

文章编号: 1672-8785(2018)08-0005-06

InAs/GaSb 台面结型器件制备 工艺技术研究

李海燕 曹海娜

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 随着红外探测技术的不断进步, 第三代红外探测器的发展需求日渐明晰。由于带间跃迁工作原理、暗电流抑制效应以及成熟的材料制备技术基础等因素, InAs/GaSb 超晶格材料已经成为了第三代红外焦平面探测器的首选制备材料。基于 InAs/GaSb 超晶格材料的台面结型焦平面器件制备方法主要包括湿法腐蚀技术、干法刻蚀技术以及干湿法结合技术。从文献调研结果来看, 湿法腐蚀技术和干法刻蚀技术各有优缺点。湿法腐蚀技术适用于单元以及少像元面阵的制备, 其中磷酸系腐蚀液的腐蚀效果最佳; 干法刻蚀技术适用于大面阵、小尺寸焦平面阵列的制备, 几种氯基刻蚀气体体系以及氯基与甲烷基组合的刻蚀气体体系都表现出了不错的刻蚀效果; 干湿法结合技术在干法刻蚀后引入湿法腐蚀工艺以进一步消除刻蚀损伤, 从而提高器件性能。对以上三种技术方案进行了介绍和分析。

关键词: InAs/GaSb; 超晶格; 干法刻蚀; 湿法腐蚀; 干湿法结合技术

中图分类号: TN3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.08.002

Research on InAs/GaSb Mesa-Device Fabrication Technology

LI Hai-yan, CAO Hai-na

(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: With the continuous advancement of infrared detector technologies, the demand for the third generation of infrared detector technologies is becoming obvious gradually. Because of the factors of interband transition principle, dark current restrain effect and mature material fabrication technique etc., InAs/GaSb superlattice material becomes the primary choice for the fabrication of the third generation of infrared detectors. The main methods for the fabrication of InAs/GaSb mesa-focal plane arrays are wet etching, dry etching and the combination of dry and wet etching. These three kinds of etching methods have their advantages and disadvantages. The wet etching is suitable for the fabrication of single pixel or the focal plane array with less pixels. Among the wet chemical etching, the solution with phosphoric acid performs best. The dry etching is suitable for the fabrication of large arrays with small pixel spacing. The dry etching using Cl^+ and the combination of $\text{Cl}^+/\text{CH}_3^+$ exhibit good etching results. The combination of dry and wet etching is used to add wet chemical

收稿日期: 2018-05-05

作者简介: 李海燕(1997-), 女, 硕士, 主要从事离子注入、干法刻蚀等方面的研究。

E-mail: lihaiyan123@126.com

etching after dry etching in order to eliminate etching damage and hence enhance device performance. The three kinds of etching methods are presented and analyzed.

Key words: InAs/GaSb; superlattice; dry etching; wet etching; the combination of dry and wet etching

0 引言

近年来红外探测技术发展迅速, 第三代器件的生产及应用需求逐渐显现出来。目前, 短波、中波、长波、甚长波、双色及多色红外探测器已经在航天、医疗等军民两用领域得到了重要应用。第三代器件的制备材料主要有碲镉汞、量子阱和超晶格三种。在碲镉汞方面, 随着波长的增大, 其材料及器件的工艺难度急剧增加; 生产成本昂贵, 同时大面阵材料制备困难, 这就给大面阵器件制备及生产率的提高造成了障碍。量子阱器件的工作原理为子带跃迁, 其量子效率相对较低, 器件成本高。超晶格器件的工作原理为带间跃迁, 它具有较高的量子效率; 由于俄歇复合以及较强的隧道电流抑制效应, 可实现较高的工作温度, 同时可在长波红外和甚长波红外波段获得较高的探测率; 基于较成熟的 III-V 族化合物材料生长及器件工艺技术, 其制备成本比碲镉汞及量子阱器件低; 通过调节超晶格的周期厚度以及 InAs/GaSb 两种材料的层厚比, 可以实现 2~30 μm 的工作波段, 从而满足多光谱探测的需求, 便于器件结构的优化制备。因此, 基于以上优势, InAs/GaSb II 类超晶格材料已经成为第三代探测器的首选材料^[1-2]。

采用 InAs/GaSb II 类超晶格材料制备台面结型焦平面探测器的技术手段主要有以下三种: 湿法腐蚀技术、干法刻蚀技术以及干湿法相结合的技术方案。下面对这三种技术方案进行介绍。

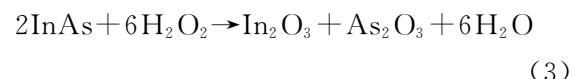
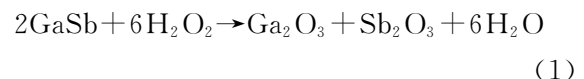
1 工艺技术方案

1.1 湿法腐蚀技术

湿法腐蚀技术是一种通用的台面成型技术, 它具有材料损伤小、侧壁形貌好、成本低、选择比高等特点。但由于腐蚀过程中的各项同性效应, 存在横向钻蚀, 容易造成腐蚀侧

壁内凹, 同时缩小台面光吸收区的面积, 降低焦平面阵列的占空比。湿法腐蚀工艺技术的难点还在于选择合适成分及配比的腐蚀液, 消除腐蚀液对 InAs 和 GaSb 的腐蚀选择性, 避免粗糙腐蚀侧壁的形成; 同时腐蚀速率要易于控制, 且工艺成品率高、可控性好^[3-4]。

从文献汇总情况来看, 常见的腐蚀液体系有以下几种: 酒石酸系腐蚀液、磷酸系腐蚀液、盐酸系腐蚀液和乳酸系腐蚀液。湿法腐蚀大多在室温状态下完成。腐蚀液中至少含有络合剂、氧化剂和稀释剂三种成分。超晶格中的四种元素先与溶液中的氧化剂发生氧化反应, 生成 Sb_2O_3 、 As_2O_3 、 In_2O_3 、 Ga_2O_3 、 In_2O 等物质。在反应过程中, 溶液中存在以下普适反应^[4]:



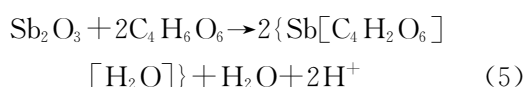
氧化生成物中的 As_2O_3 等氧化物难溶于水和酸, 会吸附在材料表面形成致密薄膜, 从而影响反应的进一步进行; 部分 Sb_2O_3 会继续与 GaSb 生成 Ga_2O_3 和单质 Sb。因此, 需要调整氧化剂和络合剂的比例, 控制溶液内的氧化反应及反应趋势, 促使氧化生成物与络合剂进一步发生络合反应, 生成溶于水的络合物, 以保证反应的顺利进行。在此过程中, 希望 InAs 反应后的产物比例接近 $InAsO_4$, 并避免难溶性氧化物 In_2O_3 及 As_2O_5 的生成^[4]。这就需要在混合腐蚀溶剂中合理调配氧化剂与络合剂的溶液比例。



1.1.1 酒石酸系腐蚀液

酒石酸系腐蚀液由氢氟酸(HF)、双氧水

(H_2O_2)、酒石酸($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$)和水构成。在腐蚀 InAs/GaSb 超晶格材料时, HF 为催化剂, H_2O_2 为氧化剂, $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$ 为络合剂, 其对 InAs/GaSb 材料的络合反应原理如下^[4]:



在腐蚀过程中, GaSb 的腐蚀速率要高于 InAs, 因此需要合理调整腐蚀液的化学配比。有文献提到, 由于双氧水的氧化作用会在深台面腐蚀过程中造成大量腐蚀坑的出现, 该腐蚀液不适宜制备深台面结构^[4]。中国科学院半导体所在该方面发表了相关的研究论文^[5]。

1.1.2 磷酸系腐蚀液

磷酸系腐蚀液由磷酸、柠檬酸、双氧水和水构成。该体系中, H_2O_2 为氧化剂, 柠檬酸和磷酸为络合剂, 其对 InAs/GaSb 材料的腐蚀原理如下^[4]: 磷酸与 GaSb 的氧化物进一步反应, 生成稳定可溶的 $\text{Ga}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ 与不稳定的 $\text{Sb}(\text{H}_2\text{PO}_4)_5$; 接着 $\text{Sb}(\text{H}_2\text{PO}_4)_5$ 继续反应, 生成不溶性 $\text{Sb}_2(\text{HPO}_4)_5$ 和 $\text{Sb}_3(\text{PO}_4)_5$ 。由反应原理可知, 要合理搭配各种溶液的比例, 且宜在腐蚀过程中保持匀速搅拌, 使流动的腐蚀液迅速带走生成物(不停留在材料表面), 进而影响器件性能。从部分文献的调研结果来看, 磷酸系溶液的腐蚀台面侧壁光滑, 侧壁倾角较大, 去损伤效果更好, 腐蚀速度的可控性好, 易于控制腐蚀截止深度; 腐蚀窗口大小不同时, 也能保证较好的腐蚀均匀性, 因此适用于单元以及光敏元数目少的焦平面探测器台面结型器件的制备^[4,6-7]。在该试剂的使用上, 中国科学院上海技术物理研究所^[6]、中国科学院半导体所^[8]、空空导弹研究所^[7]和比尔肯大学^[9]等发表了相关的研究论文。

1.1.3 盐酸系腐蚀液

盐酸系腐蚀液由盐酸、双氧水和水构成。文献^[10]分析, HCl 与 GaSb 反应生成 SbCl_3 和 GaCl_3 , 生成物 SbCl_3 在盐酸与双氧水的混合溶液中继续发生反应, 生成不溶性

$\text{SbO}(\text{OH})_3$ 和 $\text{SbO}_2(\text{OH})_2$ (这两种生成物可后续采用其它酸溶解去除); As 发生氧化反应, 生成可溶性 HAsO_4 ^[10]。文献^[11]报道, 采用盐酸系腐蚀液进行腐蚀时, 由于盐酸的氧化性很强, 会对掩膜光刻胶造成腐蚀; 同时横向钻蚀和下切效应都很严重, 导致腐蚀过程的可控性差^[11]。

1.1.4 乳酸系腐蚀液

乳酸系腐蚀液由乳酸、硝酸、氢氟酸和水构成。文献^[11]说明, 采用乳酸系腐蚀液进行腐蚀时, 台面下切深度大, 侧面垂直度好, 但侧壁粗糙^[11]。

综合文献调研后可知, 在 InAs/GaSb 超晶格材料的湿法腐蚀台面制备技术研究方面, 以上四种腐蚀液中, 磷酸系腐蚀液用于 InAs/GaSb 超晶格材料的腐蚀效果最好, 工艺可控性最佳, 使用频率最高。

1.2 干法刻蚀技术

干法刻蚀技术适用于多像元台面结型焦平面阵列的制备。由于刻蚀过程各向异性, 该技术适用于大面阵窄间距焦平面制备, 不存在横向钻蚀, 图形转移精度高、器件占空比大, 可形成垂直度较高的台面侧壁。影响器件性能的几个刻蚀因素包括刻蚀粗糙度、刻蚀界面状态等关乎表面电学质量的因素。InAs/GaSb 超晶格材料的周期性晶格结构对稳定的刻蚀速率与平滑的侧壁形成提出了相关要求。在刻蚀过程中, 刻蚀速率变化大会形成波形刻蚀侧壁。波形刻蚀侧壁会成为器件的电学活跃区, 增加漏电几率。周期性不同、厚度不同的材料层增加了刻蚀截止的复杂度以及大面积刻蚀均匀性的难度^[3]。InAs/GaSb 超晶格材料台面刻蚀所用刻蚀气体体系主要包括甲基刻蚀气体体系、氯基刻蚀气体体系和氩基刻蚀气体体系。由于刻蚀气体组分复杂, 刻蚀参数多, 刻蚀工艺的研发难度相对较大^[7]。

1.2.1 甲基刻蚀气体体系

甲基刻蚀气体体系包含 CH_4 和 H_2 。与其它气体体系相比, 甲基组分能够得到更好

的表面形貌和更少的腐蚀坑^[7]。部分文献认为,含有甲烷的刻蚀气体可以在刻蚀材料表面上形成一层薄的“伪”钝化层——聚合物层。这层钝化层含有低的固定电荷量,有利于提高钝化质量,从而提高器件性能^[3]。当气体体系的比例设置不当时,甲基组分会在表面聚合明显的含碳刻蚀生成物,从而降低刻蚀质量和影响刻蚀进度。

1.2.2 氯基刻蚀气体体系

氯基刻蚀气体体系包含 BCl_3 、 SiCl_4 、 Cl_2 中的一种或几种气体组分。氯基组分的刻蚀速率高、表面平坦化能力强,但其刻蚀损伤比甲基刻蚀组分大,且在刻蚀反应过程中生成的低挥发性刻蚀产物 InCl_3 具有 600°C 的沸点,不易解吸。因此,为了保证刻蚀质量,可能需要进行高温刻蚀。而这种刻蚀特点和刻蚀条件要求又不利于具有更高性能需求的器件结构的制备,同时氯基刻蚀气体毒性大,环境安全性差^[3,7]。部分文献认为,氯基刻蚀气体的化学刻蚀作用有利于去除表面氧化层及刻蚀生成物,倾向于形成高表面态密度的界面,从而造成器件的高暗电流特性。当含氯离子的刻蚀气体在总体系中的含量偏高时,会弱化对 GaSb 材料刻蚀的各向异性,造成钻蚀效果^[12]。

1.2.3 氩基刻蚀气体体系

氩基刻蚀气体体系包含 Ar。该体系的刻蚀过程属于纯物理刻蚀。单独使用时,刻蚀表面粗糙,损伤严重。因此,一般将其作为刻蚀气体组分的一部分,用于在刻蚀腔体中辅助形成稳定的等离子气氛和物理刻蚀,助力于化学刻蚀反应的进行及刻蚀生成物的解吸^[7]。

在刻蚀反应的过程中,InAs/GaSb 超晶格材料与 Cl^+ 发生反应的主要生成物是挥发性气体 InCl_x 、 AsCl_3 、 GaCl_3 以及 SbCl_3 与 CH_4 反应生成的挥发性 $\text{In}(\text{CH}_3)_3$ 、 SbH_3 、 $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$ 。从刻蚀生成物的角度考虑,含 In 材料一般选择 CH_4/H_2 进行刻蚀,其刻蚀表面更光滑,生成物更易解吸。但当材料中含有 Ga 时,虽然生成物 $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$ 的沸点很低,但由于中性甲基

原子团与 Ga 等原子反应的化学活性比中性卤素原子要差得多,所以刻蚀速率会非常缓慢,同时易在表面聚合。因此,刻蚀 GaSb 材料时一般选择含有 Cl^+ 的气体。此外, H^+ 的穿透力较大,易对 P 型材料产生钝化,从而影响器件性能。这也是 CH_4/H_2 的刻蚀局限之一^[13-14]。

Jean N 等人采用甲酸腐蚀以及 BCl_3/Ar 、 $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Ar}$ 、 $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{BCl}_3/\text{Cl}_2/\text{Ar}$ 刻蚀气体体系对 InAs/GaSb 超晶格材料进行了刻蚀。从暗电流的角度来比较刻蚀效果,在湿法腐蚀和 $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{BCl}_3/\text{Cl}_2/\text{Ar}$ 刻蚀工艺下,器件表现出了最小暗电流的电学特性^[3]。Siew L T 等人分别采用了 $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Cl}_2$ 、 $\text{SiCl}_4/\text{Cl}_2$ 、 SiCl_4/Ar 、 Cl_2/Ar 刻蚀方案并对其效果进行了对比,发现 Cl_2/Ar 方案表现最佳^[12]。杨利鹏对 SiCl_4/Ar 和 Cl_2/Ar 的刻蚀效果进行了比较。结果表明, SiCl_4/Ar 刻蚀以化学反应为主, Cl_2/Ar 刻蚀以物理反应为主;在相同的刻蚀条件下, Cl_2/Ar 台面更为陡峭,因此优先选择 Cl_2/Ar 刻蚀方案^[15]。罗跃川等人对比了用磷酸、双氧水、水的混合溶液湿法腐蚀与 BCl_3/Cl_2 干法刻蚀处理 InAs/AlGaSb 时的台面制备效果,发现干法刻蚀的陡直度更高^[16]。许佳佳等人采用 Cl_2/N_2 进行了刻蚀及成像^[17]。

由于每篇文献中的实验研究都会受到刻蚀气体配置的限制,同时刻蚀反应涉及参数多、调制复杂,因此很难保证每个实验的对比都是在该气体配置情况下各个参数最优化时完成的,同时也不能在一篇文章中完成所有实验条件的对比。从以上汇总的文献数据来看,氯基刻蚀体系中, Cl_2/Ar 、 Cl_2/N_2 、 BCl_3/Ar 经调试后都能取得可行性较好的实验结果;刻蚀气体体系(如 $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{BCl}_3/\text{Cl}_2/\text{Ar}$ 组合氯基与甲基气体)也可获得不错的刻蚀效果。在实际的操作过程中,还须针对设备的气体配备情况完成刻蚀气体体系的组合并对实验参数进行优化。

1.3 干湿法结合技术

由于干法刻蚀会对材料表面产生损伤,部

分文献提到在干法刻蚀工艺后采用湿法腐蚀的方式处理刻蚀表面, 去除刻蚀损伤以及刻蚀后侧壁形成的自然氧化物和刻蚀生成物, 以避免由于干法刻蚀造成的器件性能下降的风险^[18]。张利学在 $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Ar}$ 干法刻蚀后采用磷酸系腐蚀液进行了去损伤处理^[4]。Elena A P 等人在采用 BCl_3 气体体系刻蚀后, 增加 $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ 混合溶液并用其浸泡几十秒, 腐蚀掉了刻蚀侧壁形成的自然氧化层^[19]。Eric A D J 等人在采用 BCl_3 刻蚀工艺之后, 增加了异丙醇 IPA 溶液漂洗工艺以去除表面生成的含氯刻蚀生成物^[20]。Shi Y L 等人采用 Cl_2 干法刻蚀结合磷酸系腐蚀体系进行了台面结构制备^[2]。Delaunay P Y 等人使用 BCl_3/Ar 进行了 ECR-RIE 刻蚀, 随后采用酸蚀方式去除了侧壁刻蚀损伤并对侧壁刻蚀毛刺进行了平坦化处理^[21]。Kutty M N 等人在 BCl_3 干法刻蚀后, 采用盐酸系腐蚀液湿法技术继续完成了台面腐蚀工艺。结果表明, 在干法刻蚀深度与湿法腐蚀深度基本相同的情况下, 台面侧壁的波浪形貌明显, 下切形貌严重^[10]。从文献总结数据来看, 干法刻蚀后的湿法腐蚀工艺只适用于通过短时间腐蚀去除损伤及氧化层的情况, 而不适用于在干法刻蚀的基础上增加台面深度。

2 结束语

本文汇总了三种台面结型 InAs/GaSb 超晶格材料器件制备方法, 包括湿法腐蚀技术、干法刻蚀技术以及干湿法结合技术。介绍了湿法腐蚀中的四种常用腐蚀液体系。由基于文献调研的原理分析及实验结果对比可知, 在湿法腐蚀技术中, 采用磷酸系腐蚀液体系时的腐蚀可控性最好, 腐蚀表面质量最高。湿法腐蚀技术适用于单元器件以及少像元焦平面阵列的制备。然后介绍了干法刻蚀工艺技术中常用的刻蚀气体体系, 分析了几种刻蚀气体组合并对其刻蚀结果进行了简单对比。从文献汇总数据来看, 多个氯基刻蚀气体组合以及氯基与甲基刻蚀气体组合的刻蚀气体体系经工艺参数调整后的刻蚀工艺可行; 干法刻蚀技术适用于大面

阵、深台面刻蚀。干湿法结合技术在干法刻蚀工艺的基础上增加了湿法腐蚀技术以提高刻蚀界面质量。在超晶格材料台面结构的实际制备过程中, 须结合配备的环境条件因素以及制备器件指标要求情况进行合理设计。

从大面阵、小间距的器件发展方向及工艺生产率的角度来看, 干法刻蚀技术是 InAs/GaSb 超晶格焦平面阵列制备的必经发展路线。考虑到该技术的工艺原理, 如何克服负载效应和提高大面阵刻蚀的均匀性、如何调整工艺参数以实现高可控性、高重复性刻蚀深度的制备、如何减小刻蚀台面侧壁损伤以避免工艺实现影响器件性能, 是 InAs/GaSb 超晶格材料干法刻蚀工艺所面临的几大技术难题。

参考文献

- [1] 张艳华, 马文全, 卫场, 等. 长波和甚长波及其双色 InAs/GaSb 二类超晶格红外探测器的研究进展 [J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2014, **44**(4): 390-395.
- [2] Shi Y L, Hu R, Deng G R, et al. InAs/Ga(In)Sb Type-II Superlattices Short/ Middle Dual Color Infrared Detectors [C]. SPIE, 2015, **9451**: 94510L.
- [3] Jean N, Cory J H, Don R, et al. Pixel Isolation of Low Dark-current Large-format InAs/GaSb Superlattice Complementary Barrier Infrared Detector Focal Plane Arrays with High Fill Factor [C]. SPIE, 2011, **7945**: 79451T.
- [4] 张利学. InAs/GaSb 薄膜及器件特性研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2014.
- [5] 郭杰, 彭震宇, 鲁正雄, 等. GaAs 基短周期 InAs/GaSb 超晶格红外探测器研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2009, **28**(3): 165-167.
- [6] 许佳佳, 金巨鹏, 徐庆庆, 等. 128×128 元 InAs/GaSb II 类超晶格红外焦平面探测器 [J]. 红外与毫米波学报, 2012, **31**(6): 501-504.
- [7] 姚官生, 张利学, 张向锋, 等. InAs/GaSb 超晶格探测器台面工艺研究 [J]. 红外与激光工程, 2015, **44**(3): 951-954.
- [8] 向伟, 王国伟, 徐应强, 等. 中波 InAs/GaSb 超

- 晶格红外焦平面探测器 [J]. *航空兵器*, 2015, **51**(1):49-51.
- [9] Omer S, Abdullah M, Kutlu K, et al. Passivation of Type II InAs/GaSb Superlattice Photodetectors with Atomic Layer Deposited Al₂O₃ [C]. *SPIE*, 2012, **8353**: 83530Z.
- [10] Kutty M N, Plis E, Khoshakhlagh A, et al. Study of Surface Treatments on InAs/GaSb Superlattice LWIR Detector [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2010, **39**(10): 2203-2209.
- [11] 陈慧娟, 郭杰, 丁嘉欣, 等. InAs/GaSb 超晶格红外探测器台面湿法腐蚀研究 [J]. *微纳电子技术*, 2008, **45**(5): 298-301.
- [12] Siew L T, Yu L G, Sankha D, et al. Dry Etching and Surface Passivation Techniques for Type-II InAs/GaSb Superlattice Infrared Detectors [C]. *SPIE*, 2010, **7838**: 783814.
- [13] 陈永远, 邓军, 史衍丽, 等. InAs/GaSb 二类超晶格红外探测材料的 ICP 刻蚀 [J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(2): 433-437.
- [14] 晏宏洲. 延伸波长 InGaAs 探测器台面刻蚀工艺 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2015.
- [15] 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.
- [16] 罗跃川, 韩尚君, 王雪敏, 等. GaAs/AlGaAs 多层膜刻蚀的陡直度 [J]. *信息与电子工程*, 2011, **9**(3): 347-350.
- [17] 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.
- [18] Walther M, Rehm R, Fuchs F, et al. 256 * 256 Focal Plane Array Mid-wavelength Infrared Camera Based on InAs/GaSb Short-period Superlattices [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2005, **34**(6): 722-725.
- [19] Elena A P, Gautam N, Kutty M N, et al. Performance of Long Wave Infrared InAs/GaSb Strained Layer Superlattice Detectors for the Space Applications [C]. *SPIE*, 2011, **8164**: 81640S.
- [20] Eric A D J, John W L, Neil B, et al. Addressing Surface Leakage in Type 2 InAs/GaSb Superlattice Materials Using Novel Approaches the Surface Passivation [C]. *SPIE*, 2011, **8155**: 815508.
- [21] Delaunay P Y, Nguyen B M, Hoffman D, et al. Background Limited Performance of Long Wavelength Infrared Focal Plane Arrays Fabricated from M-structure InAs/GaSb Superlattice [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, **45**(2): 157-162.