碲镉汞焦平面器件 CMOS 读出电路的发展

王忆锋 钱 明

(昆明物理研究所,云南昆明 650223)

摘 要:通过对近年来的部分文献资料进行归纳分析,介绍了碲镉汞焦平面器件 CMOS 读出电路 (ROIC) 的发展动态。讨论了读出电路的有关概念。列出了部分前放电路的单元结构,并分析了它们的工作特点。介绍了积分时间、积分电容以及多路传输等因素对读出电路设计的影响。

关键词:碲镉汞;红外探测器;读出电路; CMOS

中图分类号: TP386.5 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2011.07.001

Development of CMOS Readout Circuits for Mercury Cadmium Telluride Focal Plane Array Devices

WANG Yi-feng, QIAN Ming

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: The development status of CMOS readout circuits (ROIC) of mercury cadmium telluride focal plane array devices were reviewed by summarizing and analyzing some papers published in recent years. The related concepts of ROIC were discussed. The unit structures of some preamplifier circuits were listed and their operating characteristics were analyzed. The effects of some factors such as integration time, integration capacitance, multiplexing and etc. on the design of ROIC were presented.

Key words: mercury cadmium telluride; infrared detector; readout circuit; CMOS

0 引言

碲镉汞焦平面阵列 (Focal Plane Array, FPA) 器件是第二 / 三代红外成像技术的主流探测器 ^[1]。它由探测器芯片和读出集成电路 (Readout Integrated Circuit, ROIC) 芯片组成。其中,读出 集成电路是红外成像系统的关键组件之一,其 主要功能是对探测器信号进行预处理并提供输 出通道。探测器芯片与读出电路芯片两者之间 的耦合是通过前置放大器 (以下简称前放)电路 实现的^[2]。前放一直是读出电路发展的关键所 在^[3]。互补型金属氧化物半导体晶体管 (CMOS) 具有功耗小、耐低温^[4]、可采用标准 IC 工艺以 及成本较低等优点,已逐渐成为读出电路的主 流技术^[5]。本文主要介绍近年来碲镉汞焦平面 器件 CMOS 读出电路的发展情况。

1 读出电路及前放的构成

为使概念清晰、统一起见,这里沿用文献 [6,7] 的表述,先界定本文所用的几个英文术语 pixel、sensor和 device 的相应汉译名称。pixel 译 为"像元",它是由一个(单元)探测器和一个随 之相配的读出电路构成的组合体;显示器上的 图像单元则称为"像素"。由若干数量的像元排

收稿日期: 2011–05–12

作者简介: 王忆锋 (1963-),男,湖南零陵人,工学士,高级工程师,主要从事器件仿真研究。 E-mail: wangyifeng63@sina.com

列而成的集合称为传感器 (sensor)。在英语中,

"A device is an object that has been made or built for a particular purpose, for example for recording, or measuring something^[8]"。从字面意义上说来,

"器件"的涵盖范围更接近于"传感器"。另外, 注意到英语中的单复数用法后可知,在某些应 用场合, pixels 实际上已经是指 sensor 或 device。

在不同的应用场合,大体上可以确定探测 器接收的光子数^[9]。该量值将会直接影响人们 对探测器的类型或结构的选择。pn 结是碲镉汞 焦平面器件的核心。pn 结在工作时要加偏 (置 电) 压。偏压有正偏、反偏和零偏之分,如图 1 所示。正偏 pn 结为普通二极管。对于频率非常 高的应用,例如单光子计数探测器^[10]、CO₂激 光外差探测以及光纤通信等,为了降低器件的 时间常数, pn 结通常工作在反偏模式^[11]。用于 红外探测的 pn 结一般工作在零偏模式^[11]。用于 红外探测的 pn 结子的正常。为挥测器 提供恒定的近零伏偏压是对读出电路的要求之 一^[13]。为了使偏压的准确性变高,需要有稳定 的加工工艺,否则器件的成品率会降低,其性能 也难以得到保证^[14]。



图 1 pn 结施加偏置电压的 3 种模式

图 2(a) 所示为 pn 结的光电探测过程。在 pn 结上吸收目标辐射光子形成信号电流;在 pn 结 上吸收背景辐射光子形成背景电流;同时还有 pn 结的暗电流输出。图 2(b) 所示为 pn 结光电探 测过程的实际等效电路。其中有 3 个电流源,即 光生信号电流 *I_{ph}*、散粒噪声电流 *I_s*和热噪声电流 *I_s*和热噪声电流 *I_i*; *C_j*为 pn 结的电容; *R_j*为 pn 结的电阻;

Infrared (monthly)/Vol.32, No.7, Jul 2011

*R*_s 为串联电阻,它是一个与二极管接触电极相关的微小残余电阻,其影响可以忽略不计;*R*_L 为负载电阻;*R*_i 为下级放大器的输入阻抗。



光电探测在本质上是一个对光电信号进行 转换和放大的问题。复杂的放大机制在像元外 面完成,而简单的放大机制可以放在像元内完 成,这就是前放,如图 3 所示。红外系统的灵敏 度主要取决于探测器和前放^[6]。前放噪声是整 个读出电路的主要噪声源,也是影响探测器芯 片信噪比损耗的重要因素,对探测器信号的电 荷注入效率、直流背景电信号抑制和功耗等均 有影响^[2]。通过将探测器 / 前放电路中的输入 噪声等效为特定噪声源,可以在分析这些噪声 源的基础上获得前放的最优设计^[6]。



图 3 读出电路及前放的构成图

前放构成了一个负载电阻或阻抗。为了让 信号和能量得到有效传输,必须使前放工作在 阻抗匹配状态,即使探测器电阻与负载电阻相 等,此时传递的能量最大^[15],注入效率也高。即 使在不要求精确匹配的情况下,让探测器电阻与 负载电阻大体匹配也是有益的^[15]。阻抗及工作 点的失配会使探测器的信噪比大为降低^[2]。文

献中对于碲镉汞器件的阻抗有着不同的说法。 例如, 文献 [16] 称典型的碲镉汞光导器件的阻抗 低达 50 Ω, 碲镉汞光伏器件的阻抗可达到上百 甚至上千欧姆。文献 [6] 称碲镉汞器件的电阻小 于 100 Ω。文献 [11] 称工作温度为 200 K、面积 为 50×50 μ m² 的长波红外碲镉汞器件的电阻小 于 40 Ω。

前放所在的位置通常邻近探测器。由于能 够安置这些电路的空间有限,人们大多采用非 常简单且有效的电路结构^[17]。此类电路一般只 含有两三个晶体管。晶体管的选择标准主要是 根据探测器电阻值的大小和传输频率的范围来 确定的^[6,18]。图 4 所示为部分常见的 CMOS 前 放电路。在进行前放电路分析与计算时,一般可 略去 pn 结的电阻、电容以及电流源等,将其视 为一个理想二极管,如图 4(a) 所示。

2 前放电路的部分结构

从电路原理上说来,将光生电流信号 *I*_{ph}转换为电信号有两种途径,一种是利用式 (1)进行。

$$V_L = I_{ph} R_L \tag{1}$$

式中, R_L为引入的负载电阻, 如图 4(b) 所示。 这种方法称为直接电流法^[19]。由于 I_{ph} 很小,



 M_{p2} M_{p1} M_{p2} M_{p1} C_{int} Κ C_{int} K Cint M_{n2} Κ Κ M_{n1} M_{n1} M_{n2} •V_{reset} Vreset (h) (j) (i)

图 4 部分 CMOS 前放电路的单元结构

http://journal.sitp.ac.cn/hw

INFRARED (MONTHLY)/VOL.32, NO.7, JUL 2011

要求 R_L 值很大。它可以放在像元内,也可以放 在像元外。文献 [20] 指出,由于大电阻的制备与 CMOS 工艺不兼容,实际上 R_L 的阻值不可能很 大。但从近年来的情况来看,采用 CMOS 工艺 亦可制备大电阻。文献 [21] 作者通过 0.35 μ m 双 多晶硅工艺制备了 1 MΩ 的电阻。文献 [22] 作者 利用高阻多晶硅工艺在芯片内集成了 41 MΩ 的 电阻,从而直接把光生电流信号转化为电压信 号,避免了电阻加在像元外构成外来噪声源的 缺点。

将光生电流信号 *I_{ph}* 转换为电信号的另一种 途径是采用光子积分工作模式,其核心是积分 电容。根据电压 V 与电荷量 *Q* (库仑, C)、电容 *C* (法拉, F) 之间的关系:

$$V = \frac{Q}{C} \tag{2}$$

可以写出

$$Q_{int} = C_{int} V_{ref} \tag{3}$$

式中, Q_{int} 为电荷存储量, C_{int} 为积分电容, V_{ref} 为参考电压。早期有直接利用 pn 结电容 C_j 作为积分电容的读出电路结构,可能是由于 C_j 太小的原因 (pn 结电容通常在 pF 甚至更小的量 值范围内^[23]),随后人们一般都会引入一个独 立的积分电容 C_{int}。在微弱辐射信号探测中,采 用光子积分工作模式要比直接电流法更为有效 ^[19]。

简单地说,光子积分工作模式就是一个电容的充电和放电过程。光生电荷将电容从"空" 增至"填满"的累积过程称为电荷积分。完成该过程所需要的时间即为读出电路的积分时间。 对积分时间的控制可以通过一个开关动作来实现(如图 4(d)中的 K 所示,其中 V_{reset} 为复位电压)。

文献中经常可以看到有高、中或低背景这样的提法。经归纳后可知,高背景是指以地面为背景,如空对地、地对地,还可以包括水面;中背景是指以空中为背景,如地对空、空对空;而低背景是指以低温外层空间为背景。高、中、低背

景可以用光子数的大小来描述。图 4(d) 所示为 自积分型读出电路,其中的积分电容可以是 pn 结自身的结电容,也可以是另外引入的独立电 容。图 4(d) 所示为直接注入 (Direct Injection, DI) 结构^[21,24]。该电路在中、高背景下的输入阻抗 较低;在低背景下的输入阻抗较大^[20]。图 4(e) 所示为双色碲镉汞直接注入型读出电路^[25],其 优点是两个波段在积分电容、外加偏压和积分 时间方面可以独立优化,缺点是每个像元需要 两个通道,电路结构比较复杂。

图 4(f) 所示为缓冲直接注入 (Buffered Direct Injection, BDI) 结构。它是通过在探测器节点与 MOSFET 输入门之间加入一个反向放大器来降 低输入阻抗,从而改善注入效率、偏压稳定性以 及频率响应的。在中、高背景下,它可以将探测 器偏压值保持为常数^[3]。其缺点之一是功耗较 大。虽然在较高的反向放大器增益下,由阈值电 压变化引起的探测器偏压变化将会减小,但是 由于单元与单元之间放大器偏置电压的变化, 要使所有探测器都保持零偏仍然比较困难^[3], 因此会引起非均匀性和增加噪声。

图 4(g) 所示为电容反馈跨阻抗放大器 (Capacitor Feedback Transimpedance Amplifier, CTIA) 读出电路。CTIA 的增益大小由积分电容 C_{int} 确 定。对于高灵敏度应用来说,其积分电容可以 做得非常小^[4]。由于放大器具有较高的开环增 益, CTIA 可以提供很低的输入阻抗^[2],因而 可调节到阻抗匹配的状态。CTIA 的缺点之一是 引入了额外功耗。文献 [26] 提出了一种改进型 CTIA 单元结构,它由共源共栅电流镜作负载的 单级放大器组成。该结构能很好地控制探测器偏 压,线性度和注入效率也有所提高。若采用倒宽 长比设计,该放大器可以得到低功耗。文献 [27] 研究了 CTIA/ROIC 的非线性情况。文献 [28] 介 绍了具有复位和紧凑信号平均功能的低噪声跨 抗输入放大器的设计。

电流镜结构具有低输入阻抗^[13]。在 DI/ ROIC 中的积分电容节点处再接入一个与探测 器节点处的 MOSFET 完全匹配的晶体管,就构

Infrared (monthly)/Vol.32, No.7, Jul 2011

成了电流镜栅调制 (Current Mirror Gate Modulation, CMGM) 读出电路,如图 4(h) 所示。该电 路可以避免高背景应用中积分电容电压快速饱 和的问题^[3]。文献 [29] 介绍,通过利用宽摆幅自 偏置电流镜结构对传统的 CMI 电路进行改进, 可以提高电流镜的工作稳定性和降低功耗。

为了使探测器保持零偏, 文献 [3] 介绍了一 种电流镜像直接注入 (Current Mirroring Direct Injection, CMDI) 电路, 如图 4(i) 和图 4(l) 所示。在 电流镜中,如果一对 MOSFET 完全匹配,那么流 过这两个 MOSFET 的漏电流将会相等;反之, 如果同样的漏电流流过一对具有相同几何结构 的 MOSFET, 那么其存储门上的电压 V_{cs} 应该 相等。基于这一概念,图4(i)中使用了两个具有 相同尺寸的 NMOSFET 管 M_{n1} 和 M_{n2}。若它们 的电流相等,则 M_{n2} 的源电压应该为零,这是因 为两者的门节点是连接在一起的。因此, 探测器 的偏压将会保持在零电平。为了让流过 M_{n1} 和 M_{n2} 的电流相等, 可将 PMOSFET 电流镜 M_{n1} 和 M₂₂ 连接至 NMSOFET 电流镜。流过 M₂₂ 和 M₂₂ 的光生电流为 I_{ph} 。于是,由于 M_{p1} 和 M_{p2} 的电 流镜像,同样的电流将会流过 M₂₁ 和 M₁₁,因此 M_{n1}和M_{n2}的漏电流相等,探测器偏压将会被固 定在零电平。在这种情况下,积分电容 C_{int} 中累 积的电流是光生电流 I_{ph} 和流过 M_{n1} (以及 M_{p1}) 的电流之和。但是阈值电压的失配将会引起一 些问题。当 M₂₁ 和 M₂₂ 工作在亚阈值区域时, 它们的阈值电压即使有很小的失配也会在其漏 电流中引起较大的差异。即使在均匀辐照的情 况下,积分电流中也会存在非均匀性。图 4(j) 所 示为针对这一情况提出的改进型 CMDI 电路。 由于积分电容 C_{int} 被放在了 M_{n2} 和 M_{p2} 之间, 只有光生电流 I_{vh} 可被积分。因此, 阈值电压的 失配不会影响均匀性, 而仅对探测器偏压有较 小的影响^[3]。

3 积分电容

电荷存储量 Q_{int} 与电荷个数 N_e 之间存在以下关系:

$$N_e = \frac{Q_{int}}{1.6 \times 10^{-19}} (\uparrow) \tag{4}$$

http://journal.sitp.ac.cn/hw

红

文献叙述中一般略去了参考电压项 V_{ref}, 而只提 电荷量或电子数。例如, 0.8 pF 的电容约有 1500 万个电子的容量^[30],由式(3)可以算出该组值 所对应的 V_{ref} 值为 3 V。可以存储的电子数目与 MOS 电容器的栅极面积成正比。一般说来, 一个 势阱在每平方微米上可以容纳 10000~25000 个 电子。文献 [4] 指出, 硅读出电路的最大电荷存 储量约为 3×107 个电子 / 像元。 文献 [31] 称采用 特殊结构可以提高读出电路的电荷存储能力。 法国 Sofradir 公司的高性能 640×512 元中波红外 碲镉汞焦平面器件的电荷存储量为 4.7 × 10⁷ 个 电子。事实上,最大电荷存储量是读出电路的一 个主要性能参数^[5]。长波红外碲镉汞凝视器件 一般是电荷存储限的,其主要限制因素就是最 大电荷存储量^[32]。焦平面阵列中心距的减小对 像元的最大电荷存储量有较大影响^[33]。对于中 心距为 30 µ m 的 320×256 元焦平面器件来说,其 电荷存储量可达 5.9 pC [32]。标准的 CMOS 电容 可能很难实现小像元所要求的高电荷存储量。 一种有希望的工艺是铁电电容器技术^[34]。

从式 (3) 中可以看出, 当参考电压确定以 后, 电荷存储量取决于积分电容的大小。人们一 般希望在减少中心距的同时, 可以增加积分电容 (特别是对于长波红外器件),或者至少保持相同 的积分电容^[32]。通常积分电容是做在像元电路 内的, 因受面积限制, 不可能做得很大^[20](积分 电容太大也会使探测器的灵敏度下降^[26]), 于 是出现了通过将光生电流引至置于像元外的电 荷放大器来读取电荷的结构^[35],即快照电荷放 大器 (Snap Charge Amplifier, SCA)。它可以使像 元的电荷处理能力达到最佳。据文献[36]报道, 256×256 元 SCA/ROIC 的电荷处理能力是典型的 开关读出结构的两倍。

由于积分电容一次只能装下数量有限的电 子,如果从探测器输入的电子多于这一有限数 目的话,那么就会出现饱和现象而无法再从该 像元中提取信息,而且周围像元中的信息也会 变得混杂起来。当接近饱和时,串音和非线性效 应就变得很强烈。若将用于低背景的焦平面阵 列用于高背景中,也会出现饱和现象。对于工作

INFRARED (MONTHLY)/VOL.32, NO.7, JUL 2011

在高背景下的长波红外碲镉汞探测器,由于易 出现饱和问题,需要引入高时钟频率来实现读 出^[37]。文献[16]称要使长波红外碲镉汞焦平面 器件远离饱和比较困难。

读出电路的电荷处理能力可直接决定焦平 面阵列的动态范围。具有较大的动态范围^[28]是 对高性能读出电路的要求之一。一种处理方法 是在每个像元中引入一个起"电荷舀除"作用的 带栅-阴放大器的电流源,给该电流源全芯片加 偏压,从每个像元中减去一个代表背景影响的 固定量,以使动态范围得到充分利用^[38]。读出 电路的输出摆幅是指不同背景下输出的信号电 压的摆动区间,该值会直接影响焦平面阵列的 动态范围。当输出摆幅过小时,探测器易饱和, 积分时间受限。在不影响其他性能的前提下,输 出摆幅越大越好^[39]。文献[39]分析了影响输出 摆幅的各种因素,并提出了输出摆幅的优化方 法。

4 积分时间

在扫描型成像系统中,完成一帧场景图像 扫描所需要的时间称为帧时间。凝视型成像系 统不需要进行扫描,构成焦平面阵列的所有探测 器同时在"看"场景,这段时间称为凝视时间。 文献 [30] 报道了采用 0.8 μm CMOS 工艺制备的 ME680/MUX。在采用先凝视后读出(即所谓"眨 眼") 模式工作时, 8 MHz 的时钟脉冲允许 10 ms 的最大凝视时间。 探测器的积分时间可以等于 帧时间,这是凝视型焦平面阵列的主要优点。 因此, 需要读出电路提供可与帧时间相比的积 分时间。积分时间的极限值可以等于由人眼视 觉暂留效应所决定的帧时间[37]。当光子数一定 时,积分时间由探测器的量子效率和读出电路 的电荷存储容量决定^[34]。显然,当确定所用探 测器以后,积分时间取决于读出电路的电荷存 储容量,并且是一个可以调节的参数。例如,德 国 AIM 公司推出的 256×256 元双色碲镉汞焦平 面器件的积分时间在 30~350 μs 范围内可调。 长波红外碲镉汞焦平面器件的积分时间一般可 短至 100 µs^[40]。

2011 年7月 单位时间内完成的帧数称为帧 (速) 率, 它是 帧时间的倒数^[41]。高速 / 高帧率是第三代碲镉 汞焦平面器件的发展方向之一^[31]。这里的高速 主要是指积分时间短^[40]。坦克瞄准等应用并不 要求积分时间短至几毫秒以下^[42]。同时, 30~ 60 帧/s 的帧率足以满足目视显示的要求^[31,34]。 导弹制导和导弹告警等应用则要求在最短的积 分时间内将景象捕捉下来,这要求器件具有高 帧率能力。高帧率会使读出电路芯片的功耗上升 [31,34],相应地也会增加制冷机的功耗 [31],因此 需要使用低功率的比较器和数字驱动器^[35]。文 献 [28] 讨论了实现高帧率的方法。据文献 [38] 报 道,如果每个像元都带有 A/D 和 D/A 的读出电 路, 就可以达到 1000 帧 /s 以上的帧率。另外, 通过引入开窗功能来减少读出时间,可以提高所 选窗口的帧率^[30]。在较小的局部窗口区域实现 高帧率,可使功耗增幅不至于过大。文献 [43] 介 绍了一种可设定任意行选的焦平面读出电路。 它可在焦平面阵列中控制选择无规律的任意连 续和非连续的一行或多行积分信号进行采样读 出, 替代了原来的逐行读出。由于可以跳过未选 择的行,节省了读出时间。 较大的积分时间可以产生较大的电压,有

取入的软分的间可以广生较入的电压,有 助于改善信噪比。如在低光子数应用中,碲镉汞 焦平面器件为光子噪声限,故积分时间越长,性 能越好^[32]。但在高速应用中,其积分时间就必 须短。在观察快速运动的物体时,要避免积分过 程中由于物体运动造成的模糊效应。此时,积分 时间非常短的快照模式是最佳选择之一。选择合 适的积分时间可以使系统达到最优性能^[44]。

5 多路传输

探测器信号通过由引线构成的信号通道输 出。信号通道的数量原则上应与探测器的数量 相等^[45]。这一点对于单元及(数量较少的)多元 器件来说,尚可实现,但对于由数以万计的探测 器构成的焦平面器件来说,要做到这一点则不现 实。有一种方法是由外部时钟驱动的移位寄存 器提供行 / 列扫描,并通过对焦平面阵列作 X-Y 方向的顺序寻址来读出探测器信号^[4]。这一思 路与计算机内存芯片的读取方法类似。通过将

顺序扫描的移位寄存器改为随机地址发生器, 可以在大面阵焦平面阵列上实现任意开窗的功 能^[14]。通过寻址方式读出焦平面阵列的探测器 信号,首先需要制备一个在几何结构上与焦平 面阵列相对应的读出阵列。 CMOS 读出阵列主 要是各种形式的 MOS 阵列开关。

6 结束语

读出电路实际上是一个特种集成电路 (IC) 芯片的设计和定制问题。与碲镉汞探测器一样, 读出电路的研发是一项资金、技术、设备和人才 密集的工作,其实践性极强。针对有关探测器与 读出电路难以两头兼顾的情况,国外有 IC 厂商 提出了标准读出电路的概念^[46]。标准读出电路 基于通用的结构和接口,具有不同的工作模式, 可配用不同的探测器。

在具体设计中,读出电路的一些性能参数 是相互制约或矛盾的,例如噪声和功耗、功耗和 速率等等,需要对其综合考虑和平衡才能得到 一个较优的折衷方案^[47]。碲镉汞探测器属于低 电阻探测器。作为最常用的焦平面阵列前放, DI和 CTIA 具有结构简单、偏压稳定等特点,但 其需要在输入阻抗及工作点上与探测器匹配, 以使碲镉汞焦平面器件获得较为理想的性能。

近年来, CMOS 工艺得到了不断发展, 例 如采用 0.1 μm 工艺已能在读出电路中引入数百 只晶体管^[38];采用高密度 130 nm CMOS 工艺已 可以在读出电路中引入计数、存储和寻址等数 字功能^[48],使原来在读出电路外面完成的一些 功能 (例如 A/D 等) 以及若干简单的信号处理可 在读出电路内进行^[24,48-51],从而形成数字读出 技术。该技术使所需的读出带宽大为降低,并可 进一步与探测器集成为智能化的灵巧型焦平面 阵列器件。

参考文献

[1] 王忆锋, 唐利斌. 第三代碲镉汞器件的研发进展 [J]. **光电技术应用**, 2009, **24**(5): 17-22.

http://journal.sitp.ac.cn/hw

- [3] Nanyoung Yoon, Byunghyuck Kim, Hee Chul Lee, et al. A New Unit Cell of Current Mirroring Direct Injection Circuit for Focal Plane Arrays [C]. SPIE, 1997, **3061**: 93–101.
- [4] Mohamed Henini, Manijeh Razeghi. Handbook of Infrared Detection Technologies [M]. London: Elsevier Science Ltd., 2002.
- [5] 汪建平, 武利翻, 熊平. 红外焦平面阵列的 CMOS ROIC 结构评述 [J]. 传感器与微系统, 2006, 25(1): 1-4.
- [6] Bielecki Z. Readout Electronics for Optical Detectors
 [J]. Opto-electronics Review, 2004, 12(1): 129–137.
- [7] Verghese S, McIntosh K A, Molar R J, et al. GaN Avalanche Photodiodes Operating in Linear-Gain Mode and Geiger Mode [J]. *IEEE Trans. on Electron Devices*, 2001, **48**(3): 502–511.
- [8] John Sinclair. 柯林斯精选英语词典 [M]. 北京: 中国对外翻译出版公司, 1989.
- [9] 王忆锋, 余连杰, 陈洁, 等. 基于探测距离的军用 红外探测器分类 [J]. **红外**, 2011, **34**(6): 34-38.
- [10] 王忆锋,马钰. 单光子雪崩二极管猝熄电路的发展[J]. 电子科技, 2011, 24(4): 113-118.
- [11] Antoni Rogalski. Infrared Photon Detectors [M]. Belliingham: SPIE Optical Engineering Press, 1995.
- [12] Willardson R K, Beer A C. Semiconductors and Semimetals, Vol.18: Mercury Cadmium Telluride [M]. New York: Academic Press, 1981.
- [13] 袁祥辉, 吕果林, 黄友恕. 采用电流镜放大 ROIC 的 CMOS 高灵敏度图像传感器 [J]. 半导体光电, 2003, 26(S1): 9-11.
- [14] 刘莉萍. 红外焦平面 ROIC 技术及发展趋势 [J]. 激 光与红外, 2007, 37(7): 598-600.
- [15] Dereniak E L, Boreman G D. Infrared Detectors and Systems [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [16] Campana S B. Infrared & Electro-Optical Systems Handbook, Volume 5: Passive Electro-Optical Systems [M]. Belliingham: SPIE Optical Engineering Press, 1993.
- [17] 程开富. 红外焦平面阵列用信号处理电路 [J]. 国外 电子元器件, 2002(2): 54-58.
- [18] Motchenbacher C D, Connelly J A. Low-noise Electronic System Design [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995.

INFRARED (MONTHLY)/VOL.32, NO.7, JUL 2011

- [19] 张烽生, 龚全宝. 光电子器件应用基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [20] 张华斌, 张庆中. 红外焦平面阵列技术现状和发展 趋势 [J]. **传感器世界**, 2005(5): 6-10.
- [21] Melik Yazici, Huseyin Kayahan, Omer Ceylan, et al. Design of A ROIC for Scanning Type HgCdTe LWIR Focal Plane Arrays [C]. SPIE, 2010, 7660: 76603X.
- [22] 袁红辉,陈永平,陈世军,等.一种差分输入HgCdTe
 红外探测器专用电流读出电路的研究 [J]. 激光与红
 外, 2009, 39(10): 1100–1103.
- [23] Donald A Neamen. 半导体物理与器件 —— 基本原 理(影印版) [M]. 北京:清华大学出版社, 2003.
- [24] Sang-Gu Kang, Doo H Woo, Hee C Lee. Infrared Focal Plane Array Readout Integrated Circuit with on-chip 14 b A/D Converter [C]. SPIE, 2004, 5234: 287–295.
- [25] Jean Giess, Mark A Glover, Neil T Gordon, et al. Dual-waveband Infrared Focal Plane Arrays Using MCT Grown by MOVPE on Silicon Substrates [C]. SPIE, 2005, 5783: 316–323.
- [26] 文勇, 夏晓娟. 高线性、高注入效率 CTIA 单元电路 的设计 [EB/OL]. http://www.paper.edu.cn, 2010.
- [27] 文勇,刘思超,金友山,等. CTIA 型读出电路非 线性的研究 [J]. 激光与红外, 2009, 39(9): 978–981.
- [28] Ashok Sood, James Egerton, Yash Puri, et al. Design Considerations of ROIC for Single Color LWIR and Multicolor IR Focal Plane Arrays [C]. SPIE, 2006, 6294: 62940.
- [29] 李伟,赵毅强,孙权,等.改进型电流镜积分红外 探测器读出电路设计[J]. 激光与红外,2009,39(10): 1100-1103.
- [30] David J Clarke, Peter Knowles. High Performance Thermal Imaging for the 21st Century [C]. SPIE, 2003, 4820: 350–358.
- [31] Philippe Tribolet, Philippe Chorier, Frédéric Pistone. Key Performance Drivers for Cooled Large IR Staring Arrays [C]. SPIE, 2003, 5074: 173–184.
- [32] Philippe Tribolet, Philippe Chorier, Alain Manissadjian, et al. High Performance Infrared Detector at Sofradir [C]. SPIE, 2000, 4028: 438–456.
- [33] Pierre Castelein, Francois Marion, Jean-Luc Martin, et al. A Megapixel HgCdTe MWIR Focal Plane Array with A 15 μm Pitch [C]. SPIE, 2004, 5251: 65– 72.
- [34] Horn S, Norton P, Cincotta T, et al. Challenges for Third-generation Cooled Imagers [C]. SPIE, 2003, 5074: 44–51.
- [35] Leonard P Chen. Advanced FPAs for Multiple Applications [C]. SPIE, 2002, 4721: 1–16.

INFRARED (MONTHLY)/VOL.32, NO.7, JUL 2011

- [36] 杨世明, 龚光华, 邵贝贝, 等. BESIII 剂量率在 线检测和保护系统读出电子学设计 [J]. 核电子学与 探测技术, 2006, 26(4): 434-437.
- [37] Osipov V V, Ponomarenko V P, Selkayov A Y. Ultimate Performance of New Infrared HgCdTe Focal Plane Arrays [C]. SPIE, 1999, 3819: 16–31.
- [38] Stauart Kleinfelder, Alison Hottes, Pease R F W. Focal Plane Array Readout Integrated Circuit with Perpixel Analog-to-digital and Digital-to-analog Conversion [C]. SPIE, 2000, 4028: 139–147.
- [39] 于艳. 红外焦平面读出电路的输出摆幅优化设计 [J]. 激光与红外, 2010, 40(6): 668-672.
- [40] Cabancki W, Breiter R, Mauk H H, et al. Broadband and Dual Color High Speed MCT MWIR Modules [C]. SPIE, 2002, 4721: 174–183.
- [41] 杨宜禾,岳敏,周维真. 红外系统 (第2版) [M]. 北京:国防工业出版社, 1995.
- [42] Cabancki W, Breiter R, Koch R, et al. 3rd Gen Focal Plane Array IR Detection Modules at AIM [C]. SPIE, 2001, 4369: 547–558.
- [43] 陈喆, 庞玉林, 刘珊珊, 等. 一种程控实现任意行选的 红外焦平面读出电路 [J]. 激光与红外, 2010, 40(6): 673-678.
- [44] 李福巍,张运强.积分时间对红外焦平面成像系统 的影响 [J]. 应用光学, 2008, 29(5): 727-730.
- [45] 吴宗凡,柳美琳,张绍举,等. 红外与微光技术[M].北京:国防工业出版社, 1998.
- [46] Naseem Y Aziz, Robert F Cannata, Glenn T Kincaid, et al. Standardized High Performance 640 by 512 Readout Integrated Circuit for Infrared Applications [C]. SPIE, 1999, **3698**: 766–777.
- [47] 杨彪, 颜夕宏. 红外焦平面阵列 ROIC 设计 [J]. 半 导体光电, 2005, 26(3): 88-90.
- [48] Tchagaspanian M, Villard P, Dupont B, et al. Design of ADC in 25 μm Pixels Pitch Dedicated for IRFPA Image Processing at LETI [C]. 2007, SPIE, 6542: 65421W.
- [49] Sylvette Bisotto, Eric de Borniol, Laurent Mollard, et al. A 25 μm Pitch LWIR Staring Focal Plane Array with Pixel-level 15-bit ADC ROIC Achieving 2 mK NETD [C]. SPIE, 2010, **7834**: 78340J.
- [50] Matthew G Brown, Justin Baker, Curtis Colonero, et al. Digital-pixel Focal Plane Array Development [C]. SPIE, 2010, **7608**: 76082H.
- [51] Brian Tyrrell, Robert Berger, Curtis Colonero, et al. Design Approaches for Digitally Dominated Active Pixel Sensors: Leveraging Moore's Law Scaling in Focal Plane Readout Design [C]. SPIE, 2008, 6900: 69000W.