

文章编号:1004-4213(2011)06-0921-5

640×512 制冷探测器非线性响应分析

刘宁,陈钱,顾国华,隋修宝

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院 光电技术系;近程高速目标探测技术国防重点学科实验室,南京 210094)

摘 要:由于制冷探测器焦平面制作工艺的缺陷,使其各部分组分不会完全相同,从而导致焦平面在进行光电转换时各个位置的光电流大小存在差异. 本文以国产 640×512 中波凝视型制冷热像仪整机研制项目为基础,通过对探测器接收红外辐射并转换为光电流的过程中主要参量与焦平面材料 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 中组分 x 的关系进行分析,推导出探测器焦平面光电流与组分 x 的关系模型. 在探测器能够正常工作的宽温度范围内利用黑体面源对探测器进行照射,采集各个温度点下探测器输出数据,并对本探测器整体响应特性及单个像素点的响应特性进行分析. 根据影响光电流的最主要的参量变化情况,提出了双指数曲线模型来描述实际响应数据,并通过大量的数据和图表分析,证明了该模型能够提高对探测器实际响应描述的精确程度,对实际的工程应用具有指导意义.

关键词:制冷探测器;非线性;双指数曲线拟合;掺杂组分

中图分类号:TP302.7

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114006.0921

0 引言

近年来,随着红外热成像技术在军民两用方面的飞速发展,对红外探测器的响应情况的各种研究也取得了许多突破性的成果. 其中,应用最为广泛的包括基于“S”型曲线的响应二元非线性的非均匀性理论模型^[1];J. F. Johnson 等人提出的响应信号与噪音关系模型^[2];J. P. Karins 提出的探测器非线性响应随着载流子扩散深度而变化的理论模型^[3]. 目前,我国越来越注重开发研制国产制冷焦平面探测器,以打破国外对红外热像仪的技术和销售垄断,目前已经取得了一定的成果,但是由于国内工艺尚不够成熟,产品成品率低并且价格昂贵,使得对于国产探测器性能的研究受到一定的掣肘. 因此,本文基于与国内某著名研究所合作开发的中波 640×512 中波制冷型热像仪整机项目,分析了掺杂组分对探测器响应的非线性带来的影响,并首次提出了用双指数曲线拟合的方法对响应的非线性情况进行描述,并通过与现有的同样用以描述非线性的二次曲线拟合方式进行对比,证明了双指数曲线拟合能够更好地描述在宽辐射温度范围内的探测器响应情况,并通过大量的测试数据分析了该模型在拟合探测器实际数据时的精确性.

1 探测器输出响应非线性分析

红外焦平面探测器受其制作材料的缺陷、掺杂工艺的水平以及生产过程控制的不稳定性等因素的影响,其焦平面的不同像元对同样的入射辐射温度存在不同的响应大小问题^[4],即非均匀性. 由于像元响应非均匀性的存在,导致随着外界辐射温度的升高,探测器响应呈现非线性增长. 焦平面阵列是探测器将外界辐射进行光电转换最核心的部分,焦平面吸收来自外界的红外辐射,并通过光电转换效应将辐射转化为相应的光电流 I_T ,对于不同的外界辐射温度,焦平面掺杂组分 x 的变化,会引起光电流 I_T 的变化. 目前,国内外的焦平面掺杂工艺还不能够保证焦平面各部分的组分完全一致,因此光电流 I_T 的大小随着外界辐射温度的变化一定是非线性的^[2],如式(1)

$$I_T = \eta_{QE} q A_{\text{pixel}} \tau_o \tau_a \varphi_T / 4 (f/\#)^2 \quad (1)$$

光电流与暗电流以及漏电流一起构成了读出电路中的总电流,但对于探测器的实际输出响应来说,其非线性最根本的源头是 I_T . 式中, η_{QE} 为量子效率, q 为电量, $\tau_o = A_o \Omega_T = \pi/4 (f/\#)^2$ 为光学传递系数 (A_o 为光学系统孔径, Ω_T 为入射辐射的空间立体角), $f/\#$ 为光学镜头 f 数, τ_a 为大气的传输系数

基金项目:江苏省自然科学基金重点项目(No. BK2008049)资助

第一作者:刘宁(1985-),男,博士研究生,主要研究方向为探测器成像机理及驱动技术,红外图像处理. Email:coolboy006@sohu.com

导师(通讯作者):陈钱(1964-),男,教授,博导,主要研究方向为光电探测与图像处理,光电信号处理与数字视频技术.

Email:chenq@mail.njust.edu.cn

收稿日期:2010-11-25;修回日期:2011-01-15

(为了方便计算假设与波长无关), A_{pixel} 为有效像元的表面积和, φ_T 温度为 T 的黑体在确定的时间内在探测器面积对应的空间角的光子通量. 探测器采用 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料制造焦平面, 其激发层宽度 t 通常大于少数载流子的扩散长度 L_e ^[5], 对于工作波长小于截止波长的情况, 即当 $\alpha L_e \gg 1$, $\lambda < \lambda_{\text{co}}$ 时, 量子效率 η_{QE} 可用式(2)简化描述^[5]

$$\eta_{\text{QE}} = 1 - \exp(-\alpha t) \quad (2)$$

式中的 α 为吸收系数, 其表达式为组分 x 的函数^[6]. 式(1)中 φ_T 的幅度与探测器响应外界辐射的频率 ν 和外界目标辐射温度 T 有关, 可由式(3)表示^[7]

$$\varphi_T = \int \frac{2\pi\epsilon_T}{c^2} \frac{\nu^2 d\nu}{\exp(h\nu/kT_T) - 1} \quad (3)$$

式中, c 为真空中光速, h 为普朗克常量, k 为波尔兹曼常量, ν 为入射辐射频率, 其上限为截止频率 ν_{co} , ϵ_T 为目标辐射发射率(本文中为便于计算假设为常量), 在式(1)~(3)的基础上对焦平面制造工艺中掺杂组分的变化引起的响应非线性进行分析.

由于式(3)表达式较为复杂, 使用韦恩近似以上限截止频率 ν_{co} 代替入射辐射频率得到简化式

$$\varphi_T = \frac{2\pi\epsilon_T}{c^2} \left(\frac{k}{h}\right)^3 T_T \exp(-Z_T) [(Z_T + 1)^2 + 1] \quad (4)$$

式中, $Z_T = h\nu_{\text{co}}/kT_T$, 截止频率 ν_{co} 与焦平面材料的带隙 E_g 有关^[7], 即 $E_g = h\nu_{\text{co}}$. 结合式(1)~(3)可以发现, 影响探测响应非线性最主要的两个因素是量子效率 η_{QE} 和光子通量 φ_T , 这两个因素对光电流 I_T 都是掺杂组分 x 的函数, η_{QE} 与 x 的关系通过吸收系数 α 表现出来, 而 φ_T 与 x 的关系则通过带隙 E_g 表现^[8]. 式(1)中的其余各参量的改变也会引起光电流 I_T 的变化从而导致响应非线性的产生, 但是这不是本文分析的重点, 在此略过. 将式(1)对组分 x 求微分, 得到

$$\Delta I_T = [qA_d \tau_a / (4f/\#^2)] [\eta_{\text{QE}} (\Delta\varphi_T / \Delta x) + \varphi_T (\Delta\eta_{\text{QE}} / \Delta x)] \Delta x \quad (5)$$

式(5)中包含了 η_{QE} 和 φ_T 分别对组分 x 的微分式, 其物理含义表示单位组分 x 的变化会引起焦平面吸收外界辐射的量子效率以及光子通量的大小变化, 组分每改变 Δx 就会相应的引起量子效率和光子通量分别发生 $\Delta\eta_{\text{QE}}$ 和 $\Delta\varphi_T$ 的改变, 从而达到改变焦平面转换的光电流 I_T 的作用. 将式(2)和式(4)对 x 分别求微分, 得

$$\Delta\varphi_T / \Delta x = -(\pi/c^2)(k^2/h^3)(T_T z_T)^2 \times [\exp(-z_T)] (\Delta E_g / \Delta x) \quad (6)$$

$$\Delta\eta_{\text{QE}} / \Delta x = t [\exp(-\alpha t)] (\Delta\alpha / \Delta x) \quad (7)$$

通过式(6)和(7), 可以很清楚地观察到焦平面组分 x 对于量子效率 η_{QE} 和光子通量 φ_T 的影响是服从指

数形式单调变化的, 式中, E_g 的单位为 eV, T 的单位为 K, $\Delta\alpha/\Delta x$ 可用式(8)表示^[9]

$$\Delta\alpha/\Delta x = -[(3\beta/2)/E_g^{1/2}] (\Delta E_g / \Delta x) \quad (8)$$

式中, 对于中波器件 $\beta = 3.07 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$, 在 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料中当 x 满足条件 $0.2 < x < 0.6$ 时, 带隙 E_g 与 x 的关系可用式(9)表示^[10-11]

$$E_g = -0.302 + 1.93x + 5.35 \times 10^{-4} T(1-2x) - 0.81x^2 + 0.832x^3 \quad (9)$$

对式(9)求微分可以得出 $\Delta E_g / \Delta x$ 为

$$\Delta E_g / \Delta x = 1.93 - 1.07 \times 10^{-3} T - 0.162x + 2.496x^2 \quad (10)$$

结合式(5)~(10), 可计算出不同掺杂组分 x 相对应的光电流 ΔI_T 的大小, 从而可以较为准确地判断出由于辐射温度引起光电流的改变造成的探测器响应非线性的大小.

2 探测器响应非线性的双指数曲线拟合及验证

在对式(6)和(7)的分析中可以发现, 影响探测器响应非线性的两个关键因素是两个指数形式的表达式, 而这两个表达式最终都与外界辐射温度 T 密切相关. 同时, 探测器实际响应还与暗电流和噪音等其它因素有关. 本文选取黑体温度从 30°C ~ 80°C 的范围, 在探测器有效响应范围内令光电流逐渐增大(从而暂不考虑暗电流的贡献), 并在实际采集数据时对每一个温度点连续采集 50 帧求平均, 去除噪音贡献. 从而, 探测器响应的非线性情况可以用双指数曲线(Double Exponential)表达式来等效

$$V(T) = a_1 \exp(a_2 + a_3 T) + b_1 \exp(b_2 + b_3 T) \quad (11)$$

式中, T 为外界辐射温度, $V(T)$ 为当前 T 的辐射温度下的探测器响应的电压值, $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$ 分别为曲线的控制系数, 用以控制曲线的整体形状. 其值由探测器各个像元对外界辐射响应的偏移系数和增益大小的不同取值来控制, 这种取值的不同主要来自于探测器本身对于不同的辐射温度, 各个像元响应的非均匀性以及制冷温度在时间与空间上的变化导致的各个像元响应的差异性. 对于制冷型探测器来说, 焦平面在制冷机的保证下几乎不受环境温度的影响, 因此在双指数曲线中没有加入直流偏置一项. 实验所用探测器正常工作标称工制冷温度为 78 K, 使用的温度二极管为 2N2222. 先利用高精度 AD 转换芯片 AD9240 对温度为 30°C ~ 80°C 范围内的黑体辐射进行模数转换并采集其相应的 14 bit 数字值, 同时测得当前的温度二极管电压为 1.045 V, 对应 2N2222 的制冷温度为 78 K 时采集

探测器输出响应数据. 选定合适的曲线控制系数对采得的各温度段的 14-bit 数字信号进行拟合, 并与目前应用最广的非线性响应二次曲线拟合^[1,12] 结果进行对比, 如图 1.

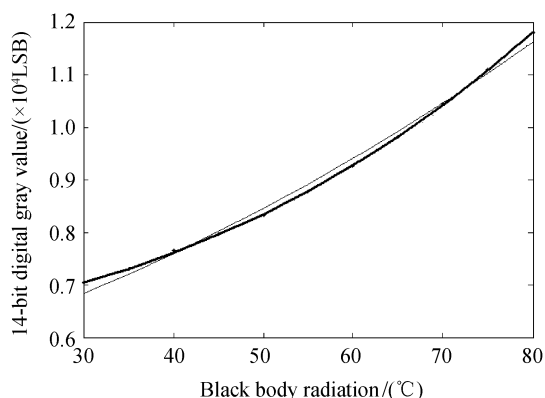


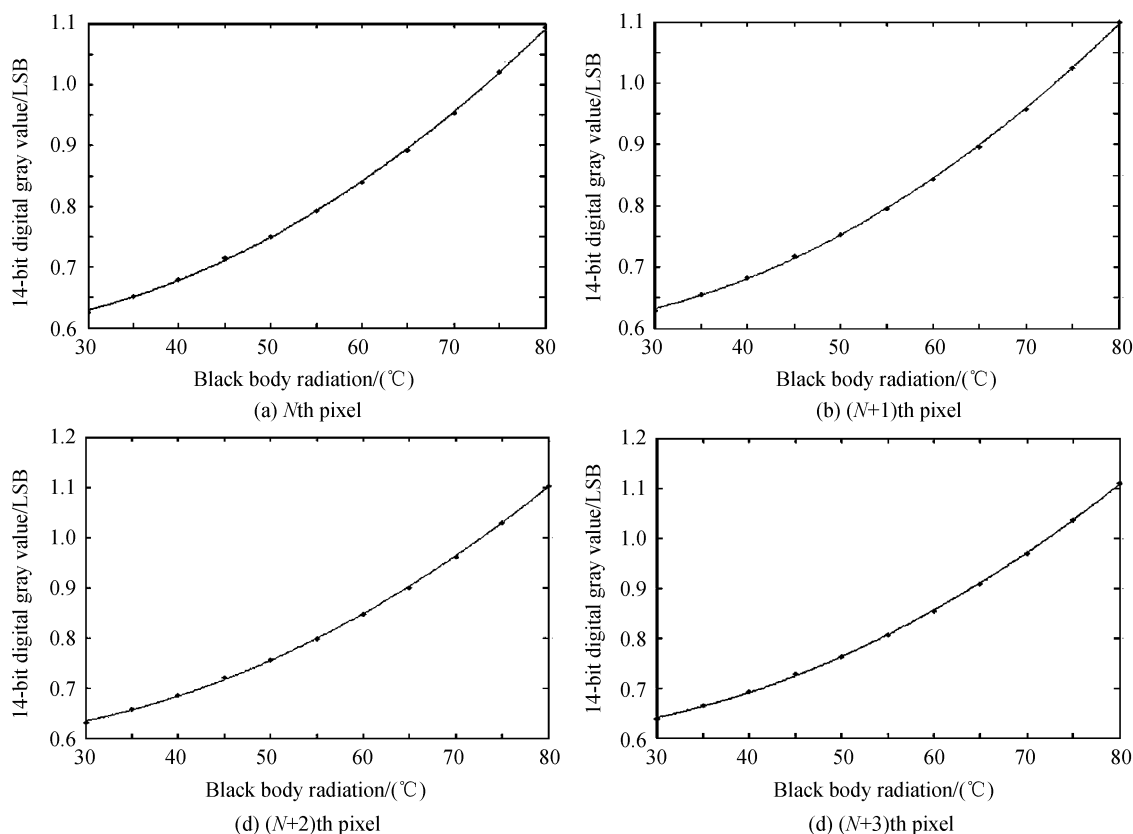
图 1 双指数曲线拟合与二次曲线拟合对比
Fig. 1 The comparison of the double exponential fitting data and the quadratic fitting data

图 1 中, 较粗的曲线为双指数曲线拟合数据, 较细的曲线为二次曲线拟合数据, 实点为探测器实际响应值. 可以看出, 对于本国产探测器在不同温度点的实际响应值, 本文提出的双指数曲线拟合效果明显更优. 三种数据的 14-bit 数值十分接近, 但是双指数曲线拟合的结果更加忠实于原始响应的情

况, 且误差非常小, 二次曲线拟合在某些温度点或温度段内有较好的效果, 但是在选定的温度范围内仍然有部分温度段无法很好地拟合.

分析可知, 随着辐射温度的升高, 探测器焦平面每个像元的实际响应情况, 也应该服从本文中提出的双指数曲线模型. 实验选取各个温度点下六个空间位置相隔较大的像素测量其随着温度升高的响应, 并利用模型拟合出相应温度点下的响应数据, 可以看出, 对于单个像素点, 在制冷条件不变的情况下, 双指数曲线拟合对探测器实际响应拟合程度非常好, 图 2 给出了单个像素的拟合曲线.

从对于 30 °C~80 °C 温度范围内的探测器整体响应以及单个像素的响应情况的实际拟合效果中可以看出, 外界辐射温度的改变引起探测器响应的非线性情况在使用双指数曲线模型时能够很好地与理论分析结果相对应, 从而证明了焦平面转换的光电流是引起响应非线性的最主要因素, 其实际影响大小也符合理论推导的计算. 本文中提出的双指数曲线模型较二次曲线模型对于在宽温度段范围内也更有优势, 但是由于其表达式的形式稍有些复杂, 因此还需要在今后的研究中进行优化, 使其能够更方便地描述探测器响应的非线性特性.



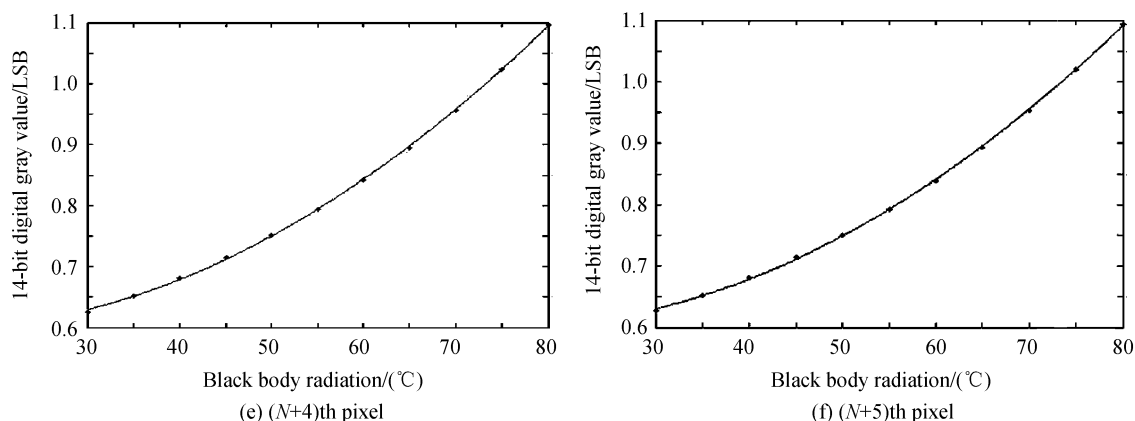


图2 单个像素点实际响应的二次曲线拟合图及对应参量

Fig.2 Quadratic fitting of the actual data and the corresponding parameter of 6 separate pixels

3 结论

本文通过对焦平面掺杂组分改变时产生的量子效率和光子通量的变化,继而影响焦平面吸收外界辐射产生的光电流的变化进行分析,推导了由于焦平面组分不均匀引起的当外界辐射发生改变时,焦平面光电流变化的理论模型.在实验中通过将黑体辐射温度在宽范围内升高的方式,使由光电流的增大造成的对响应非线性影响成为主要因素.由于光电流的变化是基于组分不均匀性推导得出的,因而根据公式提出使用双指数曲线模型对响应进行拟合,分析发出,该双指数曲线模型较二次曲线模型对于探测器实际响应有更好的拟合效果,实际数据分析及图表分析证明了双指数曲线模型在拟合效果上精确性.

参考文献

- [1] QU Hui-ming, CHEN Qian. A theoretical model on infrared focal plane arrays binary nonlinear nonuniformity [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, **36**(11): 2151-2153.
屈惠明, 陈钱. 红外焦平面阵列二元非线性的非均匀性理论模型[J]. *电子学报*, 2008, **36**(11): 2151-2153.
- [2] JOHNSON J F. Hybrid infrared focal plane signal and noise model [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1999, **46**(1): 96-108.
- [3] KARINS J P. Models of nonlinearities in focal plane arrays [C]. *SPIE*, 1992, **1685**(103): 103-109.

- [4] GAO Si-li, YU Yang, YANG Xin-yi. Simulation of nonlinear response of IRFPA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(5): 770-772.

高思丽, 于洋, 杨心溢. 红外焦平面阵列非线性响应仿真[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(5): 770-772.

- [5] BAJAJ J. State-of-the-art HgCdTe infrared device [C]. *SPIE*, 2000, **3948**(2000): 42-54.
- [6] HOUGEN C A. Model for infrared absorption and transmission of liquid-phase-epitaxy HgCdTe [J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, **66**(13): 3763-3766.
- [7] GOPAL V. Model for response nonuniformity calculations of a direct-injection readout hybrid focal plane array [J]. *Optical Engineering*, 1994, **33**(3): 809-819.
- [8] FINKMAN E, SCHACHAM S E. The exponential optical absorption band tail of Hg_{1-x}Cd_xTe [J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, **56**(31): 2896-2900.
- [9] GARDETTE H, ARRIETA E. Temporal noise prediction for cooled infrared photodiodes array [J]. *SPIE*, 2008, **7100**(28): 1-12.
- [10] FRIEDENBERG A, GOLDBLATT I. Nonuniformity two-point linear correction errors in infrared focal plane arrays [J]. *Optical Engineering*, 1998, **37**(4): 1251-1253.
- [11] MILTON A F, BARONE F R, KRUEER M R. Influence of nonuniformity on infrared focal plane array performance [J]. *Optical Engineering*, 1985, **24**(43): 855-862.
- [12] LIU Hui-tong, WANG Qi, ZHENG Zhi-wei, et al. Analysis and calculation of the nonlinear response in infrared focal plane arrays [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2001, **20**(4): 253-258.
刘会通, 王骥, 郑志伟, 等. 红外焦平面阵列非线性响应的分析和计算[J]. *红外与毫米波学报*, 2001, **20**(4): 253-258.

Analysis of the Nonlinearity of Cooled Infrared Detector

LIU Ning, CHEN Qian, GU Guo-hua, SUI Xiu-bao

(Department of Optics and Electronics; Ministerial Key Laboratory of JGMT, School of Electronic Engineering and Optoelectronic Techniques, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The compositions of each part on the focal plane array (FPA) are not likely the same because of the manufacture defects. The defects will cause the inherent differences between pixels while the focal plane array is conducting the photoelectronic conversion. This paper has derived the theoretical model of the nonlinearity of the cooled detector corresponding to the composition x , which is based on the research project of the domestic 640×512 MWIR cooled thermal imager. The infrared radiation received by the FPA and converted into photocurrent, this type of current has significant relationship with the nonlinearity of the detector according to the composition x in the $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ material. A black body was used to radiate the detector under the wide working temperature of the detector, and amount of experimental data were collected under every pre-set temperature point. According to the parameter change that influence the photocurrent most, a double exponential fitting model was proposed to describe the nonlinearity characteristics of both the total response and the separate pixel response of the detector. Multiple works were carried out by analyzing the response data in the form of diagram and table to prove the accuracy of the real response fitting by this model.

Key words: Cooled detector; Nonlinearity; Double exponential fitting; Composition