

大周长面积比延伸波长 InGaAs 红外焦平面噪声

黄松垒^{1,2}, 张伟^{1,2}, 黄张成^{1,2}, 许中华^{1,2}, 方家熊¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 传感技术联合国家重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:在理论上分析了红外焦平面组件中光敏元、读出电路以及两者耦合的总噪声特性, 对大周长面积比($38 \times 500 \mu\text{m}^2$)延伸波长 InGaAs 组件的噪声与温度、积分时间的关系进行了实验和分析. 实验结果指出, 在一定条件下组件噪声与积分时间的根号并不成正比. 测量了不同温度下的组件暗信号、噪声, 得到组件噪声与暗电流的关系, 分析表明, 该种组件噪声主要来自于 $1/f$ 噪声及读出电路输入级电流噪声.

关键词:延伸波长砷镓; 焦平面噪声; 积分时间

中图分类号: O436 **文献标识码:** A

The noise of the extended wavelength InGaAs FPA with large perimeter-area-ratio

HUANG Song-Lei^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, HUANG Zhang-Cheng^{1,2},
XU Zhong-Hua^{1,2}, FANG Jia-Xiong¹

(1. State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The total noises of focal plane array sensors, readout circuit and their coupling noise were theoretically analyzed. The temperature and integral time dependence of the noise were measured and analyzed for large perimeter-area-ratio of extended wavelength InGaAs FPA ($38 \times 500 \mu\text{m}^2$). The experimental results show that in certain conditions, FPA noise is not proportional to the square root of integral time. The relationship between FPA noise and dark current at different temperature were studied. Results show that the noises mainly come from $1/f$ noise and the current noise at the input stage of readout circuit.

Key words: extended wavelength InGaAs; focal plane array noise; integral time

PACS: 85.60.Dw

引言

在红外焦平面组件的应用中, 焦平面组件噪声是一个重要参数. 其噪声来源有来自光敏元噪声、读出电路噪声, 以及两者耦合的噪声. 分析各种噪声的来源、强弱, 并采取行之有效的手段对其抑制或削弱, 是读出电路设计研究者工作中的重点和难点. 对于通常遥感用的小周长面积比光敏元的红外焦平面组件, 一般其噪声与积分时间的根号 $T_{\text{int}}^{0.5}$ 成正比, 而信号与积分时间成正比, 从而信噪比与积分时间的根号成正比. 因此在成像系统中经常采用延长积分

时间来提高信噪比.

本文测试了大周长面积比的 InGaAs 组件噪声与积分时间 T_{int} 的关系, 发现大周长面积比的光敏元组件噪声与 T_{int} 成正比, 而不是与 $T_{\text{int}}^{0.5}$ 成正比. 并根据测试结果分析了其噪声的主要来源.

1 红外焦平面组件噪声

1.1 光敏元噪声

红外焦平面组件噪声包括光敏元芯片噪声、读出电路噪声以及两者耦合的附加噪声. 其中光敏元噪声通常又包括热噪声、散粒噪声、产生复合噪声、

收稿日期: 2011-04-14, 修回日期: 2012-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(50632060)

Foundation Item: Supported by National Natural Science Foundation of China(50632060)

作者简介: 黄松垒(1984-), 男, 博士研究生, 主要从事红外焦平面读出电路方面的研究, E-mail: huangsl@mail.sitp.ac.cn.

Received date: 2011-04-14, revised date: 2012-04-09

1/f 噪声、温度噪声等. 对于 2.4 μm 延伸波长 InGaAs, 光敏面积为 $38 \times 500 \mu\text{m}^2$, 温度 -40°C 时, 其暗电流大约为 1 nA, 比相同条件下的 1.7 μm 截止波长 InGaAs 大 2~3 数量级, 并且其探测器零偏阻抗 R_d 也比 1.7 μm 的小很多, 热噪声影响较小, 可以忽略不计. 则光敏芯片的噪声以散粒噪声、产生复合噪声、1/f 噪声为主^[1].

散粒噪声的噪声电流: $i_{sc}^2 = 2eI\Delta f$,

产生复合的噪声电流:

$$i_{GR}^2 = \frac{4I^2}{p_0} \frac{\tau}{1 + 4\pi^2\tau^2 f^2} \Delta f,$$

1/f 噪声的噪声电流: $i_{1/f}^2 = \frac{K_1 I^\alpha}{f^\beta} \Delta f$,

其中 $\Delta f = 1/2T_{int}$ 为测试仪器的带宽, I 为通过光敏元 pn 结的电流, τ 为载流子的寿命, p_0 为与光敏芯片有关的常数, $\alpha \approx 2$, $\beta \approx 1$, K_1 是为了与实验数据吻合而选取的参数.

3 种噪声电流通过 CTIA 后的噪声谱为:

$$V_{det}^2 \approx (i_{sc}^2 + i_{GR}^2 + i_{1/f}^2) \cdot \left(\frac{T_{int}}{C_{int}} \right). \quad (1)$$

1.2 读出电路以及耦合噪声

对于读出电路噪声, 最主要的噪声来源于第一级运放, 也就是输入级噪声是其主要噪声. CTIA 输入级结构以及等效的电路如图 1、图 2 所示.

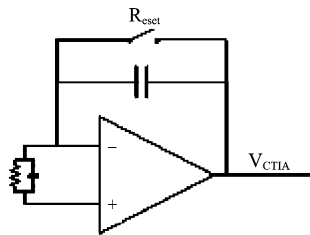


图 1 CTIA 输入级结构
Fig. 1 CTIA input structure

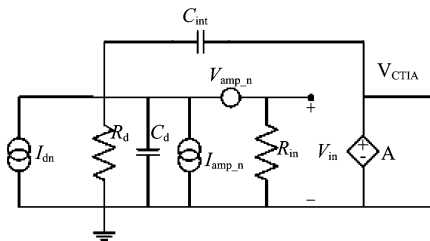


图 2 CTIA 等效电路图
Fig. 2 Equivalent CTIA circuit

其中 $\overline{V_{amp_n}^2} = \frac{8kT}{3g_m} + \frac{K}{C_{ox}WLf}$ 是放大器等效输入电压噪声, I_{amp_n} 是其等效输入电流噪声^[2], R_{in} 是其输入阻抗, R_d , C_d 分别是光敏元的等效电阻、等效电容.

则放大器的电流噪声为: (放大器增益 $A \gg 1$)

$$V_{n_I}(s) = \frac{I_{amp_n}}{C_{int}s - \left(\frac{C_{int}s}{A} + \frac{C_d s}{A} \right) - \left(\frac{1}{AR_{in}} + \frac{1}{AR_d} \right)} \approx \frac{I_{amp_n}}{C_{int}s}, \quad (2)$$

即等效输入电流噪声通过积分电容积分后输出噪声.

放大器的电流噪声为:

$$V_{n_V}(s) = \frac{\frac{V_{amp_n}}{R_d} + (C_{int}s + C_d s)V_{amp_n}}{C_{int}s - \left(\frac{C_{int}s}{A} + \frac{C_d s}{A} \right) - \left(\frac{1}{AR_{in}} + \frac{1}{AR_d} \right)} \approx \frac{V_{amp_n}}{R_d C_{int}s} + \left(\frac{C_{int} + C_d}{C_{int}} \right) V_{amp_n}, \quad (3)$$

即第 1 项中 R_d^{-1} 可以看成是等效输入电压噪声转化成电流噪声的因子, 第 2 项是等效输入电压噪声通过放大器后输出的噪声. 在下面测量的焦平面组件中, 与 T_{int} 无关的组件噪声, 即 $\left(\frac{C_{int} + C_d}{C_{int}} \right) V_{amp_n}$ 项大概为 $2 \times 10^{-4} \text{V}$, 比组件噪声 (大于 $4 \times 10^{-4} \text{V}$) 小 2 倍, 可以认为忽略.

则光敏芯片和电路芯片耦合后产生的总噪声谱为:

$$V_{total}^2 = V_{det}^2 + V_{n_I}^2 + V_{n_V}^2.$$

总噪声功率:

$$V_{noise}^2 = \int_{0+}^{1/2f_{int}} V_{total}^2 df = \left(\frac{eI}{C_{int}^2} + \frac{K_2 I^2}{C_{int}^2} \right) T_{int} + \int_{1/2f_c}^{1/2f_{int}} \frac{K_1 I^2}{f} \frac{T_{int}^2}{C_{int}^2} df + \left(\frac{I_{amp_n}}{C_{int}} \right)^2 T_{int}^2 + \left(\frac{V_{amp_n}}{R_d C_{int}} \right)^2 T_{int}^2,$$

K_2 为产生复合噪声积分后引入的常数, 并对 1/f 噪声功率作近似, K_3 为作近似所引入常数^[3], 则

$$V_{noise}^2 = \left(\frac{eI}{C_{int}^2} + \frac{K_2 I^2}{C_{int}^2} \right) T_{int} + \left[\frac{K_3 I^2}{C_{int}^2} + \left(\frac{I_{amp_n}}{C_{int}} \right)^2 + \left(\frac{V_{amp_n}}{R_d C_{int}} \right)^2 \right] T_{int}^2, \quad (4)$$

从式 (4) 可以看出, 焦平面组件噪声如果以 InGaAs 光敏元的散粒噪声、产生复合噪声为主, 则组

件噪声与积分时间 $T_{int}^{0.5}$ 成正比;如果组件噪声以 $1/f$ 、读出电路的等效输入电流噪声以及其电压噪声在探测器阻抗 R_d 上的等效电流噪声为主,则组件噪声与 T_{int} 成正比。

2 测试结果

在不同的积分时间下,分别对小周长面积比光敏元 InGaAs 组件和大周长面积比光敏元延伸波长 InGaAs 组件噪声进行测试. 测量的结果与公式(4) 进行对比,分析噪声的主要成分。

2.1 小周长面积比光敏元组件噪声

下图是截止波长为 $1.7 \mu\text{m}$,光敏面积为 $25 \times 25 \mu\text{m}^2$ 的 InGaAs 组件噪声与积分时间 T_{int} 关系曲线,焦平面组件工作在室温 293 K. 分别对其作 $V_{noise} \sim T_{int}$ 、 $V_{noise}^2 \sim T_{int}$ 拟合,如图 3 所示。

通过图 3 可以发现, V_{noise}^2 和 T_{int} 成线性关系,拟合曲线为:

$$V_{noise}^2 = 3.28 \times 10^{-8} \times T_{int} + 3.29 \times 10^{-9},$$

$$R^2 = 0.9988,$$

其中 R 表示线性相关度, R 越趋近于 1,表示实验数据点越趋近于线性。

即 InGaAs 组件的噪声 V_{noise} 与 $T_{int}^{0.5}$ 成正比,符合公式(4)中的第一项,组件噪声以产生复合噪声、散粒噪声为主。

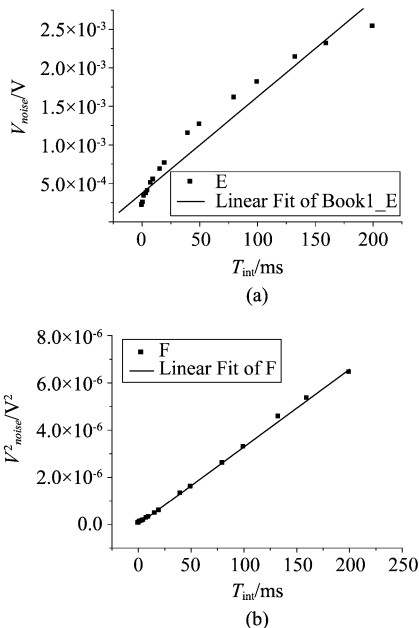


图 3 室温 293 K 小周长面积比 InGaAs 组件噪声与 T_{int} 关系 (a)采用 $V_{noise} \sim T_{int}$ 拟合 (b)采用 $V_{noise}^2 \sim T_{int}$ 拟合
Fig.3 Relationship between InGaAs FPA noise and T_{int} at 293 K. Th curve is fitted (a) with V_{noise} , and (b) with V_{noise}^2

2.2 大周长面积比延伸波长 InGaAs 组件噪声

下图是不同温度下,截止波长为 $2.4 \mu\text{m}$,光敏元面积为 $38 \times 500 \mu\text{m}^2$ 的 InGaAs 组件噪声与 T_{int} 关系曲线. 由于延伸波长 InGaAs 的暗电流比较大,在长积分时间下,容易使积分电容饱和,此时组件的噪声几乎保持不变,故拟合参数时,只采用 $V_{noise} < 3 \times 10^{-3} \text{ V}$ 的点. 分别对测量的噪声作曲线: $V_{noise} \sim T_{int}$, $V_{noise}^2 \sim T_{int}$, 如图 4 所示。

对上面两幅图中曲线分别做拟合: $V_{noise} = A \times T_{int} + B$, $V_{noise}^2 = C \times T_{int} + D$, 拟合结果如表 1。

表 1 组件噪声与 T_{int} 关系拟合结果

温度(°C)	采用 Vnoise 拟合		采用 Vnoise ² 拟合	
	B(V)	R ²	D(V)	R ²
-40	0.0004	0.9984	-0.0008	0.9908
-50	0.0004	0.995	-0.0006	0.9890
-60	0.0004	0.997	-0.0004	0.9777
-80	0.0004	0.9932	-0.0002	0.9784
-100	0.0003	0.9964	-0.0002	0.9496
-120	0.0003	0.9991	-0.00003	0.9477

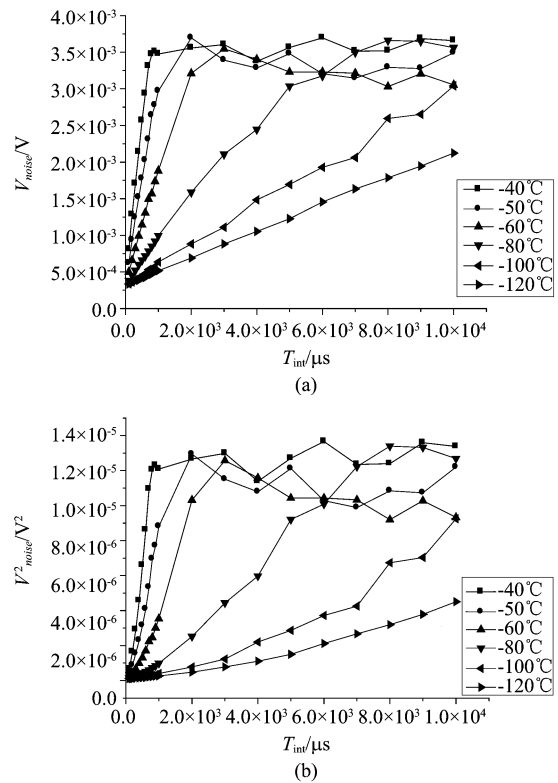


图 4 大周长面积比 InGaAs 组件噪声与 T_{int} 关系 (a)采用 $V_{noise} \sim T_{int}$ 拟合 (b)采用 $V_{noise}^2 \sim T_{int}$ 拟合
Fig.4 Relationship between InGaAs FPA noise and T_{int} , Th curve is fitted (a) with V_{noise} , and (b) with V_{noise}^2

从表 1 的两种拟合方式中可以看出,组件噪声 V_{noise} 更接近正比于 T_{int} . 而且 B 取值在 $3 \times 10^{-4} V$ 左右,即积分时间为零时组件噪声,在一定程度上反映电路芯片噪声,与此组件中读出电路芯片的噪声 $2 \times 10^{-4} V$ 相吻合.

把组件噪声 V_{noise} 正比于 T_{int} 的结论和公式(4)对比,可以发现只有式(4)中的第 2 项 $\left[\frac{K_3 I^2}{C_{int}^2} + \left(\frac{I_{amp-n}}{C_{int}} \right)^2 + \left(\frac{V_{amp-n}}{R_d C_{int}} \right)^2 \right] T_{int}^2$ 符合 V_{noise} 正比于 T_{int} 的结论. 下面通过测量暗电流对噪声的影响,分析 $\left[\frac{K_3 I^2}{C_{int}^2} + \left(\frac{I_{amp-n}}{C_{int}} \right)^2 \right] T_{int}^2$ 是噪声主要来源.

2.3 暗电流对组件噪声的影响

测量不同温度下的暗信号 $\sim T_{int}$ 关系,通过曲线的斜率算出组件的暗电流,从而求出其暗电流与温度的关系,得到不同温度下的暗电流值;再在相同积分时间、不同温度下,测量组件噪声 V_{noise} ,从而得到 V_{noise} 与组件暗电流 I_{dark} 的关系,分析过程如下面的简单示意图:

$$V_{dark} \sim T_{int} \xrightarrow{\text{通过斜率}} I_{dark} \sim T \longrightarrow I_{dark} \sim V_{noise},$$

图 5 是大周长面积比延伸波长 InGaAs 组件在不同温度下,测得暗信号与积分时间关系.

通过图 5 各个温度下的暗信号 $\sim T_{int}$ 关系曲线斜率算出暗电流,从而求出暗电流 \sim 温度关系:

$$V_{dark} = \eta I_{dark} T_{int} / C_{int} \quad \text{斜率} \quad K = \eta I_{dark} / C_{int},$$

则 $I_{dark} = C_{int} K / \eta$.

表 2 不同温度下的暗电流
Table 2 Dark current in different temperature

T/°C	-40	-50	-60	-80	-100	-120	-168
I_{dark}/pA	1083	700	377	100	30	20	6

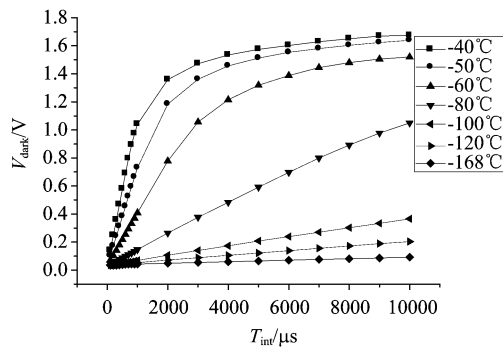


图 5 不同温度下,暗信号与 T_{int} 关系
Fig.5 Relationship between dark signal and T_{int} at different temperature

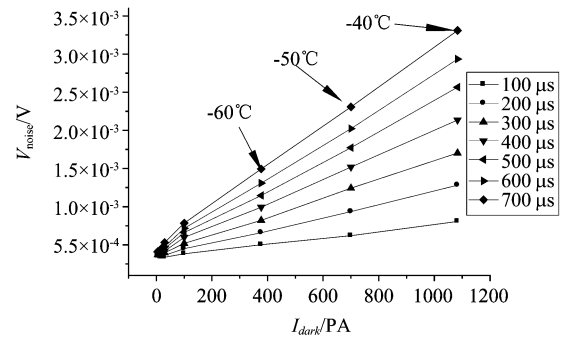


图 6 组件噪声 V_{noise} 与暗电流的关系
Fig.6 Relationship between FPA noise and dark current

在得到的 $I_{dark} \sim T$ 曲线后,如表 2 所示,再在不同温度下,改变积分时间 T_{int} ,测量组件噪声 V_{noise} ,从而得到暗电流 I_{dark} 与 V_{noise} 的关系,如图 6 所示.

通过上图,可以看出焦平面组件噪声与暗电流成线性关系,也符合公式(4)中的第 2 项 $V_{noise}^2 \approx \left[\frac{K_3 I^2}{C_{int}^2} + \left(\frac{I_{amp-n}}{C_{int}} \right)^2 \right] T_{int}^2$

即大周长面积比光敏元延伸波长 InGaAs 组件,其表面漏电流大,从而其 $1/f$ 噪声也大. 组件噪声以 $1/f$ 噪声与读出电路输入级等效噪声电流为主,组件噪声与积分时间 T_{int} 、暗电流都成正比.

3 结论

本文从理论上分析了红外焦平面组件各个噪声源的噪声与积分时间的关系,测量了大周长面积比的延伸波长 InGaAs 组件的噪声与积分时间的关系,发现该种组件噪声与积分时间成正比,并且组件噪声与暗电流也成正比,组件噪声以 $1/f$ 噪声、读出电路的电流噪声为主.

REFERENCES

- [1] TANG Ding-yuan, MI Zheng-yu. *Introduction of Photoelectricity* [M]. Shanghai : Shanghai Technology Literature Press (汤定元, 糜正瑜. 光电器件概论. 上海: 上海科学技术文献出版社), 1989: 35 - 42.
- [2] Behzad Razavi. *Design of Analog CMOS Integrated Circuits* [M], Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press (毕查德. 拉扎维著, 陈贵灿等译. 模拟 CMOS 集成电路设计. 西安: 西安交通大学出版社), 2002: 172 - 182.
- [3] Mark D. Nelson, Jerris F. Johnson, Terrence S. Lomheim, General noise process in hybrid infrared focal plane arrays [J]. *Optical Engineering*, 1991, 30(11): 1682 - 1700.