

近红外 InGaAs 线列焦平面组件暗信号研究

李 雪 唐恒敬 汪 洋 陈新禹 龚海梅 方家熊

(中国科学院上海技术物理所传感技术国家重点实验室, 上海 200083)

摘要 采用电流-电压曲线研究近红外铟镓砷(InGaAs)光敏芯片的暗电流,并分析了 InGaAs 光敏芯片暗电流与 InGaAs 焦平面组件暗信号的关系。结果表明,温度下降到 273 K 时,反向偏压 -100 mV 时,扩散电流是光敏芯片暗电流的主要机制,反向偏压 -400 mV 时,产生-复合电流是光敏芯片暗电流的主要机制,偏压较小时,界面电流对光敏芯片暗电流贡献增加。光敏芯片各元的暗电流是产生焦平面暗信号的主要原因,反向偏压 3 mV 时 InGaAs 光敏芯片的最小暗电流 0.92 pA ,积分时间为 50 ms 情况下在读出电路输出端上产生了 2.87×10^5 电子数,焦平面对应元的动态范围最大 56 dB 。同时读出电路 CTIA 反馈端元与元之间固有差异导致探测器上实际加载上不同的偏压,也增加了暗信号输出的非均匀。实验表明进一步降低光敏芯片暗电流是提高 InGaAs 焦平面组件动态范围的重要途径之一。

关键词 探测器; InGaAs 线列焦平面; 暗信号

中图分类号 TN305

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS200929s1.0377

Study on the Dark Signal of Near-Infrared InGaAs Linear Detector Arrays

Li Xue Tang Hengjing Wang Yang Chen Xinyu Gong Haimei Fang Jiaxiong

(State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract The dark currents of near-infrared InGaAs detectors were studied by I-V curves, the relations between the dark currents of InGaAs detectors and the dark signals of InGaAs FPA were analyzed. The result shows that the dark current is dominated by diffusion current at -100 mV reverse bias down to about 273 K, the dark current is dominated by generation-recombination current at -400 mV reverse bias down to about 273 K, the effect of interface current on the dark current increase at the smaller bias voltage. The dark currents of InGaAs linear detectors is the major reason of the dark signal output of InGaAs FPA, the smallest dark current among InGaAs linear detectors is about 0.92 pA at -3 mV reverse bias, which cause the corresponding electrons of 2.87×10^5 in FPA and the corresponding dynamic range of 56 dB . Pixel-to-pixel variations of CTIA in ROIC result in variation of the actual bias voltages applied to the diodes which increase non-uniformity of the dark signal output of InGaAs FPA. The result shows that the further decrease of the dark current of InGaAs detectors is an improvet approach to improving the dynamic range of InGaAs FPA.

Key words detector; InGaAs linear detector arrays; dark signal

1 引 言

近红外铟镓砷(InGaAs)线列焦平面组件在 $0.9\sim 1.7\text{ }\mu\text{m}$ 波段具有非制冷室温工作、探测率高、均匀性好等优点,是小型化、低成本和高可靠性的短波红外成像系统的最佳选择。InGaAs 线列焦平面组件首先进行空间遥感应用是在法国陆地卫星

(SPOT4)的高分辨可见近红外光谱仪(HRVIR)和植被监测仪器(Vegetation)^[1]中,其线列规模为3000元,用于土壤特性和植被信息的监测。此后,近红外 InGaAs 焦平面组件在欧空局环境卫星、印度资源卫星和美国对地观测卫星上均有应用,用于了解大气成分分析、资源分布、土壤水分监测、农作物

基金项目: 国家自然科学基金(50632060)和中科院知识创新工程(B2-1)资助课题。

作者简介: 李 雪(1976—),女,博士,助理研究员,主要从事短波 InGaAs 焦平面探测器组件方面的研究。

E-mail: lixue@mail. sitp. ac. cn

估产等^[2]。国内有关 InGaAs 探测器的研制多应用于光纤通讯领域,提高器件的带宽和响应速度是研究的重点。在航天遥感领域,探测器通常工作在近零偏压和入射光强度微弱的情况下,因此对探测器暗电流、探测率和动态范围等器件性能参数有很高的要求。

本文采用电流-电压曲线研究近红外 InGaAs 光敏芯片的暗电流,改变焦平面测试参数如偏压、积分时间研究了 InGaAs 焦平面器件的暗信号,并分析了 InGaAs 光敏芯片暗电流与 InGaAs 焦平面器件暗信号的关系。

2 实验过程

256×1 元近红外 InGaAs 线列光敏芯片是在金属有机气相外延方法(MOCVD)生长的 p-InP/i-In_{0.55}Ga_{0.45}As/n-InP 双异质结上采用台面结构实现的,256 元光敏区成“品”字形排布,其光敏元面积为 50 μm×50 μm^[3]。利用 Keithley236 测量单元在 256 元 InGaAs 线列光敏芯片上随机抽取 20 元进行电流-电压测试,样品封装于高阻抗测试盒中置入暗的金属屏蔽盒内,以减少干扰,为对暗电流的来源进行分析,抽取一元开展变温实验。

256×1 元近红外 InGaAs 线列焦平面探测器是由 256 元 InGaAs 光敏芯片 P 区与两路 128 元读出电路等平面耦合形成,N 区为公用电极区。该读出电路的输入级采用 CTIA 式运放积分型,积分电容(C_{int})为 1 pF,开始脉冲起始扫描过程,并将储存的电荷信号经采样,差分放大和多路传输后顺序输出,扫描结束时给出 EOS 信号^[4]。该读出电路外加参考电压为 2.5 V,在光敏芯片 P 区形成的反馈电压理想状态下为 2.5 V,为使探测器工作在近零偏压,N 区外加偏压应在 2.5 V 附近,N 区外加偏压的精细调节通过 Angilent 公司 N6700B 系列的程控电源实现,积分时间在 0.2~50 ms,焦平面探测器封装在双列直插的金属管壳置于屏蔽盒中,在室温下测试其暗信号。

3 测试结果与分析

3.1 InGaAs 光敏芯片的暗电流分析

InGaAs 光敏芯片零偏压附近的 I-V 曲线如图 1 所示,其零偏压下动态电阻在 2.5×10⁸ Ω(R=dV/dI)。随机抽测 20 元光敏芯片在偏压 -10 mV 时暗电流在 5~40 pA,在偏压 -5~5 mV 之间,20 元光敏元芯片的最大暗电流和最小暗电流统计如表

1 所示,表中暗电流和光电流一致的方向定义为正。

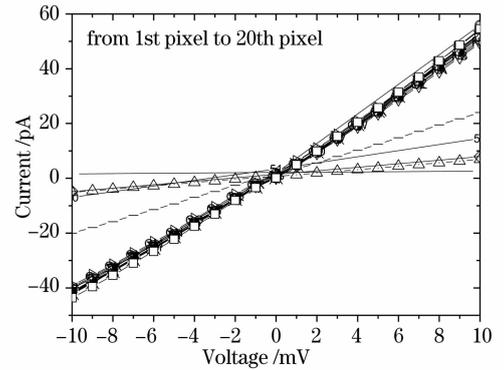


图 1 随机抽测 20 元 InGaAs 光敏芯片的 I-V 曲线

Fig. 1 I-V curves of random 20 InGaAs detectors

表 1 零偏压附近光敏芯片暗电流的范围

Table 1 Dark current of the detectors near reverse bias of 0 V

V _{bias} /mV	I _{dmax} /pA	I _{dmin} /pA
5	-25.73	-3.75
3	-16.07	-2.58
0	-3.14	-0.11
-3.00	13.05	0.92
-5.00	20.92	2.18

为了分析室温附近 InGaAs 光敏芯片的暗电流来源,测试了某一元变温伏安曲线,温度变化点为 293 K,283 K 和 273 K,光敏芯片不同偏置电压下暗电流密度和温度的关系如图 2 所示。暗电流的主要来源包括界面电流 J_{if}、扩散电流 J_{diff}、产生-复合电流 J_{g-r}以及隧穿电流 J_{tun},各种电流的贡献在文献中有详细论述^[5],界面电流

$$J_{if} \propto T \exp\left(\frac{-E_g}{2k_B T}\right),$$

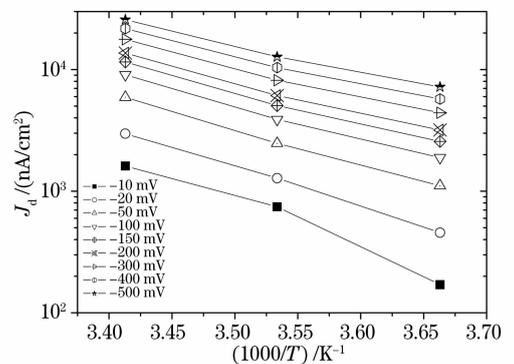


图 2 光敏芯片暗电流密度和温度的关系

Fig. 2 Relation between the dark current density and temperature of photodetector

扩散电流

$$J_{\text{diff}} \propto \exp\left(\frac{-E_g}{K_B T}\right) \left[\exp\left(\frac{-qV_{\text{bias}}}{k_B T}\right) - 1 \right],$$

产生-复合电流

$$J_{g-r} \propto V_{\text{bias}}^{1/2} \exp\left(\frac{-E_g - 2\Delta E}{2K_B T}\right) \left[\exp\left(\frac{-qV_{\text{bias}}}{k_B T}\right) - 1 \right],$$

隧穿电流

$$J_{\text{tun}} \propto V_{\text{bias}},$$

式中 E_g 为吸收层的禁带宽度,在本文中是 0.72 eV, V_{bias} 是探测器上的反偏电压,综合考虑,将光敏芯片的暗电流和温度、偏压的关系归纳为

$$J = J_0 \exp\left(\frac{-E_{\text{fit}}}{K_B T}\right) + \Delta J(T, V_{\text{bias}}), \quad (1)$$

其中 J_0 是常数,若拟合参数 $E_{\text{fit}} \approx E_g + V_{\text{bias}}$, 则是扩散电流为暗电流的主要机制,若拟合参数 $E_{\text{fit}} \approx E_g/2 + V_{\text{bias}}$, 则是产生-复合电流为暗电流的主要机制。用(1)式对图 2 中不同偏置电压下暗电流密度和温度的关系进行拟合,拟合参数和计算参数的对比见表 2。

表 2 根据图 2 提取不同偏压下拟合参数和计算参数的对比
Table 2 The comparison between the fitting parameter and calculation parameter at the different reverse bias according to Fig. 2

$V_{\text{bias}}/\text{mV}$	E_{fit}/eV	$E_g + V_{\text{bias}}/\text{eV}$	$E_g/2 + V_{\text{bias}}/\text{eV}$
-10	0.63	0.73	0.37
-20	0.68	0.74	0.38
-50	0.80	0.77	0.41
-100	0.83	0.82	0.46
-150	0.82	0.87	0.51
-200	0.82	0.92	0.56
-300	0.81	1.02	0.66
-400	0.78	1.12	0.76
-500	0.77	1.22	0.86

从表 2 中可明显看出,在反向偏压 -100 mV 时,拟合参数 E_{fit} 和计算参数 $E_g + V_{\text{bias}}$ 基本吻合,这表明在该偏压下温度下降到 273 K 时,扩散电流是光敏芯片暗电流的主要机制,该研究结果和 Joseph Boisvert 等^[6] 的报道相一致,随着反向偏压增大到

-400 mV 时,拟合参数 E_{fit} 和计算参数 $E_g/2 + V_{\text{bias}}$ 基本吻合,这表明在该偏压下温度下降到 273 K 时,产生-复合电流是光敏芯片暗电流主要机制,随着反偏电压降低到 -10 mV 时,图 2 中光敏芯片暗电流密度和 $1000/T$ 在指数坐标下随温度的下降有背离线性的趋势,这说明温度对芯片暗电流的影响增大,表明在偏压较小时,除了扩散电流作用外,界面电流对芯片暗电流的影响增加。

3.2 InGaAs 焦平面探测器的暗信号分析

InGaAs 光敏芯片和读出电路互连后形成 InGaAs 焦平面探测器,本文通过积分时间和探测器外加偏压的改变研究焦平面探测器多个像元暗信号的变化,测试结果如图 3 所示。图 3 中把与光电流同方向的暗信号定义为正,反之为负。焦平面输出的暗信号与积分时间成线性关系,定义焦平面暗信号产生率为 $\Delta V_{\text{out}}/\Delta T_{\text{int}}$,各个像元的暗信号产生率有所差异。当 N 区外加偏压 2.5 V 时,如图 3(a)所示,其暗信号产生方向和光信号方向相反,这表明,CTIA 读出电路反馈端在探测器 P 区形成的偏压不是理想状态下的 2.5 V,而是 $2.5 + \Delta V (\Delta V > 0)$,当 N 区外加偏压 2.503 V 时,其暗信号产生方向既有和光信号方向相反,也有和光信号方向一致的,当 N 区外加偏压 2.505 V 时,其暗信号产生方向和光信号方向一致的,这表明 ΔV 在 3 mV 附近,D. S. Malchow^[7] 等人曾报道 CTIA 式读出电路各元反馈端的波动实际上将导致 ± 3 mV 偏压作用在探测器上,在我们的探测器上,如考虑到 ΔV 为 0~3 mV,零偏压下动态电阻在 $2.5 \times 10^8 \Omega$,则在探测器上会产生 0~12 pA 的暗电流,从而影响焦平面暗信号输出的非均匀性。根据 CTIA 式读出电路 V_{out} 和 I_{dark} 的关系 $I_{\text{dark}} = V_{\text{out}} C_{\text{int}}/T_{\text{int}} A_v$,其中, T_{int} 代表积分时间, C_{int} 是 CTIA 式读出电路的积分电容,设计值是 1 pF, A_v 是电路增益,实测值为 0.778,推算出不同偏压下焦平面探测器上的暗信号产生率和暗电流见表 3。

表 3 根据图 3 提取的最大和最小暗电流率和计算的最大和最小暗电流

Table 3 The maximal and minimum dark current rates and dark currents were calculated according to Fig. 3

V_{bias}/V	Max dark current rate / (V/s)	Min dark current rate / (V/s)	$I_{\text{dmax}}/\text{pA}$	$I_{\text{dmin}}/\text{pA}$
2.500	-23.07	-0.71	-29.61	-0.91
2.503	-11.17	-0.61	-14.34	-0.78
23.30	0.71	0.71	29.91	0.91
2.505	35.33	1.01	45.35	1.30

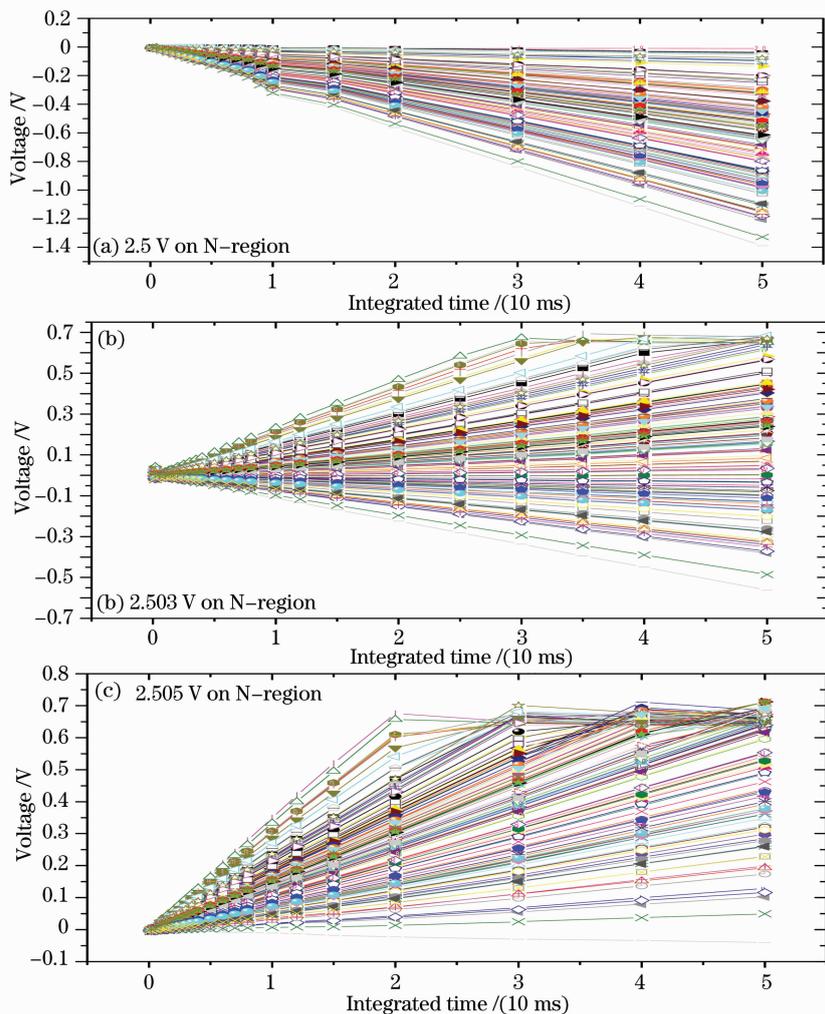


图 3 焦平面探测器多个像元暗信号随积分时间的变化

Fig. 3 The changes of the dark signals of FPA pixels with integration times

3.3 InGaAs 光敏芯片暗电流与 InGaAs 焦平面器件暗信号的关系

焦平面的暗信号一方面来源于 CTIA 读出电路反馈端的波动, 考虑到 CTIA 式读出电路各元反馈端实际在探测器上加载的偏压是在 $3 \sim 0$ mV 之间, 在探测器上会产生 $0 \sim -12$ pA 的暗电流波动, 增加了暗信号电流输出的非均匀性; 一方面来自 InGaAs 光敏芯片自身的暗电流, 光敏芯片和 CTIA 式读出电路互连后, 其光敏芯片本身暗电流对焦平面暗信号的贡献可以用公式 $V_{\text{out}} = I_{\text{dark}} T_{\text{int}} A_v / C_{\text{int}}$ 表达, 表 1 是光敏芯片在不同偏压下的最大暗电流和最小暗电流, 其在焦平面探测器上产生的暗信号与积分时间的关系如图 4 所示, 在较长积分时间下行列探测器元与元暗电流导致焦平面元与元间不同动态范围, 根据读出电路设计其饱和电子数为 5.2×10^6 , 反向偏压 3 mV 时 InGaAs 光敏芯片的最小暗电流 0.92 pA, 积分时间为 50 ms 情况下在读出电

路输出端上产生了 2.87×10^5 电子数, 焦平面对应元的动态范围最大 56 dB。

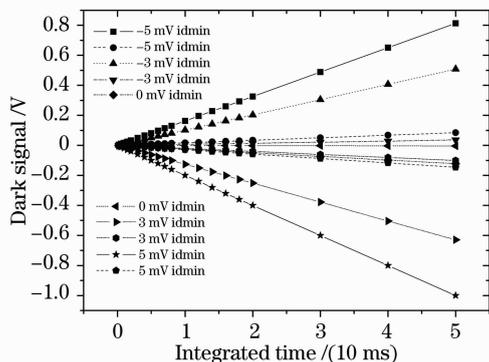


图 4 光敏芯片暗电流在焦平面探测器上产生的暗信号与积分时间的关系

Fig. 4 The changes of the dark signals of FPA pixels caused by the dark current of photodetectors with integration times

4 结 论

采用电流-电压曲线研究近红外 InGaAs 光敏芯片的暗电流,改变焦平面测试参数如偏压、积分时间研究了 InGaAs 焦平面器件的暗信号,并分析了 InGaAs 光敏芯片暗电流与 InGaAs 焦平面器件暗信号的关系。结果表明,反向偏压-100 mV 时,扩散电流是光敏芯片暗电流的主要机制,反向偏压-400 mV 时,产生-复合电流是光敏芯片暗电流的主要机制,偏压较小时,界面电流对光敏芯片暗电流贡献增加。光敏芯片各元间暗电流的差异是产生焦平面暗信号不均匀的主要原因,在较长积分时间下导致焦平面各元间不同动态范围,反向偏压 3 mV 时,InGaAs 光敏芯片最小暗电流 0.92 pA,积分时间为 50 ms 时在读出电路输出端上产生了 2.87×10^5 电子数,焦平面对应元的动态范围最大 56 dB。读出电路 CTIA 反馈端元与元之间固有差异导致探测器上实际加载上不同的偏压,也增加了暗信号输出的非均匀。实验表明进一步降低光敏芯片暗电流是提高 InGaAs 焦平面器件动态范围的重要途径之一。

参 考 文 献

- 1 J. P. Moy, X. Hugon, J. Chabbal *et al.*. 3000 InGaAs photodiode multiplexed linear array for SPOT4 SWIR channel [C]. *SPIE*, 1989, **1107**: 137~151
- 2 Ruud W. M. Hoogeveen, Ronald J. van der A, Albert P. H. Goede. Extended wavelength InGaAs infrared (1.0~2.4 μm) detector arrays on SCIAMACHY for space-based spectrometry of the Earth atmosphere[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2001, **42**: 1~16
- 3 Li Xue, Tang Hengjing, Fan Guangyu *et al.*. 256 \times 1 element linear InGaAs short wavelength near-infrared detector arrays[C]. *SPIE*, 2007, **6835**: 653505-1~653505-8
- 4 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
- 5 R. J. van der A, R. W. M. Hoogeveen, H. J. Spruij *et al.*. Low noise InGaAs infrared (1.0~2.4 μm) focal plane arrays for SCIAMACHY[C]. *SPIE*, 1997, **2957**: 55~65
- 6 J. Boisvert, T. Isshiki, R. Sudharsanan *et al.*. Performance of very low dark current SWIR PIN arrays[C]. *SPIE*, 2008, **6940**: 69400L-1~69400L-8
- 7 D. S. Malchow, R. M. Brubaker, M. P. Hansen *et al.*. Developemt of linear array ROIC for InGaAs detector arrays with wavelength response to 2.5 microns for NIR spectroscopy and machine vision[C]. *SPIE*, 2008, **6940**: 69402V-1~69402V-11