文章编号:1001-5078(2021)06-0683-12

·综述与评论·

# II 类超晶格红外探测器技术国内外进展

尚林涛,王静,邢伟荣,刘铭,申晨,周朋,赵建忠 (华北光电技术研究所,北京100015)

摘 要:简单归纳整理了德国、美国(CQD、JPL、QmagiQ、NRL、Teledyne 和 Raytheon)、瑞典 (IRnova)、以色列 SCD 和日本等国外主要机构的 II 类超晶格研究成果以及国内的发展现状。 美国 VISTA 计划的成功实施和技术突破进一步加速推动了 II 类超晶格红外探测技术从理论 走向现实。虽然目前及今后较长时间内 HgCdTe 技术仍然是主流,但是 II 类超晶格技术在整 体系统性能和成本上可以挑战 HgCdTe, II 类超晶格技术将在红外应用领域全方位替代 HgCdTe 技术的优势已经越来越清晰。与国外相比,国内 II 类超晶格技术的发展已经具有一 些技术基础,但距离产业化推广应用还有一定的差距,可以借鉴国外的先进理论和技术经验并 结合具体实际工艺逐步取得突破。

关键词:II 类超晶格;Type - II;T2SL;SLS;发展现状

中图分类号:TN215 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2021.06.001

## Advances in type-II superlattice infrared detector technology at home and abroad

SHANG Lin-tao, WANG Jing, XING Wei-rong, LIU Ming, SHEN Chen, ZHOU Peng, ZHAO Jian-zhong (North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract**: This paper briefly summarizes the research results of type-II superlattices from Germany, the United States (CQD, JPL, QmagiQ, NRL, Teledyne and Raytheon), Sweden (IRnova), Israel SCD and Japan, as well as the domestic development status. The successful implementation of the VISTA program in the United States and technological breakthroughs further accelerate the development of type-II superlattice infrared detection technology from theory to reality. Although HgCdTe technology is still the mainstream at present and for a long time to come, type-II superlattice technology in replacing HgCdTe in terms of overall system performance and cost. The advantages of type-II superlattice technology in replacing HgCdTe technology in the field of infrared application are becoming increasingly clear. Compared with foreign countries, domestic type-II superlattice technology development has some technical basis, but there is still a certain gap from the industrialization promotion and application, we can learn from foreign advanced theory and technical experience and combine with the specific practical process to gradually make breakthroughs. **Keywords**; class II superlattice; type-II; T2SL; SLS development status

1 引 言

Sb 基应力层超晶格(SLS)尤其是 II 类超晶格

(T2SL)材料在探测器、激光器、调制器上具有广泛的应用,尤其在红外探测领域具有极大的潜力和优

收稿日期:2020-06-26;修订日期:2020-08-05

势,普遍认为可以替代目前主流的 HgCdTe(MCT) 材料。相比 MCT 材料技术约60 年的漫长积累和发展,二类超晶格技术从20 世纪70 年代末提出至今 约40 年仍在持续快速发展。

目前,世界主要的研究机构如德国、美国西北大学 量子器件中心(CQD)、喷气推进实验室(JPL)、NRL、瑞 典(IRnova)、以色列 SCD 和日本等很多机构报道了 T2SL 材料、器件和焦平面阵列(FPA)的研究进展,国内 也积极开展了全面的研究。本文简单归纳总结了国内 外 T2SL 红外焦平面探测器技术的发展状况。

### 2 国外超晶格探测器的发展

#### 2.1 德 国

德国 Fraunhofer IAF 从 1990 年开始开发 Sb 基 SL。2003年开始了高性能二维 FPA 阵列工艺开发。 2004 年,与工业伙伴 AIM Infrarot-Module Gmb 合作 开发出了当时世界上第一个高性能国内第一代256 ×256@40 µm MWIR 超晶格成像仪,将超晶格周期 从190 增加到370 后 QE 加倍,获得卓越的93 K BLIP 成像;降低像元中心距开发了国内第二代 384 ×288@24 µm; GaSb 衬底从 2"拓展到 3", 开发了 640×512@24 μm;2005 年开始开发双光谱(双色) InAs/GaSb SL FPAs,开发出第三代 384 × 288 × 2@ 40 µm 和 384 × 288 × 2@ 24 µm, 可同时探测 3~ 4 μm(蓝)和4~5 μm(红)两个通道的中波双色超 晶格。接下来几年,连续工艺改进(包括双色三 In 柱电极发展到 30 μm 和 24 μm 的二 In 柱电极技 术)以及降低缺陷,双光谱 FPAs 制备技术成熟,光 电性能连续增加,平均 NEDT 达到 9.1 mK(红)和 15.9 mK(蓝),被 EADS 选择集成到大型军用运输 机 A400M 的导弹防御(MAW)系统。IAF 现在已成 为国家级 InAs/GaSb II 类超晶格探测器制造工 厂<sup>[1]</sup>。拥有技术准备水平 8 级(TRL8)的单晶圆和 5×3"(2"在中间)多晶圆 MBE 生长系统<sup>[1-2]</sup>。建立 了一套完整的设计建模、外延生长、前道和后道工艺 制造链。拥有相衬干涉仪、自动光学缺陷检测工具 (KLA-Tencor Surfscan 6220)、白 光 拓 扑 仪 (SWBXRT)等设备自动检测和追踪衬底和外延材料 缺陷,位错密度低至 1×10<sup>5</sup> cm<sup>-2</sup>;高精度自动步进 光刻机、均匀 ICP 刻蚀工艺可以重复制备高占空比 的阵列。半自动晶圆低温探针台 Cascade Microtech PAC200 系统、PL、C - V 测试系统<sup>[3]</sup>快速完成器件 电/光性能表征<sup>[4]</sup>。

在同质结基础上采用改良的四分量超晶格经验 赝势计算方法(SEPM)优化设计(考虑 InSb 界面和 As 在 GaSb 和 InSb 中的引入)了异质结 LWIR 探测 器,GR 暗电流达~ $10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup>;在中波双色探测器上 也采用异质结,5 µm 附近暗电流密度低至 2×10<sup>-9</sup> A/cm<sup>2[5]</sup>。成功展示了欧洲第一个截止波长 10.3 µm 640 × 512 @ 15um 的 LWIR InAs/GaSb T2SL<sup>[3,6]</sup>, 55 K,F/2,NEDT < 30 mK,拍摄到 Fraunhofer IAF 的 建筑物图像,进一步改进暗电流可以提升工作温度和 使光电性能到 300 K 背景 BLIP 的成像<sup>[5]</sup>。

在德国防务部(MoD)资助下持续开展 T2SL 研 发。开发了热电制冷(TEC)或室温工作(200~ 300K)的单元器件和高性能 FPA<sup>[4]</sup>。在 GaAs(211) B 衬底上异质外延 T2SL 并制备成 FPA<sup>[6]</sup>,获得高响 应和均匀噪声的 210 K、10.5  $\mu$ m GaAs 基 HOT T2SL 二极管<sup>[7]</sup>,平均  $D^* = 3.3 \times 10^8$  Jones,并用 TEC 制冷 集成到波兰的 VIGO System。表 1 和图 1 列出德国 近些年来二类超晶格主要发展成果。

时间	规模	中心距 /μm	波长 /µm	NEDT /mK	积分时间 /ms	QE /%	$\frac{R_0 A}{/(\Omega \cdot cm^2)}$	工作温度 /K	F数	备注
2004	256×256(第一代)	40	5.3	10	6.5	30	$4 \times 10^{5}$	77	F/2	缺陷像元3%~4%,提高到<1%
2005	384×288(第二代)	24	4.9	14	4			77	F/2.4	缺陷像元 0.58 %
2006	384×288×2(第三代)	40		<23(蓝), <12(红)	2.8				F/2	3 in,可操作性 99.5 %
2009	640 × 512	24	~ 5					77		3 in
2012	384 × 288 × 2	24	~ 5	14.6(蓝), 9(红)	2.5					3 in,半阱填充
2015	640 × 512	15	10.3	< 30					F/2	

表 1 德国二类超晶格发展概况表 Tab. 1 Development overview of type-II superlattices in Germany



图 1 德国主要的 SL 器件和成像结果 Fig. 1 Major SL devices and imaging results in Germany

2.2 美国西北大学 CQD

美国西北大学量子器件中心 CQD 的 Manijeh Razeghi 团队在超晶格开发方面起步较早也一直居 世界领先地位<sup>[8-10]</sup>,在超晶格理论设计<sup>[9,11]</sup>、器件 工艺、组件制备和成像等各个方面有着坚实的理论 基础和丰富的实践经验,取得了显著的发展成果。 表 2 列出了 CQD 近 20 年来在 GaAs 基 SL、短波、 中波、长波、甚长波、双带/三带等 SL 发展方面取 得的成果(FPA 为主),图2列出具有代表性的阵 列成像。CQD 在长波和甚长波方面研究的最早也 最多,最早于2003年展示了8 µm的256×256,最 有代表性的 LWIR 面阵成果是波长 11 μm 的  $p\pi$ Mn 结构的 1k×1k,经过优化后达到了出色的性 能,去除 GaSb 衬底并涂抗反射涂层后 QE 可以达 到 89 %;最大面阵是 1280 × 1024@ 12 µm、150 K 截止波长约 2.22 µm 的近短波红外 FPA<sup>[12]</sup>;2014 开始展示了基于 InAs/InAsSb SL 的长波、甚长波 和双带探测器<sup>[8,13]</sup>;基于功能强大设计灵活的 M 结构设计展示了在单个 FPA 像元上通过偏压选择 实现双带集成探测的各种类型的双带 FPAs,包括 SW/MW、MW/LW 和 LW1/LW2 阵列<sup>[13]</sup>,也设计了 基于 T2SL 的两终端三带集成探测的 SWIR/ MWIR/LWIR 和 150 K 工作的 e - SWIR/SWIR/ MWIR 光电探测器,根据偏压幅度的改变可以连续 地选择三个单色通道分别进行探测。

表 2 美国西北大学 CQD 二类超晶格发展概况表 Tab. 2 Development overview of type-II superlattices in CQD of Northwestern University

	GaAs 基 SL											
时间	规模	结构	波长 ∕µm	NEDT ∕mK	探测率/ (cm・Hz <sup>1/2</sup> ・W <sup>-1</sup> )	QE /%	响应率/ (A・W <sup>-1</sup> )	$\frac{R_0 A}{/(\Omega \cdot \mathrm{cm}^2)}$	工作温度 /K	暗电流 /(A・cm <sup>-2</sup> )	备注	
2009	320 × 256	М	4	10		> 50		67				
2009	320 × 256	М	11	53	$1.1 \times 10^{11}$			35	67			
SWIR												
时间	规模	结构	波长 ∕µm	NEDT ∕mK	探测率/ (cm・Hz <sup>1/2</sup> ・W <sup>-1</sup> )	QE /%	响应率/ (A・W <sup>-1</sup> )	$\frac{R_0 A}{/(\Omega \cdot \mathrm{cm}^2)}$	工作温度 /K	暗电流 /(A・cm <sup>-2</sup> )	备注	
2019	320 × 256	pin	2.1			56	0.82	132979	150	4.7×10 <sup>-7</sup>		
2019	320 × 256	nBn	2.3		$2.85\times10^{12}$	59.7	0.68		150	8.75 × 10 <sup>-8</sup>		
2019	$1280 \times 1024$	nBn	– 2. 22 µm		$1.01\times10^{11}$	54.3	0.7		150	1.63 × 10 <sup>-7</sup>	e-SWIR,@12µm	
						MWII	3					
时间	规模	结构	波长 ∕µm	NEDT ∕mK	探测率/ (cm・Hz <sup>1/2</sup> ・W <sup>-1</sup> )	QE /%	响应率/ (A・W <sup>-1</sup> )	$\frac{R_0 A}{/(\Omega\cdot\mathrm{cm}^2)}$	工作温度 /K	暗电流 /(A・cm <sup>-2</sup> )	备注	
2010	320 × 256	pin	4.2	10	$3 \times 10^{13}$	> 50		10 <sup>6</sup>	150	F/2.3,@30µm		
2011	320 × 256	М	4.2	9	$1.05\times10^{12}$	50		5100	120		F/2.3	
2015	320 × 256	рМр	4.9	11	$1.5 \times 10^{14}$	67			150	1.2×10 <sup>-5</sup>	@ 27	

## 续表2 美国西北大学 CQD 二类超晶格发展概况表

## Tab. 2 Development overview of type-II superlattices in CQD of Northwestern University

										LWIR												
时间	ŧ	规模	结	构	皮长 ´µm	NEDT ∕mK	探测率/ (cm・Hz <sup>1/2</sup> ・W <sup>-1</sup> )	Q /'	)Е %	响 <u>应</u> 率/ (A・W <sup>-1</sup>	) /	$R_0 A$ ( $\Omega \cdot \mathrm{cm}$	<sup>2</sup> )	工作温 /K	度	暗电流 /(A・cm <sup>-2</sup> )		备注				
2003	256	6×256	pi	n	8	0.1~0.3	2~3×10 <sup>11</sup>	5	0	2~3		385		77				@30 μm				
2006	320	)×256	N	1	12		$2 \times 10^{11}$	40 -	~ 50			33					第一个 M	结构 FPA,20 a	ircsec			
2008	320	)×256	N	1	11	26		5	i6			15.9		81			@ 30	μm,95 %,F/2				
2009	320	)×256	N	1 9	9.6	23		4	2			270		77		$2.5 \times 10^{-5}$		@30 μm				
2009	320	)×256	N	1	10	23				8		81			@:	@30 μm,98 %						
2010	1 1	x×1 k	N	1	11	23.6	$6 \times 10^{11}$	>	45			100				$1 \times 10^{-4}$	3 in,9	15.8 %@18 μn	n			
	VLWIR																					
							波长		NED	探测率/			响应率	×./	$R_0A$	/	工作	温度	暗电流			
时间	1 1	规模	结	构	/μm	∕mK	$(\mathrm{cm} \cdot \mathrm{Hz}^{1/2} \cdot \mathrm{W}^{-1})$	·1)	QE/%	$(\mathbf{A} \cdot \mathbf{W})$	-1)	$(\Omega \cdot \mathrm{cm}^{-2})$		/	K	$/(\mathbf{A} \cdot \mathbf{cm}^{-2})$		备注				
2001	1	单元	pi	n	22		$3.5 \times 10^{10}$		50	5.5				8	0	200 ns,3 in(50 K	)					
2002	1	单元	pi	n	>18		$4.5 \times 10^{10}$		3					44 a	rcsec							
2002	1	单元	pi	n	18.8		$4.5 \times 10^{10}$		41.4			4		8	0		0.4	ns, <45 arcsec	e			
2005	1	单元	pi	n	>25		$1.05 \times 10^{10}$		24.5	3				50 -	~65			接近 32 μm				
2008	1	单元	N	1	14.58		$3.11 \times 10^{10}$		>20					7	7	$4.95 \times 10^{-3}$						
2010	1	单元	pN	ſр	14		$4 \times 10^{10}$		5	1.4		18		7	7	$3.3 \times 10^{-3}$	1.9 μr	n nid,低于 Rul	e 07			
2009	1	单元	N	1	14.3		$4 \times 10^{10}$		37	2.1				7	7		等效	女于最好的 MC	Т			
2013	L	单元	N	1	14	27						600	00 8		1	$3.5 \times 10^{-5}$						
2014	J	单元	nB	Bn	14.6		$1.4 \times 10^{10}$		46	4.8	4.8			7	7	0.7						
										双带												
时间	规	模	结 构	波t /μ	夭 m	NEDT /mK	探测率/ ( cm • Hz <sup>1/2</sup> • ₩ <sup>-1</sup>	)	Q	DE/%	响) (A・	应率∕ • ₩ <sup>-1</sup> )	$R_0$	A∕ cm <sup>-2</sup> )	工作ă /K	追度 暗电液 (A・cn	ћ∕ 1 <sup>-2</sup> )	备注				
2012	256	×320	М	9.5/	13 1	19.5/20.8	$5 \times 10^{11}/1 \times 10^{11}$								77							
2012	640	×512	М	9.5/	13		5.05 × 10 <sup>11</sup> /1.02 × 1	011								4.7×10 <sup>-5</sup> /6	$.5 \times 10^{-4}$	@30 μm	ı			
2012	320	×256	М	5.2/1	1.2	10	$7 \times 10^{12}$		40 ~	55/ <10			60	00	110	0.1p	A	选择比:17	%			
2013	320	×256	М	2/4.	. 2	14.17			3	39/30					81	1 × 10	-5	@27 μm,99.1	14 %			
2014	640	×512	М	2.2/	/5	18.6			3	39/25					81			98.4 %				
										三带												
时间	规模	结构	波 /	友长 µm	NED /mK	ſ (cm	探测率/ ・Hz <sup>1/2</sup> ・W <sup>-1</sup> )	QE/	/%	响应率/ (A・W <sup>-1</sup> ) (f		R ( $\Omega$ ·	$R_0A/$ • cm <sup>-2</sup> )		工作湛 /K	] [ [ [ [] ] [] ] [] ] ] [] ] [] ] []	暗电流 ∕(A・cm <sup>-2</sup>		备 注			
2016	单元	М	2/4	. 5/9		3 × 10	$13/1 \times 10^{11}/2 \times 10^{10}$	40/	19						77	1 × 10 <sup>-9</sup> /2	2.1×10 <sup>-4</sup>	/7.6×10 <sup>-3</sup>				
2017	单元	М	2.3/	2.9/4		$1 \times 10^{11}$	$/6.3 \times 10^{11}/2 \times 10^{11}$	22/20	)/34		$2 \times 10^{5}/2$	$\times 10^{6}$	/1232	77	$5.5 \times 10^{-8}$	1.8×10 <sup>-1</sup>	$6/8.7 \times 10^{-5}$					



图 2 美国西北大学 CQD 的 SL FPA 发展主要成果 Fig. 2 Main achievements of SL FPA development of CQD at Northwestern University

## 2.3 美国 JPL

美国喷气推进实验室(JPL)自90年代早期以来 一直在积极开发III-V族红外探测器用于远程传感 和成像应用。其主要发展成果如表3和图3所示。

在单元器件基础上开发了 pin 型波长 3.7 μm 的 1k×1k MWIR 和 12 μm 的 256×256 SL。2009 年,在 FastFPA 项目下 JPL 提出并成功展示了一个 新的基于 CBIRD 结构的 T2SL LWIR 探测器,与 RVS 合作制备了 9.9 μm 的器件,80 K 暗电流低至 2.4×10<sup>-5</sup> A/cm<sup>2</sup>,  $RA_{eff} = 670 \Omega \cdot cm^{-2}$ ,  $RA_{eff}$ 靠近 MCT 的 Rule07,其中无 AR 或钝化的 200×200 μm<sup>2</sup> 和 220×220 μm<sup>2</sup> 单元<sup>[14]</sup>的暗电流密度小于 1× 10<sup>-5</sup> A/cm<sup>2</sup>( $V_b = 0.18$  V),并且展示了波长 9 μm 256×256 和 8.8 μm<sup>[14]</sup>、10 μm 的 320×256,10 μm 和 11.5 μm 的 1k×1k CBIRD FPA,由于其均匀稳定、

					•		•				
时间	规模	结构	中心距 ⁄μm	波长 /μm	NEDT ∕mK	探测率/ (cm・Hz <sup>1/2</sup> /W)	QE ∕%	$\frac{R_0 A}{/(\Omega \cdot \mathrm{cm}^2)}$	工作温度 /K	暗电流 /(A・cm <sup>-2</sup> )	备注
2009	1k×1k	pin		3.7		$8 \times 10^{13}$	40	$3 \times 10^{7}$			室温近 60 %
2009	$256 \times 256$	pin		10.5		$8 \times 10^{10}$	30	6.3	80		
2010	$1k \times 1k$	CBIRD		10		$1.1 \times 10^{11}$	32	14000	77		
2010	$256 \times 256$	CBIRD	30	9					78		98.9 %
2012	$320 \times 256$	CBIRD	30	8.8	18.6	$1.3 \times 10^{11}$	54		78	$2.2 \times 10^{-4}$	81 % 占空比
2012	$320 \times 256$	CBIRD	15	10	26				80	1 × 10 <sup>-5</sup>	
2012	$1 \text{k} \times 1 \text{k}$	CBIRD	19.5	11.5	53		21		80		96.3 %
2016	$640 \times 512$	BIRD	24	5.4	18.7		52		150	4.5×10 <sup>-5</sup>	InAs/InAsSb
2019	$640 \times 512$	BIRD	24	12.5	16.3				62	2.6×10 <sup>-5</sup>	InAs/InAsSb

表 3 JPL 二类超晶格发展概况表 Tab. 3 Development overview of JPL type-II superlattices



图 3 JPL 的 SL FPA 发展主要成果 Fig. 3 Major achievements of SL FPA development at JPL

低暗电流增和高灵敏度的优点正在被星载超光谱热发射光谱仪(HyTES)采用来替代原来的 QWIP 探测器。

在室温 4.5 μm MWIR InAsSb nBn 探测器<sup>[14]</sup>基 础上开发了用于 ESTO InVEST 项目下(6U) CubeSat 红外大气探测(CIRAS)工程的关键技术:150 K 约 5.4 μm 的 HOT MWIR InAs/InAsSb BIRD T2SL<sup>[15]</sup>。 制备了 640×512@24 μm<sup>[16]</sup>,互连到 SBF193 ROIC 并发给 NASA 进行实验,可操作性 99.7 %, NEDT 没有明显的宽尾分布,显示了卓越的均匀性。 MWIR HOT-BIRD 结构在 2011 年初被引入到 VISTA 项目中,加速了 MWIR 探测器的研发进程。InAs/ InAsSb SL 可达到 InSb 同样截止波长但可工作于更 高温度以降低 SWaP,可用于航空等低背景应用,但 相比 MCT 仍具有高的 G-R 暗电流(由于更短的 SRH 寿命)<sup>[15-16]</sup>,基于 BIRD 结构研制了 12.5 μm、 640×512 的 LWIR, -50 mV、60K 下暗电流密度为 2.6×10<sup>-5</sup> A/cm<sup>2</sup>,在 ESTO SLI - T 项目下, LWIR T2SL BIRD FPA 也正在开发以满足未来热红外 (TIR)陆地成像的需求。

使用 ICP 干刻工艺获得近乎垂直、各向异性和 光滑的台面边墙 LWIR CBIRD 结构, ICP 工艺增加 了表面电阻,表面态密度降低 3.8 倍多,表面泄露降 低 7.4 倍,暗电流改进 2.5 倍,占空比改进 3.6 倍, QE 提高 2.3 倍。研究了 nBn 探测器的高温开启行 为并分析了低温下 SL 的暗电流;研究了 T2SL 材料 的质量和光学性能;表征了 LWIR SL 的势垒效应, 研究了 LWIR SL 的噪声(包括 1/f 噪声和增益)、辐 射、非辐射、SRH 和俄歇复合过程对少子寿命的影 响;研究了空穴有效质量和子带分裂以及 nBn 红外 探测器中载流子输运;研究了 LWIR CBIRD 结构的 抗辐射性能<sup>[17]</sup>,指出暗电流的改变是由于质子对靠 近器件台面边墙的位错损伤造成陷阱辅助隧穿而产 生表面泄露。

为适用于未来地球科学成像和小卫星任务,光谱 成像和探测应用的 LWIR FPAs 必须增加工作温度以 降低制冷需求。在 T2SL BIRD 探测器基础上采用共 振像元技术<sup>[18]</sup>(利用纳米光子陷阱技术增强吸收来 增加 QE 和降低暗电流)和高动态 3D – ROIC(提高有 效阱容量和延长积分时间)来提高信噪比和增加工作 温度,可以整体增加 60 K 以上的工作温度。

## 2.4 美国 QmagiQ

美国 QmagiQ 2010 年报道了截止波长~8.5 μm 的 320×256@ 30 μm InAs/GaSb SL<sup>[19]</sup>(图 4),77K 暗 电流密度~10<sup>-5</sup> A/cm<sup>2</sup>,QE >5%(2 μm 吸收层),像 元可操作性~96 %,NEDT~25 mK,F/4.0;2012 年展 示了 18 µm 像元中心距截止波长9.5 µm 的百万像元 1 k×1 k FPA,QE > 50 %,NEDT = 30 mK,77 K 暗电 流~2×10<sup>-4</sup> A/cm<sup>2</sup>,像元可操作性达96 %;展示了 68K 工作、11 µm 的 320×256;正在向12 µm 高产量 商业化 SLS FPA 迈进。



图 4 Qmagiq 的 T2SL 发展状况 Fig. 4 Development status of T2SL in Qmagiq

## 2.5 美国 NRL

NRL 和 Teledyne Imaging Sensors (TIS)合作 于 2010 年报道基于 HSL 和 GGW 结构的超晶格 制备了截止波长分别为 8.7 μm 和 11.1 μm 的 256×256@40 μm FPA(图 5(a),(b)),互连到 TCM200F n/p 直接注入型 ROIC, FPA 可操作性 99.5%(QE)和 99.2%(IV),工作温度分别为 78K 和 50K。

采用 SEMI 工艺(图 5(c)),小于 0.5 μm 的 浅刻蚀,窄带隙吸收层埋藏起来不受影响,显著 抑制了边墙泄露电流;相比深刻蚀,有效动力 学阻抗增大到两倍,边墙表面电阻率提升四 倍;可以产生 100 % 的占空比并且邻近像元不 会产生明显的串扰,展示了 SEMI 的优势。为分析 和抑制缺陷的形成,NRL 采用了 XSTM,HXRD,EBIC, FIB,TEM 和 EDS 等先进工具对缺陷进行分析。





图 5 NRL 的截止波长 8.7 µm 和 11.1 µm 的 256 × 256@ 40 µm FPA 及 SEMI 工艺 Fig. 5 FPA and SEMI processing of NRL at cut-off wavelengths of 8.7 µm and 11.1 µm 256 × 256@ 40 µm

## 2.6 美国 Teledyne

Teledyne 与 NRL 合作也于 2010 年报道了78 K截 止波长 9.4 µm 的 256 × 256@ 40 µm 的 FPA(图 6), QE ~40 %,暗电流 2 ~3 × 10<sup>-5</sup> A/cm<sup>2</sup>(135 mV),比最 好的 MCT 小 20 个因子;并制备了 78K 截止波长 9.3 µm的 1 k × 1 k,暗电流 ~ 2 × 10<sup>-5</sup> A/cm<sup>2</sup>, QE ~ 30 %;2018 年报道了直径 0.25 mm 和 1 mm 大单元 HOT MWIR InAs/InAsSb T2SL<sup>[20]</sup>,截止波长 ~5.5 µm,峰值响应率 2.47 A/W,峰值 QE = 72 % (4.24 µm),工作温度 295 K,峰值  $D^* = 1.9 \times 10^9$  Jones。



图 6 Teledyne 的截止波长 9.4 µm 的 256 × 256@ 40 µm FPA 和 HOT MWIR InAs/InAsSb 单元器件 Fig. 6 256 × 256@ 40 µm with cut-off wavelength of 9.4 µm FPA and HOT MWIR InAs/InAsSb cell devices at Teledyne

此外,Raytheon 与 JPL 合作,于 2006 年首次报 道了高质量截止波长 10.5 μm、78 K 工作的 256 × 256@30 μm LWIR FPA(图7)。

## 2.7 瑞典 IRnova

瑞典 IRnova 从 2014 年开始制造 InAs/GaSb MWIR T2SL。采用新颖的宽带隙势垒 DH 结构设计

(如图 8),极大地降低了 G-R 暗电流,在 2.4~ 12 μm(16 μm 是其未来发展计划)取得快速发展。 制备了第一代 MWIR 320×256@ 30 μm,成像质量 稳定,空间 NETD 为4 mK,温度 NETD 为12 mK,f/2 光学,8 ms 积分时间。第二代 640×512@15 μm 的 MWIR 正进入工业化阶段,温度和空间 NETD 分别 为25 mK 和10 mK,f/4,22 ms 积分时间,可操作性 99.85%<sup>[21]</sup>。第二代的 NETD 和操作性可比于 320×256,QE >55%,120 K 下暗电流密度 <3×10<sup>-6</sup> A/cm<sup>2</sup>。 采用 FLIR indigo 的 ISCO403 设计了新颖的杜瓦装 置 IDDCAs(和 QWIP 相同),相机展示了稳定的成 像质量、可操作性、响应均匀性、稳定性和 NETD <sup>[22]</sup>,NETD 近 似为 20 mK,积分时间 2~3 ms, 60 Hz。



图 7 Raytheon 的 78 K 工作 10.5 µm 截止波长的 256 × 256@ 30 µm LWIR FPA

Fig. 7 Raytheon's 78 K operating at a 10.5  $\mu$ m cutoff wavelength of 256 imes 256@30  $\mu$ m LWIR FPA

通过一整套模拟设计并结合标准 III - V 工艺设 计制备了 HOT 640 × 512 @ 15 µm,分别为 5.3 µm RED HOT(130 K)和4.2 µm 的 DEEP BLUE(150 K)。 5.3 µm RED HOT 的 QE = 80 %, F#4,110 K,展示了 卓越的成像性能,温度 NETD 为 21 mK,空间 NETD 为7 mK,10 ms 积分时间,可操作性 > 99.8 %,进一步 改进设计可工作于 130 K<sup>[23]</sup>。HOT SWaP IDDCA 使 用小的制冷器,小杜瓦, F/4 光学,尺寸为 48 mm × 44 mm × 98 mm,230 g,展示了卓越的性能,110 K 的 制冷时间为3 min,功耗 3.2 W。进一步优化, RED HOT 设计将达到 130 K,下一步将开展 DEEP BLUE 设计以进一步增加工作温度和降低制冷限制。

采用相似的 DH 结构开发了地球空间应用的 2.4 μm(77 K)低成本高质量 SWIR 探测器;研发了 MW 双色 T2SL 红外探测器;开发了截止波长 12.2 μm的 LWIR SL(3.2 μm 吸收区),80 K 下暗电 流仅2 倍高于 MCT Rule07,QE 超过 30 %,更厚吸 收区 QE 可达 60 %;正在开发高 QE 和低暗电流大 尺寸 16 μm 超晶格探测器以取代 MCT 用于天气预 报和大气预警等空间应用,从 12 μm 开始,单元探 测器暗电流仅比 80 K 的 Rule07 高 2 ~ 3 倍。下一 步将制备 14.5 μm 到 16.5 μm 的 FPA。另外,作为 EU 项目(MINERVA)的一部分,与 XeniCs(提供 ROICs)一起合作已开始开发高分辨率截止波长 5.3 μm(120 K)和 12 μm(100 K)的 1280 × 1024 MWIR 和 LWIR FPAs 用于医疗癌症诊断。



图 8 瑞典(IRnova)SL FPA 发展成果 Fig. 8 Development of Sweden(IRnova)'s SL FPA

### 2.8 以色列 SCD

以色列 SCD 研制了称为"Pelican-D LW"高性 能 640×512@15 um XBn/XBp 型势垒 T2SL FPA 探 测器(图 9)并建立了 T2SL 生产线。采用高 QE、接 近 MCT rule 07 的低扩散电流"XBp"结构,QE = 50%,波长 9.5  $\mu$ m,77 K,具有高的可操作性和 BLIP 的性能及良好的稳定性。定制的 n-on-p 极性 D-ROIC 遵循成熟的 MWIR Pelican D-ROIC 和 IDCA 配置,新的 640 × 512@15  $\mu$ m 数字 ROIC 具有卓越 的读出噪声、RNU、功耗、帧速和良好的均匀性。 77 K平均暗电流为4.4 × 10<sup>-5</sup> A/cm<sup>2</sup>,比光电流小15 倍,比标准 n-on-p LWIR 二极管(0.1 V 偏压) 暗电 流小 20 倍,10 倍于 Rule07。RNU 小于 0.02 %,可 以维持几小时稳定成像(无需校正),RNU 仅改变小 于 0.01 %,65 % 占空比,6Me<sup>-</sup> 电荷存储,帧速 F/ 2.7,360 Hz,有效帧速为 30 Hz。90 K 的 BLIP 工作 温度,QE 几乎恒定于 50 %,靠近 MCT 10 %;NEDT <15 mK,可操作性 99.56 %,少子寿命约 10 ns<sup>[24]</sup>。



图 9 以色列 SCD 的 T2SL 发展情况



此外,SCD 基于模拟设计制备了具有无 Ga 生 长优势的 InAs/InSb/AlSb SWIR 光电探测器平台二 极管,240K BLIP 工作,波长靠近 2.5  $\mu$ m(2.2~2.5  $\mu$ m), $D^*$ 可比于其他 T2SL eSWIR 的结果,在 InAs 和 AlSb 之间使用 InSb 界面以改进应力平衡并拓展 截止波长到 3.3  $\mu$ m,另外也报道了用 MOCVD 生长 晶格匹配于 InP 的 InGaAs/GaAsSb T2SL eSWIR 二 极管<sup>[25]</sup>。

2.9 日 本

图 10 显示了日本的 T2SL 发展规划。2009 年 开始研发 T2SL,为了实现截止波长 15 µm 的 FPA (用于 JAXA 高灵敏 VLWIR 成像傅里叶光谱 仪)<sup>[26]</sup>,从 6 µm InAs/GaSb T2SL 开始并获得了较 高的性能。使用 Te 掺 GaSb 衬底(6 µm 以下具有高 透过性)、pBiBn 结构制备了高性能截止波长 6 µm 的 320 × 256@ 30 µm T2SL FPA。77 K 暗电流 4 ×  $10^{-7}$ A/cm<sup>2</sup>, -20 mV,QE = 0.35, $D^*$  = 4.1 ×  $10^{12}$  cm · Hz<sup>1/2</sup>/W,互连到商业 ROIC,77 K、F/2.3 光学的 NEDT 为 31 mK,可操作性为 99 % <sup>[27-28]</sup>。

然后使用 InAs/GaInSb 进一步提高 QE 和降低 暗电流来设计 VLWIR T2SL。首先制造了波长 15 μm的 320 × 256@ 30 μm(QVGA 格式)的 InAs/ GaInSb T2SL FPA,接着开发了大面阵 640 × 512@ 15 μm(VGA 格式)的 T2SL FPA。结构差别在于 ROIC 的输入极性(QVGA 面阵 T2SL FPAs 为 n-on-p 型 FLIR ISC0903, VGA 面阵为 p-on-n 型 FLIR ISC0403)。评估对比发现 T2SL SWIR 相机在 OH 夜光照射下具有比 InGaAs 相机更大 SRN 比<sup>[29]</sup>。



图 10 日本 T2SL 发展状况 Fig. 10 T2SL development in Japan

## 3 国内超晶格进展概况

表4大致列出了近几年国内 II 类超晶格 FPA 的进展情况。主要聚焦于中波、长波和中/长波双 色,工作温度在60~80 K,半导体所开发160 K 工作 的 320 × 256,在 FPA 面阵规格上是上海技物所开发

了截止波长 10 μm 的1 k×1 k;武汉高德、上海技物 所和半导体所也均开发出了不同规格阵列的中/长 波双色;中国电科十一所也进行了中波、长波和中/ 长波双色 T2SL 材料的生长器件工艺研发和组件制 备工作。与国外相比,国内的T2SL FPA 发展部分性能参数接近国际水平,但从SL 发展的成熟度和多样性尤其是距离商业化规模发展还有很大的发展空间。

<b>从于 百百一天座船舶及展航机</b> 私
-------------------------

单位	规格	结构	波长 /µm	中心距 ⁄μm	QE /%	D*探测率/ (cm・Hz <sup>1/2</sup> ・W <sup>-1</sup> )	响应率/ (A・W <sup>-1</sup> )	NEDT ∕mK	暗电流 ∕(A・cm <sup>-2</sup> )	$\frac{R_0 A}{/(\Omega \cdot \mathrm{cm}^2)}$	工作温度 /K
	384 × 288	pin	4.1	25				18	5 × 10 <sup>-10</sup>	$3.0 \times 10^{4}$	
昆明彻理所	384 × 288	pin	5.6	25				10			
	320 × 256	p × Ma	14	30	30	$1 \times 10^{10}$	2.6	50.8	$1.03 \times 10^{-2}$	2.4	
武汉高德	640 × 512	$\mathbf{p} \times \mathbf{M}\mathbf{n}$	10.5	15	38.6			26.2	$3.8 \times 10^{-5}$	$2.4 \times 10^{3}$	
	320 × 256 (MW/LW)	npn	4.5/10.5	30	45/33	$1.84 \times 10^{11}$		16.6/15.6	5.94 × 10 <sup>-7</sup> / 1.72 × 10 <sup>-4</sup>	$1.74 \times 10^{5}/159$	80
	640×512 双色	NPN	4.5/5.8	30		7.73×10 <sup>10</sup> / 7.81×10 <sup>10</sup>	$2.35 \times 10^{7}$ $2.34 \times 10^{7}$			109/1011	
	320 × 256		10	30				26			80
	320 × 256		10.5					30			
上海技物	$1k \times 1k$		10	18				37			80
	320 × 256		12	30		$6.2 \times 10^{10}$					70
	320 × 256 (InAs/GaAsSb)	PB × BN	11		30			21			80
	640 × 512		7.5~10.4	15		$\geq 1 \times 10^{11}$		≤30			≥60
半导体所	320 × 256 (MW/LW)		3.5/11.8		22/23	2. 15 × 10 <sup>12</sup> / 2. 31 × 10 <sup>10</sup>	1.6/2.6	108/25		1.7×10 <sup>4</sup> /97	
	384 × 288		4.1					18			77
	320 × 256		4.1					13			160

Tab. 4	Deve	lopment	status	of	domestic	type-II	superla	attices

#### 4 超晶格技术发展的 VISTA 计划

为增强美国的军事实力、满足军方对更先进、低 成本高性能红外传感器的需求,由美国国防部资助、 夜视和电子传感器总局(NVESD)领导制定了一个 为期5年(2011—2016年)的"重要红外传感器技 术加速"(Vital Infrared Sensor Technology Acceleration, VISTA)计划。

VISTA 计划采用国家组织研究团队的方法,把 来自美国联邦资助的研发中心和政府首脑以及美国 红外界有能力的工程师聚集在一起,共同研究锑基 II 类超晶格技术。这种模式非常成功,也吸引了其 他相关项目加入到 VISTA 计划中。美国国防部最 大的红外技术实验室汇集了管理该项目所需的专 家,并组织三军、导弹防御局和美国国防部高级研究 计划局(DARPA)等来指导计划的发展。美国的喷 气推进实验室(JPL)作为美国国防部信任的合作伙 伴之一,负责 II 类超晶格材料结构的设计并领导整 个研究计划。JPL 组织休斯研究实验室(HRL)、雷 声公司(Raytheon)、L3 通讯公司、洛克希德・马丁 公司、泰利迪公司(Teledyne)、BAE 系统公司、菲力 尔系统公司(FLIR Systems)、DRS 公司等 8 大企业 组成行业联盟来进行这项研究工作。

VISTA 计划没有采用传统的垂直(或纵向)集 成模型,而是开发了水平(或横向)集成模型,避免 这些公司中的任何一家垄断了其中一个重要步骤而 导致整个产业链条失控的情况发生。在 VISTA 计 划的整个研究过程中,各参与单位采用相同的材料 结构、相同的材料生长技术和相同的读出电路,做自 己的研究工作,每个季度进行一次问题查摆和审查。 采用这种研究模式在较短时间内开发出很多产品。 由于有良好的 III – V 族半导体工业基础,VISTA 计 划从衬底到材料生长、再到焦平面制造节约了大量 成本,压缩了发展时间线,美国国防部对 VISTA 计 划的投资还不到1 亿美元。

经过5年时间,VISTA 计划顺利取得巨大成功。 实现了大面阵、小像元尺寸 MW、LW 和 MW/LW III-V 族 Sb 基 T2SL 以及 D-ROIC 的发展。建立了两家大型 GaSb 衬底产业基地——IQE 公司和 IET 公司,很好地 支持以 GaSb 为基础的红外探测器产业的发展。IQE 公司在研制 5 in 以上(最大 8 in)大尺寸 GaSb 衬底生 长技术,标准尺寸为 4 in; 5 in 小规模生产;IET 公司生 产2~5 in 外延型 GaSb 衬底, 6 in 正在开发。VISTA 计 划结束后展出了包括大尺寸 GaSb 衬底等 20 多款 Sb 基 T2SL 产品,还展出了制成的相机产品,重约 10 磅, 寿命为 10 年。展现出低成本、高产量、高均匀性、高像 元合格率、高稳定性以及高性能、小尺寸、轻重量和低 功耗(SWaP)等很多优势。VISTA 计划及发展情况如 图 11,主要研究成果列于表 5。



图 11 美国 VISTA 计划发展状况及主要成果展示 Fig. 11 Development of the VISTA program in the United States and major achievements

表 5 美国 VISTA i	†划取得的成就
----------------	---------

## Tab. 5 Achievements of the U.S. VISTA program

高温上作 MWIR FPAs										
FPA 制备商	规格	中心距/μm	典型的 FPA 性能							
LMCO	640 × 480 1k × 2k	25/10	>65 % QE(最高 80 %)							
RVS	$1280 \times 1024$ $2k \times 2k$	12.5/8	>99 % 的可操作性							
L3	$720 \times 1280$ 2k $\times 2.5$ k	12/5	高的均匀性							
HRL	$4k \times 4k$		没有1/f噪声,没有暗电流尾							
单色长波红外 FPAs										
FPA 制备商	规格	中心距/μm	典型的 FPA 性能							
L3	$640 \times 480$	20	QE – 30 %							
HRL	1280 × 720	12	>99%的可操作性/高的均匀性							
RVS	1344 × 784	14	没有 1/f 噪声							
TIS	$2k \times 2k$	5								

## 续表5 美国 VISTA 计划取得的成就

Tab. 5 Achievements of the U.S. VISTA program

双带中波/长波红外 FPAs										
FPA 制备商	规格	中心距/μm	典型的 FPA 性能							
RVS	640 × 480	20	MW QE 60 % $\sim75$ % , LW $<30$ %							
TIS	720 × 1280	12	>99 % 的可操作性							
HRL			高均匀性,满足团簇定义							
	数字读出集成电路									
MIT Lincoln Lab	coln Lab 640 × 480		14 和 16 位							
	1280 × 480									

VISTA 计划之后,部分公司继续在联盟中保持 合作关系,JPL 又组织成立了新的行业联盟,其中包 括 IQE 公司、IET 公司、L3 公司、FLIR 公司、洛克希 德·马丁公司(LMC)公司、诺斯罗普·格鲁曼公司 (NGC)、雷声公司等,进行另一个5年(2017—2021 年)的研发工作。VISTA 后续计划目标是改进技术 并开发新的产品,如中波/中波、短波/中波红外焦平 面阵列等。

#### 5 结 论

本文简单归纳整理了德国、美国(CQD、JPL、 QmaiQ、NRL、Teledyne 和 Raytheon)、瑞典(IRnova)、 以色列 SCD 和日本等国外主要机构的 II 类超晶格 研究成果以及国内的发展现状;美国 VISTA 计划的 成功实施和技术突破进一步加速推动了 II 类超晶 格红外探测技术走向现实。虽然目前和今年较长时 间内 MCT FPA 技术仍然是市场主流,但是 T2SL 技 术在整体系统性能和成本上可以挑战 MCT,T2SL 技 术将在红外应用领域全方位替代 MCT 技术的优势 已经越来越清晰。与国外相比,国内 T2SL 技术的 发展已经具有一些技术基础,但距离产业化推广应 用还有一定的差距,可以借鉴国外的先进理论和技 术经验并结合具体实际工艺逐步取得突破。

## 参考文献:

- Duaumer V, Rutz F, W RL A, et al. Type-II superlattices: a promising material for space applications [J]. SPIE, 2019,11180:111806J-1.
- [2] Walther M, Daumer V, Rutz F, et al. Industrialization of type-II superlattice infrared detector technology at Fraunhofer IAF[J]. SPIE, 2019, 11002:110020C - 1.
- [3] Wörl A, Daumer V, Hugger T, et al. Advances in the characterization of InAs/GaSb superlattice infrared photode-

tectors [J]. SPIE, 2016, 9987; 99870U - 1.

- [4] Rehm R, Daumer V, Hugger T, et al. Type-II superlattice infrared detector technology at Fraunhofer IAF[J]. SPIE, 2016,9819:98190X - 1.
- [5] Daumer V, Gramich V, M Ller R, et al. Photodetector development at Fraunhofer IAF: from LWIR to SWIR operating from cryogenic close to room temperature [J]. SPIE, 2017,10177:1017711 – 1.
- [6] Stadelmann T, Daumer V, Gramich V, et al. Type II superlattice infrared photodetector research at Fraunhofer IAF[J]. SPIE, 2018, 10624:106240J - 1.
- [7] Müller R, Niemasz J, Daumer V, et al. Advances on photoconductive InAs/GaSb type-II superlattice long-wavelength infrared detectors for high operating temperature
  [J]. SPIE, 2019, 10914:1091416 - 1.
- [8] Razeghi M, Haddadi A, Dehzangi A, et al. Recent advances in InAs/InAs<sub>1-x</sub> Sb<sub>x</sub>/AlAs<sub>1-x</sub> Sb<sub>x</sub> gap-engineered type-II superlattice-based photodetectors [J]. SPIE, 2017, 10177;1017705 1.
- [9] Razeghi M, Dehzangi A, WU D, et al. Antimonite-based gap-engineered type-II superlattice materials grown by MBE and MOCVD for the third generation of infrared imagers[J]. SPIE,2019,11002:110020G - 1.
- [10] Razeghi M. InAs/GaSb type II superlattices: a developing material system for third generation of IR imaging [J]. Mid-infrared Optoelectronics, 2020:379-413.
- [11] Chevallier R, Haddadi A, Razeghi M. Double electron barrier structure for suppression of dark current in microjunction-based type-II InAs/InAsSb superlattice long-wavelength infrared photodetectors [J]. SPIE, 2018, 10540; 1054007 – 1.

perlattice-based photodetectors [ J ]. Semiconductor Science and Technology, 2019, 34(3):03LT01.

- [13] Haddadi A, Dehzangi A, Chevallier R, et al. Bias-selectable nBn dual-band long –/very long-wavelength infrared photodetectors based on InAs/InAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>/AlAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> type-II superlattices[J]. Scientific Reports, 2017,7(1):3379.
- [14] Soibel A, Ting D Z-Y, Rafol S B, et al. Performance and radiation tolerance of InAs/GaSb LWIR detectors based on CBIRD design[J]. SPIE, 2016, 9974:99740L.
- [15] Gunapala S, Rafol S, Ting D, et al. T2SL meta-surfaced digital focal plane arrays for earth remote sensing applications[J]. SPIE, 2019, 11129:111290C.
- [16] Ting D Z, Rafol S B, Keo S A, et al. InAs/InAsSb type-II superlattice mid-wavelength infrared focal plane array with significantly higher operating temperature than InSb[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(6):1-6.
- [17] Soibel A, Rafol S B, Khoshakhlagh A, et al. Radiation tolerance studies of long wavelength infrared InAs/GaSb detectors[J]. SPIE, 2016, 9755:975511.
- [18] Gunapala S, Rafol S, Ting D, et al. Type-II strained-layer superlattice digital focal plane arrays for earth remote sensing instruments[J]. SPIE, 2019, 11151:1115110.
- [19] Sundaram M, Andresen B. Current performance of commercial antimony-based midwave and longwave infrared focal plane arrays (Conference Presentation) [J]. SPIE, 2017,10177;101770Y.
- [20] Kim J, Yuanh, Kimchi J, et al. HOT MWIR InAs/InAsSb T2SL discrete photodetector development [J]. SPIE, 2018,10624;1062412.

- [21] Höglund L, ASPLUND C, W RTEMBERG R M V, et al. Advantages of T2SL:results from production and new development at IRnova[J]. SPIE,2016,9819;98190Z.
- [22] Diel W, Pozl M, Evans D, et al. High-resolution QWIP and T2SL IDDCAs by IRnova [J]. SPIE, 2018, 10624:1062410.
- [23] Höglund L, Naureen S, Ivanov R, et al. Type II superlattices: HOT MWIR production and development at IRnova [J]. SPIE, 2019, 11002:110020U.
- [24] Klipstein P C, Benny Y, Gliksman S, et al. Minority carrier lifetime and diffusion length in type II superlattice barrier devices [J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 96:155-162.
- [25] Elias D C, Shafir I, Meir T, et al. Growth of InGaAs/ GaAsSb type II superlattice for eSWIR photodetector using MOCVD[J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 95: 199 - 202.
- [26] Sakai M, Murooka J, Kumeta A, et al. Development of type-II superlattice VLWIR detectors in JAXA[J]. SPIE, 2017,10177:1017714.
- [27] Miura K, Machinaga K I, Balasekaran S, et al. High Performance type II superlattice focal plane array with 6 μm cutoff wavelength [J]. SPIE, 2016, 9819:98190V.
- [28] Sakai M, Murooka J, Kumeta A, et al. Development status of type-II superlattice infrared detector in JAXA [J]. SPIE, 2016, 9933:993306.
- [29] Oda N, Sano M, Kagami S, et al. Performance estimation for SWIR cameras under OH night airglow illumination [J]. SPIE, 2017, 10177; 1017702.