

文章编号: 1672-8785(2018)02-0021-07

320×256 二类超晶格探测器 驱动电路的设计

刘文浩^{1,2,3} 董 峰^{1,2}

(1. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为了验证二类超晶格红外探测器的性能, 设计了探测器的驱动电路。因红外探测器的灵敏度高, 设计了低噪声电源偏置电路, 优化了电路板的布局。结合 320×256 长波红外焦平面组件特点设计的驱动电路为探测器组件提供电源与偏置电压、时序与控制信号。实验结果表明, 该驱动电路能基本满足二类超晶格红外成像系统低噪声、高精度的要求。

关键词: 红外探测器; 偏置电压; 驱动时序; 二类超晶格

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.02.004

Design of Driving Circuits for 320×256 Type II Superlattice Infrared Detector

LIU Wen-hao^{1,2,3}, DONG Feng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To verify the performance of a type II superlattice infrared detector, a driving circuit is designed for the detector. Because the infrared detector has high sensitivity, a low noise power supply bias circuit which can optimize the layout of the circuit board is designed. The driving circuit designed according to the characteristics of a 320×256 long wave infrared focal plane array is used to provide power and bias voltages and timing and control signals for the detector assembly. The experimental results show that this driving circuit can meet the lower noise and high precision requirements of the type II superlattice infrared imaging system.

Key words: infrared detector; bias voltages; driving timing; type II superlattice

收稿日期: 2018-01-18

作者简介: 刘文浩(1992-), 女, 湖南华容人, 硕士生, 主要研究方向为红外图像采集系统的设计。

E-mail: liuwenhao2015@126.com

0 引言

长波红外成像系统在国防、医疗以及民用等领域有着越来越广泛的应用。二类超晶格探测器材料的均匀性和造价都优于碲镉汞探测器,在中长波红外波段的性能相当,在甚长波波段二类超晶格探测器有较大优势。二类超晶格探测器比量子阱探测器的量子效率高,性能远高于量子阱探测器^[1]。在满足系统性能指标的条件下,二类超晶格探测器对系统的制冷要求大大降低,功耗大大减小,同时能显著提高系统的可靠性^[2]。二类超晶格材料因量子效率高,缩短了焦平面探测器的积分时间,使其响应速度变快,暗电流变小,俄歇复合及有关的暗电流降低;焦平面的工作温度高,能带间隙可调,响应波长从 $3\ \mu\text{m}$ 到 $30\ \mu\text{m}$ 可调^[3-4]。因为这些特点,二类超晶格材料被普遍认为是第三代红外焦平面阵列的首选材料^[5],在红外探测器领域引起了广泛关注,在高性能制冷型红外探测器领域具有重要应用。

二类超晶格探测器在国际上发展迅速,在国内还处于起步阶段^[6]。2013年,中科院上海技术物理研究所研制出了我国第一个高性能超晶格长波红外焦平面,并在2016年封装成探测器组件,面阵规模为 320×256 ^[7]。二类超晶格探测器的驱动电路直接关系到成像系统的成像质量,从而对红外探测器的探测性能起决定作用^[8]。本文采用的二类超晶格探测器的功耗低,噪声等效温差小于 $30\ \text{mK}$,工作电源电流小于 $10\ \text{mA}$ 。因为对电源噪声的要求高,设计高精度、低噪声的电路是很有必要的。本文主要介绍二类超晶格红外探测器驱动电路硬件及软件的设计。

1 探测器的工作原理

文中采用的二类超晶格探测器为 320×256 面阵结构,工作波段为 $8 \sim 12.5\ \mu\text{m}$,光敏元的面积为 $27\ \mu\text{m} \times 27\ \mu\text{m}$, $77\ \text{K}$ 时此焦平面的 100% 截止波长为 $12\ \mu\text{m}$,峰值探测率为 $8.41 \times 10^9\ \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \text{W}^{-1}$,盲元率为 2.6% ,非均匀性为 6.2% 。使用温度为 $20 \sim 35\ ^\circ\text{C}$ 的黑体作为参考源,积分时间为 $150\ \mu\text{s}$ 时探测器噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) 为 $30\ \text{mK}$ 。该探测器的主要性能参数见表 1。

表 1 320×256 二类超晶格探测器的性能参数

黑体响应率 (V/W)	响应不均匀性	响应灵敏度 (mV/K)	黑体探测率 ($\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$)	NETD (mK)	平均噪声 (mV)
$9.19\text{E}+07$	9.10%	31.9	$1.73\text{E}+10$	30.3	0.95

该探测器支持边积分边读出工作模式 (Integrate While Readout, IWR) 和先积分后读出工作模式 (Integrate Then Readout, ITR)。可支持 1 路、2 路以及 4 路有效像元输出。本探测器电路选择先积分后读出模式的 1 路有效像元输出。探测器的驱动时序要求如图 1 所示。

2 探测器的驱动硬件设计

模拟电源 VPOS 和数字电源 VPD 分别由 ADP7102 芯片提供。ADP7102 是 ADI 公司生产的一款 CMOS、低压差线性调节器,其输出噪声电压为 $15\ \mu\text{V}_{\text{rms}}$ 。在 ADP7102 芯片输入端连接 $1\ \mu\text{F}$ 的旁路电容可降低电路对 PCB 布局的敏感度。电源电压产生电路如图 2 所示。

偏置电压 VREF、VOUTREF、IMSTR_ADJ、VDET_ADJ、VDETCOM 由超低噪声、

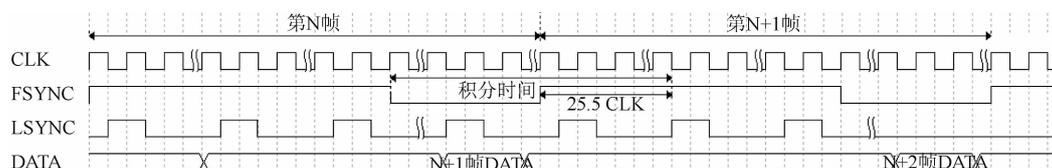


图 1 驱动电路的时序要求

高精度和低温漂性质的 ADR445B 芯片提供。ADI 公司的 ADR44X 系列基准电压源芯片的电压非线性度随温度变化会大大降低, 因此偏置电源利用 XFET 系列基础电压源, ADR445B 为驱动电路提供 5 V 的基准电压, 在芯片输出端用不同大小的电阻分压, 得到符合要求的电流值以及合适的偏置电压输出, 在输入和输出端分别采用 0.1 μF 电容和 10 μF 电容并联, 以稳定电路的工作性能, 提高线路电压的瞬态特性。偏置电压的产生电路如图 3 所示。

ADP7102 芯片和 ADR445 芯片的主要参数见表 2。

二类超晶格探测器正常工作需要合适的电源电压和偏置电压。其对电源及偏置电压的要求见表 3。

表 2 ADP7102 和 ADR445 芯片的主要参数

器件名称	温漂系数	噪声 ($\mu\text{V rms}$)	输出电流 (mA)
ADP7102	—	30@f=10~100 kHz	300
ADR445	3ppm/ $^{\circ}\text{C}$	2.25@f=0.1~10Hz	10

用 Cadence 设计驱动电路的原理图, 再到 PCB 板布局布线。探测器的驱动电路 PCB 板共设置了四层, 其中一层为接地层, 一层为电源层, 两层为信号层。设计时为各层信号提供了最短回流路径以防止各层信号相互串扰。布线时尽量减少了回路的面积, 以降低感应噪声; 并适当加宽了电源线 and 地线, 以减小电压和降低耦合噪声。驱动电路板的实物图如图 4 所示。

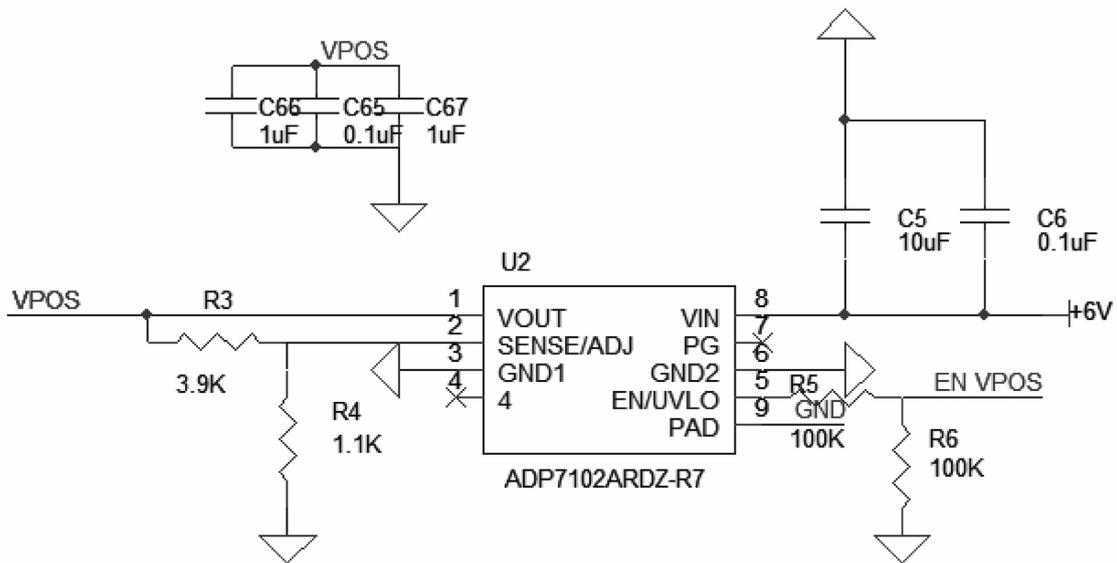


图 2 电源电压产生电路

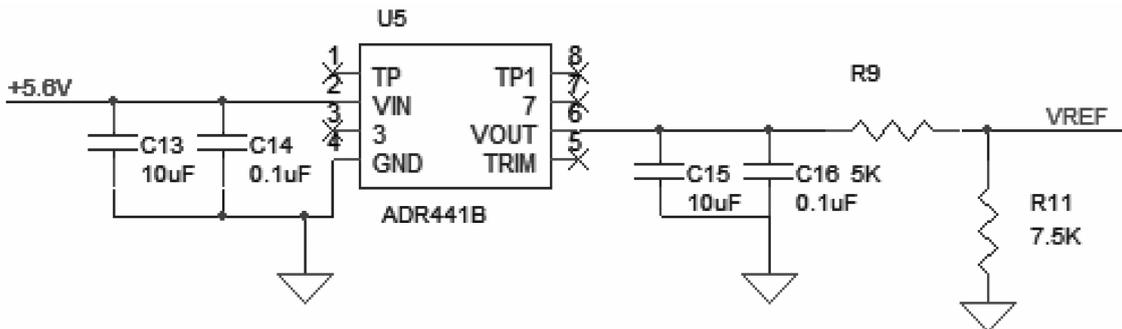


图 3 偏置电压产生电路

表 3 320×256 二类超晶格探测器对电源和偏置电压的要求值

名称	要求电压值 (V)	最大电流 (mA)
VPOS	5.5	10
VNEG	0	10
VPOSOUT	5.5	15
VNEGOUT	0	15
VPD	5.5	1
VND	0	1
VREF	1.4~2.6	1
VOUTREF	1~2	1
IMSTR_ADJ	2~5	1
VDET_ADJ	4.80~5.00	1

表 4 320×256 二类超晶格探测器的驱动信号电平要求值

名称	要求值		最大上升/下降时间(ns)
	低电平(V)	高电平(V)	
CLK	0	5	20
FSYNC	0	5	20
LSYNC	0	5	20
DATA	0	5	20

3 探测器驱动软件的设计

为了使 320×256 二类超晶格探测器正常工作还需要合适的驱动脉冲电平。本文采用 Altera 公司的 EP3C55U484C6 芯片提供探测器时序驱动信号。该芯片提供的输出电压仅为 3.3 V, 因此选用 SN74LVC4245APWR 芯片进行电平转换。TI 公司的 SN74LVC4245A 芯片能将 3.3 V 输入电压转换为 5 V 输出电压, 且该芯片电平的理论上升和下降时间不高于 2.5 ns。

帧同步信号 FSYNC 和串行控制指令 DATA 的跳变发生在 CLK 上升沿, 行同步信号 LSYNC 的跳变发生在 CLK 下降沿。LSYNC 的时间周期为 35.6 μ s, 一行内第 3.5CLK 对应第一个有效像元输出, 每 0.5CLK 对应 1 个像元。对于 1 路输出的 320×256 器件, 一行中有效像元为 160CLK, 一行周期为 176CLK。FSYNC 的时间周期为 45.4 ms, 采用先积分后读出模式, 积分开始时间为 FSYNC 下降沿, 积分结束时间为 FSYNC 上升沿后第 25.5CLK。本文中实际积分时间为 150 μ s, 在线编程控制可调节积分时间。DATA 控制字为 2 组 32 位数据, 分别为窗口控制、工作模式、增益等命令控制, 每组 32 位指令连续输入。

在第一帧 FSYNC 开始之前送命令控制指

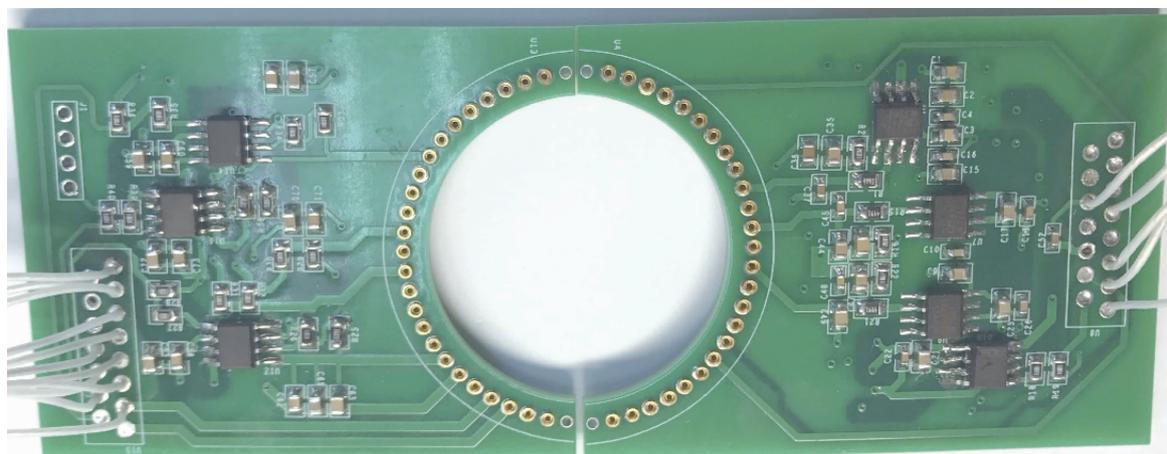


图 4 二类超晶格探测器的驱动电路板



图 5 驱动时序仿真结果

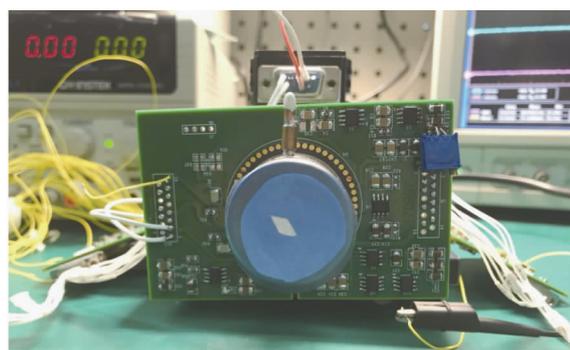
令, 在第二帧 FSYNC 开始之前送窗口控制指令, DATA 字节在下一帧 FSYNC 的上升沿后第四个 CLK 下降沿锁存。DATA 启动标志为 1 时有效, 在 FSYNC 上升沿的 32 个 CLK 之前输入被锁存, 每个字节的指令在 CLK 下降沿被采用。

时序逻辑设计采用 FPGA 实现, 在 Quartus 平台上, 基于 VHDL 语言编程实现了探测器驱动时序的设计, ModelSim 仿真结果如图 5 所示。第一行是 1MHz 主时钟信号, 周期为 1000 ns, 第二行代表 DATA 窗口与控制指令信号, 第三行是 FSYNC 帧同步信号, 第四行是 LSYNC 行同步信号, 第五行为程序内部复位信号: 低电平复位、高电平使能。

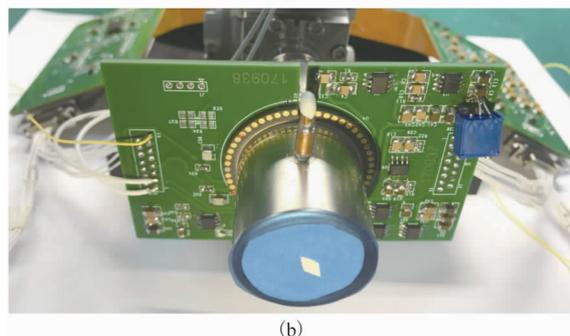
在设计探测器驱动时, 电源以及偏置的上电顺序由使能信号控制。编写上电顺序控制程序, 将上电顺序使能信号输入 ADP7102 芯片的使能端口。依次对电源以及偏置电压上电, 再提供探测器的脉冲驱动信号。

4 探测器驱动电路的测试结果

为验证驱动电路的性能, 所用的实验平台如图 6 所示, 它由稳压电源、驱动电路



(a)



(b)

图 6 探测器驱动电路的实验平台

板、二类超晶格探测器杜瓦组件和示波器等组成。

利用上述电压产生电路, 结合电源电压与偏置电压不同的电压要求以及最大电流限制, 驱动电路板提供的数字电源、模拟电源、偏置电压等各个输出电压接口处的实测值见表 5。电压实测值符合设计要求。

探测器的驱动脉冲电平要求低电平不高于 0.5 V、高电平不低于 4.8 V。驱动信号电压实测值见表 6, 主时钟 CLK 频率为 5 MHz, 电平上升时间为 2.15 ns, 下降时间为 2.10 ns, 符合设计要求。

用示波器采集了不同时间轴下的数据。图 7 为程序写入 FPGA 后瞬时触发四个模拟通道捕捉的驱动时序信号, 通道 1 代表主时钟 CLK, 实测周期为 1000 ns; 通道 2 代表帧同步信号 FSYNC, 周期为 45.6 ms; 通道 3 代表

表 5 320×256 二类超晶格探测器的电源和偏置电压实测值

名称	实测空载电压值(V)
VPOS	5.51
VNEG	0
VPOSOUT	5.52
VNEGOUT	0
VPD	5.51
VND	0
VREF	1.60
VOUTREF	1.60
IMSTR_ADJ	3.60
VDET_ADJ	4.95

表 6 320×256 二类超晶格探测器的驱动信号电平实测值

名称	实际测量值	
	低电平(V)	高电平(V)
CLK	0	5.01
FSYNC	0.0	5.01
LSYNC	0.05	5.02
DATA	0.05	5.01

行同步信号 LSYNC, 实测周期为 $178 \mu\text{s}$; 通道 4 代表串行控制指令 DATA, 在 FSYNC 下一帧上升沿之前传输至探测器。

为验证探测器的响应性能, 对特定热源进行了成像。探测器工作在 1 路模拟输出模式, 与探测器驱动时序中帧周期保持同步。图 8(a) 为室温(温度为 20°C)一行像素的模拟输出信号, 模拟信号电压均值为 3.34 V , 图 8(b) 为对特定热源(温度为 350°C)成像的同一行模拟

信号输出, 电压均值为 3.81 V 。由对不同热源成像时的模拟输出信号的电压可知, 探测器对高温物体有较明显的响应, 证明探测器的驱动电路设计合理, 驱动电压和驱动时序符合要求, 能为后续图像采集系统的设计提供保障。

5 结论

本文针对二类超晶格红外探测器的特点设计的驱动电路能够提供稳定的低噪声偏置电压, 使成像系统具备较高的探测灵敏度。该驱

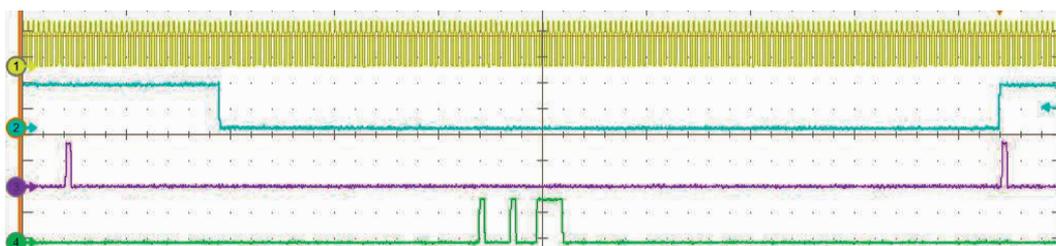


图 7 驱动时序的实测波形

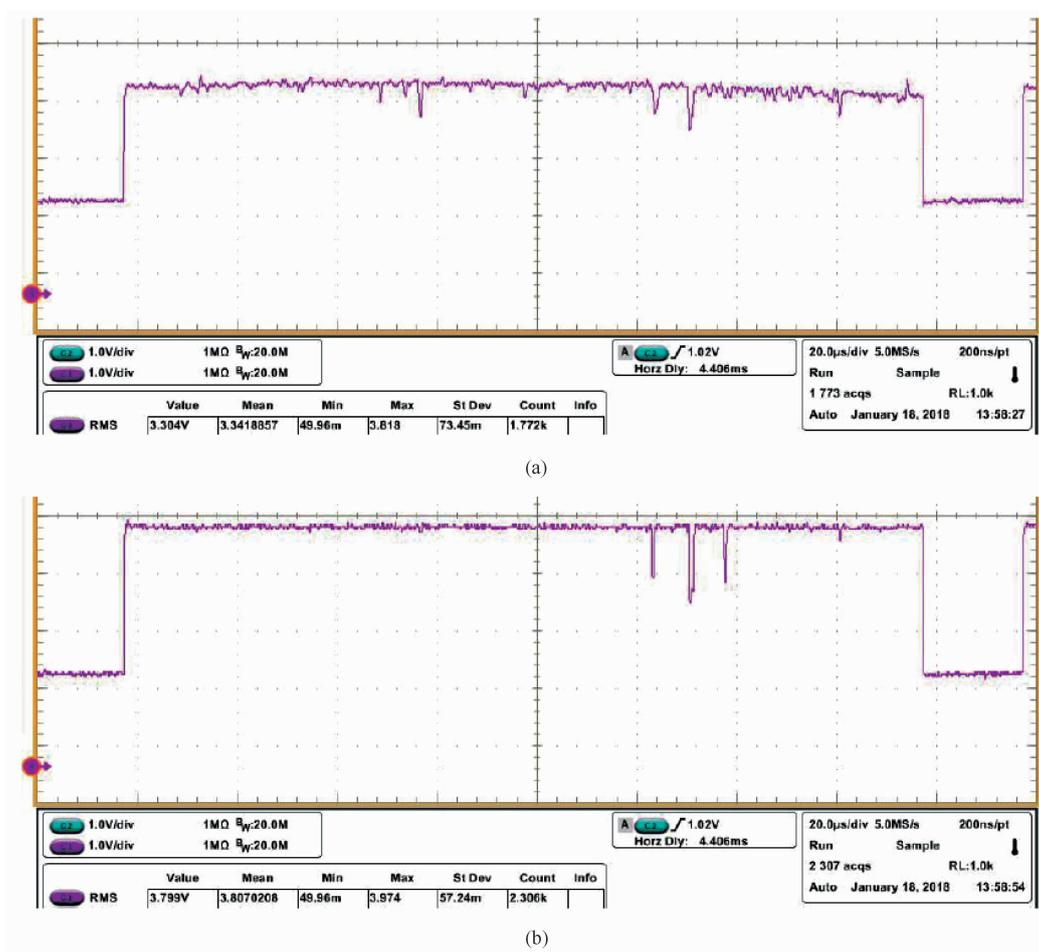


图 8 探测器的模拟信号输出波形

动电路能使本实验中的 320×256 二类超晶格红外探测器稳定工作, 实现了符合探测器性能的驱动控制。本文驱动电路的设计能为二类超晶格红外探测器的驱动电路设计提供参考。

参考文献

- [1] 马文全. InAs/GaSb 二类超晶格红外探测材料与器件 [R]. 第十六届全国晶体生长与材料学术会议, 2012.
- [2] 杨利鹏. GaSb 基 II 类超晶格双色红外探测器研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2014.
- [3] Smith D L, McGill T C, Schulman J N. Advantages of the HgTe-CdTe Superlattice As an Infrared Detector Material [J]. *Applied Physics Letters*, 1983, **43**(2): 180-182.
- [4] 史衍丽, 余连杰, 田亚芳. InAs/(In)GaSb II 类超晶格红外探测器研究现状 [J]. *红外技术*, 2007, **29**(11): 621-626.
- [5] 杨国政, 唐广. 非制冷红外焦平面阵列的非均匀性校正及其实现 [J]. *红外*, 2004, **25**(8): 1-5.
- [6] 徐志成. InAs/GaSb II 类超晶格探测器结构 MBE 生长研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2014.
- [7] 许佳佳, 陈建新, 周易, 等. 320×256 元 InAs/GaSb II 类超晶格长波红外焦平面探测器 [J]. *红外与毫米波学报*, 2014, **33**(6): 598-601.
- [8] 刘云芳, 李建伟, 李玉敏, 等. 640×512 InGaAs 探测器驱动电路设计 [J]. *红外技术*, 2012, **34**(3): 146-150.
- (上接第 7 页)
- [12] Johnson M R, Devillers R W, Thomson K A. A Generalized Sky-LOSA Method to Quantify Soot/black Carbon Emission Rates in Atmospheric Plumes of Gas Flares [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2013, **47**(9): 1017-1029.
- [13] Ditmore J D, Boley T M, Holm H, et al. IR Technology for Automatic Flare Steam Control [C]. Denver: American Fuel & Petrochemical Manufactures (AFPM) Environmental Conference, 2013.
- [14] Puri R, Santoro R J. The Oxidation of Soot and Carbon Monoxide in Hydrocarbon Diffusion Flames [J]. *Combustion & Flame*, 1994, **97**(2): 125-144.
- [15] 李家琨, 金伟其, 王霞, 等. 气体泄露红外成像检测技术发展综述 [J]. *红外技术*, 2014, **36**(7): 513-520.
- [16] 徐琼, 程晓舫, 袁宏永. 火灾烟雾光学探测技术原理的数学分析 [J]. *火灾科学*, 2002, **11**(4): 217-221.
- [17] 刘文清, 陈臻懿, 刘建国, 等. 环境污染与环境安全在线监测技术进展 [J]. *大气与环境光学学报*, 2015, **10**(2): 82-92.
- [18] 中国石油化工股份有限公司. 基于火炬视频实时测量火炬排放系统流量的方法: 102645246B [P]. 2014-04-23.
- [19] 刘璉. 石化火炬排放实时监测和分析管理系统的实施 [J]. *化工管理*, 2013, **12**(6): 36-38.
- [20] 王昶文, 刘振兴. 一种基于图像处理的火炬监测方法 [J]. *武汉科技大学学报*, 2014, **37**(3): 219-222.
- [21] 王昶文. 基于数字图像处理的工业火炬火焰监控系统的研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2014.