_{ref}$  and  $V_{out}$ 

表 1 读出电路源随器增益拟合结果

Table 1 Best-fit parameters of source follower gain of readout integrated circuit chip

Serial number	$k$	$R$	Standard deviation
odd-T4	0.78236	0.99992	0.00541
odd-T1	0.77968	0.99992	0.00534
odd-T18	0.77833	0.99992	0.00538
even-T4	0.77665	0.99992	0.00552
even-T1	0.78048	0.99992	0.00552
even-T18	0.78037	0.99992	0.00544
even-T11	0.77844	0.99992	0.00544
even-T19	0.77661	0.99991	0.00563
even-T20	0.77754	0.99992	0.00545

### 3.2 读出电路源积分电容

设计的 CTIA 读出电路积分电容为 1 pF, 实际电容由于受到流片工艺的限制, 与理论设计值可能存在一定的偏差。采用图 1 所示的系统测试电路实际的积分电容, 在运放的负端串接一个大电阻  $R_{in}$ , 在电阻的另一端加偏压  $V_{in}$ , 向运放的负端注入一个微小的电流, 测试  $V_{out}$  端的输出电压在积分时间内

的输出变化, 拟合  $V_{out}$  随积分时间变化的斜率  $k$ , 按 (4) 式计算积分电容  $C_{int}$ 。式中  $V_{ref0}$  为运放负极处的实际电压。

$$C_{int} = -\frac{V_{in} - V_{ref0}}{R_{in}} \cdot \frac{A_v}{k}. \quad (4)$$

随机抽取两条电路 odd-T1 和 even-T1 中的 3 个读出单元进行测试。参考电压为 2.5 V, 选取 150 M $\Omega$  左右的电阻作为串接电阻  $R_{in}$ , 因为注入电流不能太大, 因此将偏压  $V_{in}$  控制在参考电压附近。以 odd-T1 电路为例, 在第 74 读出单元串接电阻 152.2 M $\Omega$ ,  $V_{in}$  分别设定为 2.480 V、2.540 V 和 2.599 V, 测试不同  $V_{in}$  下电路  $V_{out}$  在积分时间内的输出变化。在线性范围内, 拟合曲线的斜率  $k$ , 代入 (4) 式, 即可计算得到 odd-T1-p74 电路单元在不同  $V_{in}$  的积分电容值。按照同样的方法, 测试了 even-T1 电路中的 p1、p124 读出单元。三个电路单元的积分电容见表 2 所示。可见, 电路的积分电容基本一致, 相对标准偏差为 1.66%, 平均值约为 1.17 pF, 略高于设计值 1 pF。

表 2 读出电路积分电容计算结果

Table 2 The results of integration capacitance of readout intergrated circuit chip

Serial number	$R_{in}/M\Omega$	$V_{in}/V$	$A_v$	$V_{ref0}/V$	$C_{int}/PF$
odd-T1-p74	152.2	2.599	-422.975	2.503	1.16
odd-T1-p74	152.2	2.54	-164.076	2.503	1.15
odd-T1-p74	152.2	2.48	100.429	2.503	1.17
even-T1-p1	150.8	2.599	-433.978	2.502	1.15
even-T1-p1	150.8	2.54	-171.191	2.502	1.15
even-T1-p1	150.8	2.48	98.543	2.502	1.15
even-T1-p124	148.4	2.599	-432.701	2.5	1.20
even-T1-p124	148.4	2.54	-173.898	2.501	1.18
even-T1-p124	148.4	2.48	92.674	2.501	1.19

## 4 UV FPA 电流响应率

### 4.1 光敏芯片定标测试

当通过实际测试确定读出电路的源随器增益  $A_v$  和积分电容  $C_{int}$  后, 即可直接测试 UV FPA, 再根据 (2) 式得到电流响应率。为了从实验上验证该方

法,在光敏芯片与电路芯片互连之前,先对光敏芯片进行定标测试。采用本课题组自研的紫外探测器高精度定标测试系统<sup>[10,11]</sup>,该测试系统的关键部件是紫外辐射功率定标系统,通过电定标探头实现紫外辐射功率和电学加热功率的等效,在光电等效基础上实现紫外辐射功率的绝对定标。采用调制锁相方式采集待测探测器的电流信号,然后通过高精度电移平台将电定标探头移到同一光斑处,标定紫外辐射功率,即可得到光敏芯片的电流响应率。

抽测了3条128×1背照射 AlGa<sub>N</sub> 线列光伏芯片中6个像元,器件的光谱响应范围是300~365 nm,在其响应峰值360 nm 波段测试,125-2-5 芯片和 125-2-6 芯片接收的功率密度为0.223 W/m<sup>2</sup>,125-2-7 芯片接收的功率密度为0.181 W/m<sup>2</sup>,结果见表3。3条光敏芯片的电流响应率平均值分别为0.101 A/W、0.100 A/W 和0.097 A/W。

表3 128×1 AlGa<sub>N</sub> 光敏芯片的电流响应率

Table 3 The current responsivity of 128×1 AlGa<sub>N</sub> photosensitive chip

Chip 125-2-5			Chip 125-2-6			Chip 125-2-7		
Pixels	Current /nA	Ri /(A/W)	Pixels	Current /nA	Ri /(A/W)	Pixels	Current /nA	Ri /(A/W)
A10	0.175	0.103	A8	0.173	0.102	B1	0.137	0.099
A7	0.174	0.102	A6	0.170	0.100	B6	0.136	0.098
A5	0.173	0.102	A3	0.165	0.097	B10	0.129	0.093
A3	0.167	0.098	B8	0.164	0.096	A1	0.134	0.097
B6	0.171	0.100	B6	0.171	0.100	A5	0.135	0.098
B3	0.170	0.100	B3	0.175	0.103	A10	0.136	0.098

#### 4.2 UV FPA 定标测试

将测试了的3条光敏芯片与读出电路互连,测试紫外 FPA 探测器的性能。同样在360 nm,采集3个 FPA 的128元响应信号,积分时间950 μs。扣除盲元后,计算各 FPA 的信号平均值,按照(2)式推算光电流,即得到 FPA 的平均电流响应率,见表4。

表4 128×1 AlGa<sub>N</sub> FPA 测试结果

Table 4 The testing results of 128×1 AlGa<sub>N</sub> focal plane array

FPA number	Non-effective pixel factor/ %	Average signal / V	Irradiation power / (W/m <sup>2</sup> )	Average current / nA	Average Ri / (A/W)
125-2-5	0	0.2486	0.221	0.393	0.105
125-2-6	3.91	0.2223	0.221	0.351	0.094
125-2-7	0	0.1377	0.141	0.218	0.091

综合比较表3和表4的测试结果,可以发现,对于同样的3条光敏芯片,在与电路互连前后的电流响应率结果基本一致,平均电流响应率的相对偏差分别为3.81%、-6.81%和-6.59%。这个偏差可能来自于以下两方面:芯片仅抽测了6个像元取平均值,而 FPA 是一次采集128个像元信号,仅扣除了盲元后取平均;建立的紫外探测器高精度定标测试系统的不确定度约为3%~5%,前后两轮测试中存在一定的偏差也是合理的。

128×1 CTIA 读出电路芯片,其源随器增益为0.779,积分电容为1.17 pF。分别定标测试了128×1 AlGa<sub>N</sub>紫外探测器光敏芯片、128×1 紫外 FPA 在360 nm 波段处的电流响应率。结果表明,3个 FPA 组件的平均电流响应率与直接标定光敏芯片得到的平均电流响应率相比,结果基本一致,相对偏差分别为3.81%、-6.81%和-6.59%。鉴于同一批电路的参数基本一致,确定了电路参数后可直接测试 FPA 性能推算其电流响应率,简便、准确,为综合评价 FPA 性能提供重要的评价参数。

#### 5 结 论

研究了直接测试紫外 FPA 性能,推算其电流响应率的方法,并通过实验进行了验证。测试了

#### 参 考 文 献

1 Razeghi M, Rogalski A. Semiconductor ultraviolet detectors[J]. *J. Appl. Phys.*, 1996, 9(10): 7433~7473

- 2 E. Muñoz, E. Monroy, J. L. Pau, *et al.*. (Al,Ga)N ultraviolet photodetectors and applications[J]. *Phys. Status Solidi (a)*, 2000, **180**(1): 293~300
- 3 Brown J D, Boney J, Matthews L. *et al.*. UV-specific(320-365 nm) digital camera based on  $128 \times 128$  focal plane array of GaN/AlGaIn p-i-n photodiodes [J]. *MRS Internet J. Nitride Semicond. Res.*, 2000, **5**(6): 1~10
- 4 McClintock R, Mayes K, Yansan A, *et al.*.  $320 \times 256$  Solarblind focal plane arrays based on  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(1): 011~117
- 5 Wang Jun, Zhao Degang, Liu Zongshun, *et al.*. GaN Schottky barrier ultraviolet detector [J], *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, **25**(6): 711~714  
王 俊, 赵德刚, 刘宗顺等, GaN 基肖特基结构紫外探测器[J]. *半导体学报*, 2004, **25**(6): 711~714
- 6 Malachowski, Michal J., Plucinski, *et al.*. Responsivity of GaN and (Ga, Al)N band-gap graded ultraviolet p-n detectors[C]. *SPIE*, 1999, **3884**: 324~331
- 7 Xu Yunhua, Zhang Song, Xie Wenqing, *et al.*. Input circuit of focal plane arrays[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(5): 555~558  
徐运华, 张 松, 谢文青等. 焦平面输入电路研究[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(5): 555~558
- 8 Fossum Eric R., Pain Bedabrata. Infrared readout electronics for space science sensors: state of art and future directions[C], *SPIE*, 1993, **2020**: 262~285
- 9 Behzad Razavi, Design of Analog CMOS Integrated Circuits[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2003: 57~63  
拉扎维. 模拟 CMOS 集成电路设计[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2003: 57~63
- 10 Shao Xiumei, Ding Jieying, Yu Yuehua *et al.*. Electrically calibrated pyroelectric detector for high-accuracy calibration of UV radiation[C], *SPIE*, 2007, **6834**: 68341E
- 11 Hu Qi, Gu Lingjuan, Hou Jianwei *et al.*. Ultraviolet enhanced electrically calibrated pyroelectric radiometer design[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2006, **27**(10): 1334~1337  
瑚 琦, 顾玲娟, 侯建伟等. 紫外增强型电学定标热释电辐射计 ECPR 的研制[J]. *仪器仪表学报*, 2006, **27**(10): 1334~1337