

用激光调阻法提高线列光导 PbS 焦平面探测器性能

侯治锦^{1,2}, 司俊杰^{1,2*}, 王巍^{1,2}, 吕衍秋^{1,2}, 彭震宇^{1,2}, 张国栋^{1,2}

(1. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471099;

2. 红外探测器技术航空科技重点实验室, 河南 洛阳 471099)

摘要:首次在国内报道了用激光调阻法提高线列 1×128 光导 PbS 红外焦平面探测器性能的研究成果. 针对 PbS 探测器芯片的特点, 用激光调阻法对采用负载电阻分流型电路的焦平面探测器的背景输出电平进行平坦化研究. 实验结果表明, 用激光调阻使背景电平平坦化之后, 通过优化器件的工作参数, 探测器平均黑体响应率由 4.45×10^6 V/W 提高到 8.82×10^6 V/W; 平均黑体探测率由 6.52×10^9 $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 提高到 1×10^{10} $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$; 动态范围由 46 dB 提高到 52 dB. 研究结果为今后的薄膜型焦平面探测器实用化提供了参考.

关键词:激光调阻; 红外焦平面探测器; 硫化铅; 背景输出电平平坦化

中图分类号: TN215; TN249 文献标识码: A

Performance improvement of PbS IR linear-array detector with its resistance tuned by laser

HOU Zhi-Jin^{1,2}, SI Jun-Jie^{1,2*}, WANG Wei^{1,2}, LV Yan-Qiu^{1,2},
PENG Zhen-Yu^{1,2}, ZHANG Guo-Dong^{1,2}

(1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471099, China;

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Infrared Detector, Luoyang 471099, China)

Abstract: The background output of the PbS detector is determined by the ratio of the resistance of the detector to that of the reference at the input of the readout circuit. The performance of 1×128 linear photoconductive (PC) PbS infrared focal plane arrays (IRFPAs) was improved by tuning the resistance of the detector with laser. The background out-put of IRFPAs is reduced by tuning the resistance of the detector. As a result, the average responsivity and detectivity of the detector is increased from 4.45×10^6 V/W to 8.82×10^6 V/W, and 6.52×10^9 $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ to 1×10^{10} $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$, respectively. The dynamic range is also increased from 46 dB to 52dB.

Key words: tuning the resistance of detector with laser, infrared focal plane arrays, PbS, background out-put uniformity improvement

PACS: 95.55. Rg

引言

响应波段在 $1 \sim 3 \mu\text{m}$ 的硫化铅 (PbS) 探测器以其在室温工作、成本低 (相对于制冷型红外探测器)、响应时间短、性能高 (相对于热探测器) 等优点满足成本低、灵敏和响应时间短等应用而备受关[1-2]. 光导 PbS 焦平面探测器在导弹制导、工业控制、红外成像等军民领域有着广泛应用[3]. 国外 Cal Sensors 公司和 Northrop Grumman 公司早已报道了

1×128 、 1×256 、 320×240 等 PbS 线列和面阵焦平面探测器, 国内关于此方面的研究很少.

线列 1×128 元光导 PbS 焦平面探测器通常采用负载电阻分流型电路来分流探测器的背景电流, 即每个探测单元包含同时制备的电阻相等的探测光敏元和相对应的负载. 负载电阻分流型电路消除背景电流的准确度受电阻精度的影响很大, 且不能根据探测器各元进行单独调整, 无法消除探测器的非均匀性.

收稿日期: 2013-01-28, 修回日期: 2013-09-09

基金项目: 航空科学基金 (2007ZC12003)

Foundation items: Supported by Aviation Science Foundation of China (2007ZC12003)

作者简介 (Biography): 侯治锦 (1982-), 男, 山西孝义人, 硕士, 主要从事红外焦平面探测器研究. E-mail: changhui090504@126.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: Si_Junjie@126.com

Received date: 2013-01-28, revised date: 2013-09-09

PbS 焦平面探测器中探测单元可采用不同薄膜制备方法获得,由于制备均匀性的原因,薄膜阻值很难保证一致,特别是采用化学浴沉淀法制备的薄膜阻值相差甚大.光敏元和相对应的负载之间的阻值差异将导致采用负载电阻分流型电路的线列光导 PbS 焦平面探测器工作时,加载偏压后有一个背景电流被送入放大器,此背景信号的产生将降低探测器信噪比和动态范围,特别是线列光导 PbS 焦平面探测器的各个探测元之间还存在此背景电流不同的情形,更进一步使探测器性能产生退化.

针对这种现状,提出了通过激光调阻法使线列 PbS 各探测单元光敏元电阻与负载电阻的阻值成一固定比例,达到使焦平面探测器的背景输出电平平坦,旨在探索焦平面探测器的性能提高方法,为薄膜型焦平面探测器的实用化提供了参考.

1 线列 PbS 焦平面探测器制备及背景输出电平分析

1.1 线列 PbS 焦平面探测器制备

线列 1×128 元光导 PbS 焦平面探测器采用 PbS 芯片和 CTIA 读出电路通过金丝球焊引线互连而成. PbS 薄膜是用化学浴沉淀法制备的,衬底为石英玻璃.探测器光敏元大小为 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$,中心距为 $100 \mu\text{m}$,负载大小为 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$.制备好的线列 1×128 元光导 PbS 焦平面探测器如图 1 所示.芯片与读出电路封装在壳体内.壳体中间为探测器芯片,左右为读出电路,底端为过渡引线片.

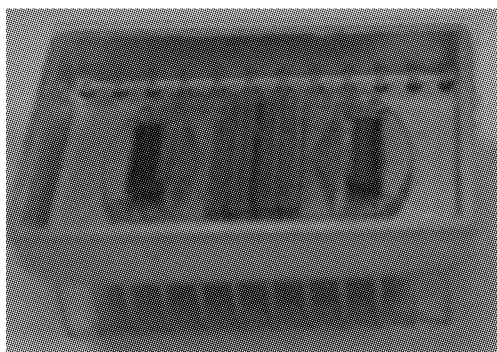


图 1 线列 1×128 元光导 PbS 焦平面探测器实物图
Fig. 1 1×128 linear PC PbS IRFPA detector

1.2 背景输出电平分析

不失一般性,随机连续抽取一组(10元)光敏元和相对应的负载,并对其阻值进行测试,结果见表 1.

表 1 激光调阻前光敏元阻值和负载阻值实验数据

Table 1 Resistance of photoactive detector and reference detector before tuning the resistance of detector with laser

像元编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
光敏元阻值/k Ω	95	111	103	109	90	125	107	118	104	103
负载阻值/k Ω	114	118	112	127	115	147	112	114	118	112
两者之比	0.83	0.94	0.92	0.86	0.78	0.85	0.95	1.03	0.88	0.92

由表 1 看出,光敏元阻值和负载阻值两者比值与理想值 1 相比,波动范围为 $-22\% \sim 3\%$.

利用红外焦平面测试系统得到的背景输出电平如图 2 所示.

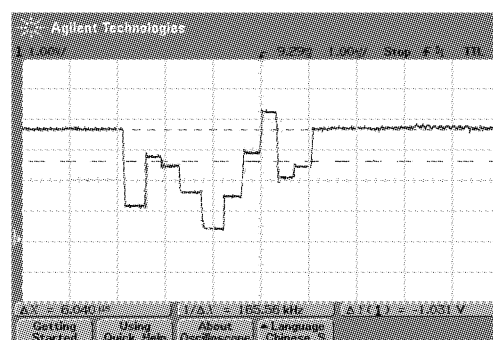


图 2 激光调阻前背景输出电平

Fig. 2 Background out-put before tuning the resistance of detector with laser

图 2 为表 1 实验数据所对应的背景输出电平.

从图 2 和表 1 中实验数据可以看出,背景输出电平中各光敏元背景输出电压与光敏元阻值和负载阻值两者比值是相对应的.这和下面的理论分析是吻合的:

图 3 为负载电阻分流型电路单元原理图,图中 R_d 为光敏元阻值; R_b 为负载阻值; V_{ref} 为参考电平; I_o 为背景输出电流; V_d 为加载在 R_d 上的偏压; V_b 为加载在 R_b 上的偏压.

如图 3 所示,假定电流注入 CTIA 方向为正,对采用负载电阻分流型电路的焦平面探测器而言,则有:

$$I_o = \frac{V_d - V_{ref}}{R_d} - \frac{V_{ref} - V_b}{R_b} \quad (1)$$

光敏元和负载所加偏压相等,设为 V_i ,则有

$$I_o = \frac{V_d - V_{ref}}{R_d} - \frac{V_{ref} - V_b}{R_b} = V_i \frac{(1 - \frac{R_d}{R_b})}{R_d} \quad (2)$$

由式(2)看出,理想情况下,当光敏元阻值 R_d 和负载阻值 R_b 相等时, I_o 为 0,即背景输出电平等于参考电平 V_{ref} ;当光敏元阻值大于负载阻值时, I_o 小于 0,即背景输出电平大于参考电平 V_{ref} ;当光敏元阻值小于负载阻值时, I_o 大于 0,即背景输出电平

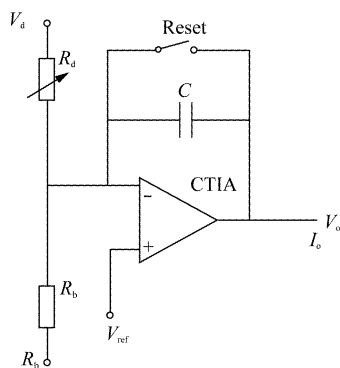


图3 负载电阻分流型电路单元原理图
Fig. 3 In put of the read out circuit with a reference resistor shunting the background current of the detector

小于参考电平 V_{ref} . 其中 I_o 得到的背景输出电压与 $\frac{R_d}{R_b}$ 是一一对应的. 这表明背景输出电平不平坦产生的原因是由于探测器自身的不均匀. 由于背景输出电平不平坦, 背景输出电平最大幅值约占输出信号最大幅值的 $4/5$, 这大大减小了探测器的动态范围.

2 激光调阻实现背景输出电平平坦化理论分析与应用

2.1 激光调阻实现背景输出电平平坦化理论分析

激光调阻是对阻值进行微调的方法, 基本原理是将适当功率密度的激光束通过可控镜照射在电阻膜上, 被照射的电阻材料因受高温, 在瞬间即被气化掉, 随着激光束的移动, 电阻膜被切割, 减小了电阻的有效导电面积, 导致阻值上升, 达到修调阻值的目的. 激光调阻的特点是只能使材料阻值变大.

针对激光调阻的特点, 对线列光导 1×128 PbS 焦平面探测器的阻值调节有两种实现方法. 方法一为用激光对光敏元阻值和负载阻值都进行调节, 使两者相等. 因为负载电阻分流型电路要求光敏元电阻 R_d 和负载阻值 R_b 相等, 所以这里选择用激光对光敏元阻值和负载阻值都进行调节. 当光敏元阻值小于负载阻值时, 用激光将光敏元阻值调大到与负载阻值相等; 当负载阻值小于光敏元阻值时, 用激光将负载阻值调大到与光敏元阻值相等.

方法二为用激光只对负载阻值进行调节. 由式(2)假设输出电流为 0 时, 可得:

$$\frac{V_d - V_{ref}}{V_{ref} - V_b} = \frac{R_d}{R_b} \quad (3)$$

式(3)说明当光敏元阻值和负载阻值成一定比例,

通过调节加载在负载上的偏压, 使光敏元两端偏压和负载两端偏压与光敏元阻值和负载阻值比例相同, 则输出电流为 0.

方法二对所有的负载阻值进行调节.

通过对两种方法分析比较, 发现采用激光对光敏元阻值进行调节, 牺牲了光敏元面积. 综合实际应用考虑, 这里选择了方法二.

本文将用激光调阻对焦平面探测器的负载阻值进行调节, 不仅使背景输出电平平坦化, 而且使探测器的动态范围增加, 进而提高探测器响应率和探测率.

2.2 激光调阻应用于背景输出电平平坦化

激光调阻应用于背景输出电平平坦化按如下步骤进行:

(1) 选择前述光敏元阻值和相对应的负载阻值之比的最小值 0.78 (见表 1) 作为基准值;

(2) 参照各探测单元光敏元阻值, 依据式(2), 求出各探测单元负载电阻需要调整到的目标阻值;

(3) 用激光对所选负载电阻进行调节: 选择半导体泵浦 Nd:YAG 的激光器, 波长为 $0.532 \mu\text{m}$, TEM₀₀ 单模, 光斑直径为 $10 \mu\text{m}$, 切割速度为 $1.25 \mu\text{m/s}$, 将探针的一端与作为负载的探测器的电极接触, 探针另一端与电流表连接, 起到实时监控阻值的目的. 为了保证测试环境, 试验在超净间进行, 满足环境温度为 295 K; 为了保证测试台的导热性, 将芯片放置在垫有热沉的实验台上.

3 实验结果与讨论

经激光调阻后的光敏元阻值和负载阻值实验数据见表 2.

表 2 激光调阻后光敏元阻值和负载阻值实验数据
Table 2 Resistance of photoactive detector and reference detector after tuning the resistance of detector with laser

像元编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
光敏元阻值/k Ω	95	112	102	109	91	125	107	118	105	103
欲达负载阻值/k Ω	121	142	132	140	115	159	137	151	134	132
实际负载阻值/k Ω	120	138	124	131	115	162	139	146	130	130
两者之比	0.79	0.81	0.83	0.83	0.79	0.77	0.77	0.81	0.8	0.79

由表 2 看出, 经过激光调阻, 光敏元阻值和负载阻值两者之比与基准值 0.78 相比, 波动范围为 $-1\% \sim 6\%$.

激光调阻后实际的负载阻值与欲达负载阻值有微小偏差, 这来自两方面原因: 一为 PbS 探测器阻值通常需要一定的稳定期, 所制备的 PbS 探测器可能

未完全达到稳定状态,使得 PbS 探测器自身阻值仍有波动;二为 PbS 探测器阻值随环境如温度、湿度等有微小波动。

图 4 为表 2 所对应背景输出电平。可以看出,激光调阻后背景输出电平相对于调阻前较为平坦。此时,调节 PbS 光敏元两端偏压 V_b ,使光敏元两端所加偏压($V_d - V_{ref}$)和负载两端所加偏压($V_{ref} - V_b$)成一定的比例。调节偏压 V_b 后的背景输出电平如图 5 所示。

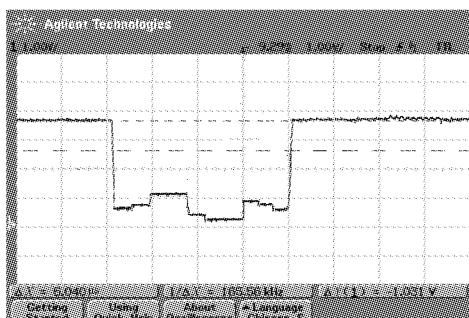


图 4 激光调阻后背景输出电平
Fig. 4 Background out-put after tuning the resistance of detector with laser

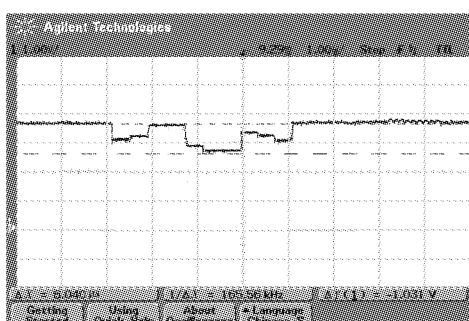


图 5 调节偏压 V_b 后的背景输出电平
Fig. 5 Background out-put after adjusting bias voltage

从图 5 可看出,背景输出电平相对较为平坦,此时背景电平最大幅值大约占输出信号最大幅值的 1/5。可见探测器的动态范围得到了明显的提高。依据红外焦平面阵列特性参数测试技术规范进行了测试。室温 300 K,黑体温度 700 K,黑体的辐射孔直径 5 mm,焦平面探测器与黑体辐射孔的距离为 300 mm。经实际测试,激光调阻前后探测器的响应率、探测率在相同测试条件下基本一致。于是可以通过优化探测器偏压等工作参数来使焦平面探测器响应率和探测率达到最佳。

激光调阻前后该组探测器探测性能表现为:

激光调阻前:在探测器偏压为 1.5 V,积分时间为 20 μ s,积分电容为 16 pF,读出电路偏置电压为 3.5 V 时,焦平面探测器的信号电压 V_s 为 0.45 V,

探测器平均黑体响应率达最佳值 4.45×10^6 V/W,平均黑体探测率达最佳值 6.52×10^9 $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

激光调阻后:这里选择通过调节探测器偏压使探测器响应率和探测率达到最佳。在探测器偏压为 3 V,其它条件不变,探测器平均黑体响应率达最佳值 8.82×10^6 V/W,平均黑体探测率达最佳值 1×10^{10} $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

激光调阻后探测器响应率和探测率最佳时探测器偏压为 3 V 的原因分析为:

设调节前探测器偏压为 V_i ,调节后的探测器偏压是 V_i 的 k 倍,即调节后的探测器偏压为 kV_i 。调节后的背景输出电压 V_o 、信号电压 V_s 均与 kV_i 有关,即 V_o 、 V_s 为 kV_i 的函数,则 CTIA 读出电路最大积分电压 V 可表示为

$$V = V_o(kV_i) + V_s(kV_i) \quad (4)$$

其中, $V_o(kV_i)$ 为调节探测器偏压后的背景输出电压; $V_s(kV_i)$ 为调节探测器偏压后的信号电压。

$V_o(kV_i)$ 与 kV_i 、 $V_s(kV_i)$ 与 kV_i 关系为信号电压与探测器偏压成正比关系^[4];背景输出电压与探测器偏压关系为:

光敏元与负载阻值之比所得基准值设为 α ,则光敏元上所加偏压与负载上所加偏压之比也为 α ,即 $\frac{V_d - V_{ref}}{V_{ref} - V_b}$ 。调节前探测器偏压 $V_d - V_{ref} = V_i$,激光调阻后的负载阻值为 R'_b ,由式(1)可得

$$I_o = \frac{V_d - V_{ref}}{R_d} - \frac{V_{ref} - V_b}{R'_b} = V_i \left(\frac{1}{R_d} - \frac{1}{\alpha R'_b} \right) \quad (5)$$

由式(5)可知,基准值 α 一定, R'_b 一定, V_i 与 I_o 成正比。

背景输出电压与探测器偏压的关系为

$$V_o = \frac{t_{int} I_o}{C_{int}} \quad (6)$$

将式(5)代入式(6)得

$$V_o = \frac{t_{int} I_o}{C_{int}} = \frac{t_{int}}{C_{int}} V_i \left(\frac{1}{R_d} - \frac{1}{\alpha R'_b} \right) \quad (7)$$

由式(7)可知背景输出电压与探测器偏压成正比关系。

因此,根据式(4)、式(5)及式(7)可得

$$V = V_o(kV_i) + V_s(kV_i) = k [V_o(V_i) + V_s(V_i)] \quad (8)$$

其中, $V_o(V_i)$ 为调节探测器偏压前的背景输出电压, $V_s(V_i)$ 为调节探测器偏压前的信号电压。

由式(8)可知,调节后探测器偏压与调节前比值 k 可以由 CTIA 读出电路最大积分电压 V 与调节探测器偏压前的背景输出电压和信号电压之和的比值求得。

CTIA 读出电路中采用信号处理电路 CDS 的积

分电容上积分得到最大电压 V 为 3V, 调节探测器偏压前的信号电压 $V_s(V_i)$ 为 0.45 V, 由图 5 可知调节探测器偏压前的背景输出电平 $V_o(V_i)$ 最大幅值为 1 V, 代入式(8), 计算求得 $k=2$, 即调节后的探测器偏压是调节前的 2 倍. 调节前的探测器偏压为 1.5 V, 即调节后的探测器偏压为 3 V. 所以探测器偏压为 3 V 时, 探测器响应率和探测率最佳.

激光调阻前后工作参数对比见表 3.

表 3 激光调阻前后工作参数表

Table 3 Comparison of working parameters of detector before and after tuning the resistance of detector with laser

测试条件	调阻前	调阻后
探测器偏压	1.5 V	3 V
积分时间	20 μ s	20 μ s
积分电容	16 pF	16 pF
读出电路偏置电压	3.5 V	3.5 V

激光调阻前后探测器的响应率、探测率对比如图 6、图 7 所示.

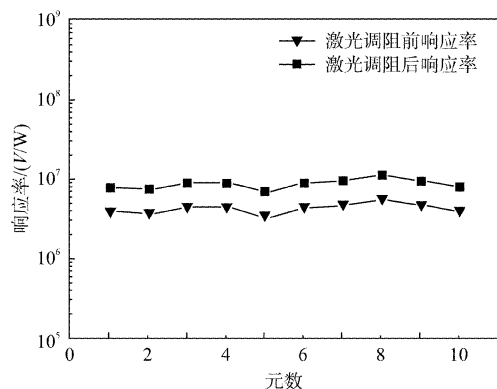


图 6 激光调阻前后探测器响应率对比图
Fig. 6 Comparison of response of detector before and after tuning the resistance of detector with laser

激光调阻前后探测器主要性能见表 4.

表 4 激光调阻前后探测器主要性能

Table 4 Comparison of performance of detector before and after tuning the resistance of detector with laser

探测器性能	调阻前	调阻后
平均黑体响应率	4.45×10^6 V/W	8.82×10^6 V/W
平均黑体探测率	6.52×10^9 $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$	1×10^{10} $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$
动态范围	46 dB	52 dB

从表 4 看出, 由于表 3 中探测器偏压增加为 2 倍, 则探测器的平均黑体响应率增为 2 倍. 这是由于探测器的响应率随着探测器偏压呈线性增长. 探测

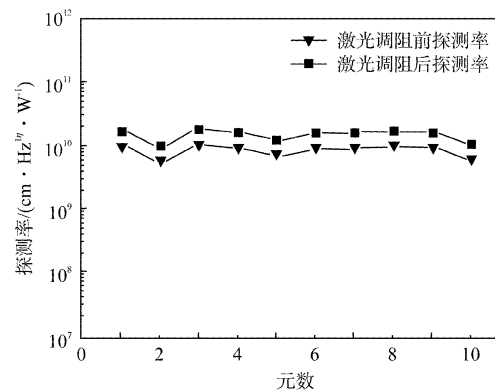


图 7 激光调阻前后探测器探测率对比图
Fig. 7 Comparison of detectivity of detector before and after tuning the resistance of detector with laser

器的平均黑体探测率增为约 1.5 倍. 探测器的动态范围增加为 52 dB.

可见, 通过激光调阻实现了背景输出电平平坦化. 通过进一步优化探测器偏压等工作参数, 提高了探测器的性能.

4 结论

研究了用激光调阻法对采用负载电阻分流型电路的线列 1×128 光导 PbS 焦平面探测器的背景输出电平平坦化. 由实验图表可以看出, 用激光调阻使背景电平平坦化之后, 通过优化器件的工作参数, 探测器平均黑体响应率由 4.45×10^6 V/W 提高到 8.82×10^6 V/W; 平均黑体探测率由 6.52×10^9 $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 提高到 1×10^{10} $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$; 动态范围由 46 dB 提高到 52 dB. 研究结果表明, 用激光调阻可以使薄膜型焦平面探测器背景输出电平平坦化, 通过优化器件的工作参数, 使探测器的性能得到提高. 研究结果为今后的薄膜型焦平面探测器实用化提供了参考.

References

- [1] Sánchez F J., Rodrigo M T, Vergara G, *et al.* Progress on monolithic integration of cheap IR FPAs of polycrystalline PbSe [C]. Proceedings of SPIE, 2005, 5783:592-598.
- [2] Rodrigo M T, Sánchez F J, Torquemada M C, *et al.* Polycrystalline lead selenide x-y addressed uncooled focal plane arrays [J]. Infrared Physics & Technology, 2003, 44:281-287.
- [3] Jost S, Barret J. Lead salt room-temperature MWIR FPA [C]. Proceedings of SPIE, 2001, 4369:355-359.
- [4] HOU Zhi-Jin, WANG Wei, CHEN Xiang-Wei, *et al.* Influences of working parameters on the Performance of PC IRFPA [J]. Laser and Infrared (侯治锦, 王巍, 陈湘伟, 等. 偏压等参数对光导 PbS 焦平面探测器性能的影响. 激光与红外) 2010, 40(6):617-621.