

AlAsSb 的外延再生长对 InAs/GaSb 红外探测器 暗电流抑制效果研究

严定钰^{1,2}, 沈祥^{1,2*}, 王庶民⁴, 石张勇^{1,2}, 张焱超³, 张凡³

(1. 宁波大学 高等技术研究院, 浙江 宁波 315211; 2. 浙江省光电探测材料及器件重点实验室, 浙江 宁波 315211;
3. 浙江超晶晟锐光电有限公司, 浙江 宁波 315400; 4. 查尔姆斯理工大学 微米技术与纳米科学学院, 瑞典 哥德堡 41296)

摘要: 采用分子束外延(MBE)技术外延再生长 AlAsSb, 对 InAs/GaSb II 类超晶格(T2SLs)长波红外探测器的表面缺陷进行钝化, 实现了暗电流的显著降低。首先, 研究了湿法腐蚀浅台面的最佳腐蚀液配比, 获得了低横向腐蚀、光滑的侧壁以及均匀的腐蚀界面。随后, 使用 AlAsSb/AlAs/GaAs、AlAsSb/GaSb 两种不同的外延再生长组合和单一的 SiO₂ 薄层分别对刻蚀后的台面进行钝化, 同时保留一个没有钝化的样品作为对照, 最后对 4 种不同钝化条件下探测器的暗电流特性进行了测量。结果发现, 使用 AlAsSb/GaSb 外延再生长钝化层的器件暗电流得到了进一步降低, 使用 SiO₂ 钝化层的效果次之, 而使用 AlAsSb/AlAs/GaAs 外延再生长钝化层的性能相对较差。上述结果表明, 外延再生长钝化技术是降低长波红外探测器暗电流的一种有效方法。

关键词: 外延再生长; 表面钝化; InAs/GaSb II 类超晶格; 长波红外探测器; 湿法刻蚀

中图分类号: TN215

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2023) 03-0087-07

随着红外探测器在国防和民用需求领域的不断发展, 长波红外(Long Wave Infrared, LWIR)探测器呈现出良好的市场前景^[1]。传统碲镉汞红外探测器具有量子效率高、响应速度快等优点, 是目前应用最为广泛的红外探测器, 但是它在长波范围存在均匀性差、产量低、成本高等问题, 限制了其进一步的发展和应用^[2-3]。InAs/GaSb II 类超晶格材料因其灵活可调的能带、高均匀性、低俄歇复合和隧穿电流^[4-7], 以及较高的量子效率而备受关注^[8-10]。研究人员认为, II 类超晶格在制备长波和超长波红外探测器方面有独特的优势^[11-15], 它们被认为是下一代红外探测器的首选材料。对于长波红外探测器, 一方面随着探测响应波长的扩展, 探测材料的带隙开始变窄, 从而导致器件的暗电流成倍增加。另一方面, 陷阱辅助隧穿暗电流和侧壁漏电流也明显增加。因此, 抑制暗电流成为制备高性能长波红外探测器的关键技术之一^[16]。

此外, 在制备焦平面红外探测阵列过程中, 台面刻蚀工艺会破坏晶体材料周期性结构, 产生的悬挂键导致表面漏电流增加, 而超晶格材料表面在刻蚀后也极易被氧化, 形成导电氧化层^[17-18]。上述两种情况都将严重降低 InAs/GaSb II 类超晶格探测器的性能, 因此表面缺陷钝化对抑制探测器暗电流至关重要。目前, 研究人员开展了多种钝化技术对长波 T2SL 红外探测器性能影响的研究, 如采用介质材料钝化(使用二氧化硅、聚酰亚胺或光刻胶)或硫系钝化(使用硫化铵和硫化锌), 也取得了一定效果^[19]。半导体外延再生长钝化是另一种很有潜力的方法, 但其在技术上具有挑战性, 特别是在 GaSb 和 InAs 等具有高化学反应性的脆弱材料中。同时, 外延再生长钝化方法对台面刻蚀形貌、刻蚀后的表面处理、台面清洁和 MBE 生长条件等方面也提出了更高要求。到目前为止, 在外延再生长钝化工艺开发方面, 已有研究工作都集中在优

收稿日期: 2023-02-04.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金联合项目(U21A2056); 浙江省重点研发计划(2021C01025); 宁波市“科技创新 2025”重大专项(2020Z009)。

第一作者: 严定钰(1998-), 男, 湖南常德人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 红外探测器二次外延钝化。E-mail: a595925304@foxmail.com

*通信作者: 沈祥(1980-), 男, 浙江宁波人, 研究员, 主要研究方向: 光电材料与器件。E-mail: shenxiang@nbu.edu.cn

化刻蚀工艺和清洁方法,以期在台面侧壁和外延再生长材料间获得高质量且清晰的界面。然而,对于外延再生长材料的选择和 MBE 生长工艺优化方面的相关内容却鲜有研究。对于 InAs/GaSb II 类超晶材料体系来说,用于外延再生长钝化的化合物半导体材料也只有 GaSb 和 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ 两种,而 GaSb 对器件性能的改善效果有限,宽带隙 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ 材料在生长条件合适情况下可表现出比 GaSb 更好的钝化效果,但 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ 材料对 MBE 生长技术提出了非常高的要求^[20-21]。尽管近几年已有研究使用 InP 外延再生长钝化 InGaAs/InP p-i-n 光电二极管^[22],然而受超晶格材料特性、工艺复杂度和 MBE 生长技术等影响,对于 InAs/GaSb II 类超晶材料体系的宽带隙外延再生长钝化材料仍然没有新的研究进展。虽然外延再生长钝化方法在技术方面存在诸多挑战,但仍然被认为是解决表面钝化问题最理想的方法。理论上,具有宽带隙的外延再生长钝化材料和超晶格的能带对齐方式可以限定表面载流子的浓度,并且大的能带偏移也会阻止载流子从超晶格层向外延再生长层的转移。因此宽带隙材料外延再生长的表面钝化存在其特定的研究价值。由此,我们提出使用 AlAsSb 作为宽带隙外延再生长钝化材料,通过优化外延再生长钝化前的台面刻蚀工艺、表面处理和清洁方法以及 MBE 生长条件,最终实现对 LWIR 探测器暗电流的抑制。

本文首先优化定义台面的湿法腐蚀过程,通过研究柠檬酸、双氧水、去离子水混合腐蚀溶液对 InAsSb 表现出的不同腐蚀结果,以获得最佳腐蚀溶液比例。随后对腐蚀后的台面分别使用 AlAsSb/AlAs/GaAs、AlAsSb/GaSb 两种不同外延再生长组合和单一的 SiO_2 薄层进行钝化,同时还保留一个没有钝化的对照样品进行比较。结果显示,与 AlAsSb/AlAs/GaAs 钝化层、单独 SiO_2 钝化层或没有钝化层相比,采用 AlAsSb/GaSb 外延再生长钝化的器件表现出最佳的暗电流特性。总而言之,外延再生长钝化方法为降低 LWIR 探测器的暗电流提供了一种可行的方法。

1 实验过程

InAs/GaSb II 类超晶格长波材料使用配备有

As 和 Sb 裂解炉的固体源 MBE 系统来进行生长,其具体结构如图 1 所示。首先使用固体源 MBE 系统在 N 型 GaSb(1 0 0)衬底上生长 500 nm 厚的 GaSb 缓冲层,然后沉积 700 nm 厚的 Si 掺杂 InAs/GaSb/AlSb N 型接触层。紧接着覆盖一层 500 nm 厚的 InAs/GaSb/AlSb 电子势垒层,中间是 2 000 nm 厚的弱 Be 掺杂的 InAs/GaSb 长波吸收层。之后是 300 nm 厚的 InAs/GaSb P 型空穴阻挡层,然后接着生长 20 nm 厚的 GaSb 刻蚀阻挡层,最后是 400 nm 厚的 InAsSb 层和 20 nm 厚的 GaSb 顶部覆盖层。

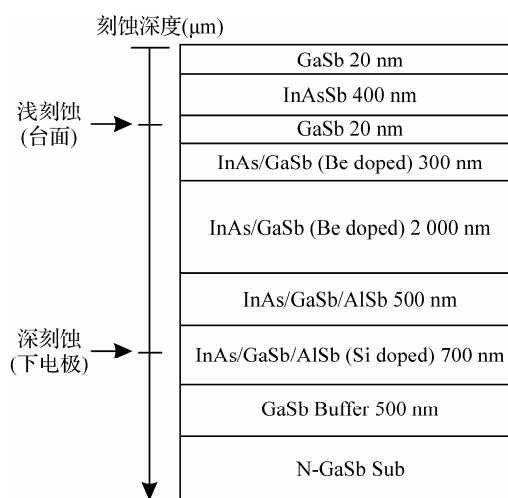


图 1 InAs/GaSb II 类超晶格结构示意图

在材料生长完成后,对其进行刻蚀和钝化。首先,用标准紫外线光刻技术对 InAs/GaSb T2SL 长波材料进行光刻,然后用电感耦合等离子体(ICP)进行刻蚀。刻蚀实验中,用一层薄薄的 SiO_2 作为刻蚀硬掩膜,通过紫外线光刻技术将图案转移到超晶格材料表面。此后,使用 CHF_3/O_2 混合气体的 ICP 系统对 T2SL 材料表面的 SiO_2 硬掩膜进行刻蚀。在打开 SiO_2 硬掩膜后,使用 $\text{CH}_4/\text{Cl}_2/\text{Ar}_2$ 混合气体的 ICP 系统来刻蚀 T2SL 结构。刻蚀工艺将穿过顶部覆盖层和超晶格层,停止在底部接触层,最终作为生长金属后的下电极(图 2)。随后,利用湿法浅腐蚀方法,通过使用柠檬酸、双氧水和去离子水的混合腐蚀溶液来定义台面区域,本次刻蚀停止在超晶格结构上方的 GaSb 刻蚀阻挡层,随后采用 MBE 再生长方法沉积钝化层。完成刻蚀和钝化后,使用电子束蒸发沉积 Ti/Pt/Au 金属接触层,最终的器件横截面如图 2 所示。在过程中,使用 Phenom ProX 扫描电子显微镜(SEM)和 Dimension Edge 原

子力显微镜(AFM)分别测量台面侧壁的形貌以及表面的粗糙度. 并利用 KLA-Tencor P7 台阶仪测量腐蚀深度, 以确定腐蚀速率.

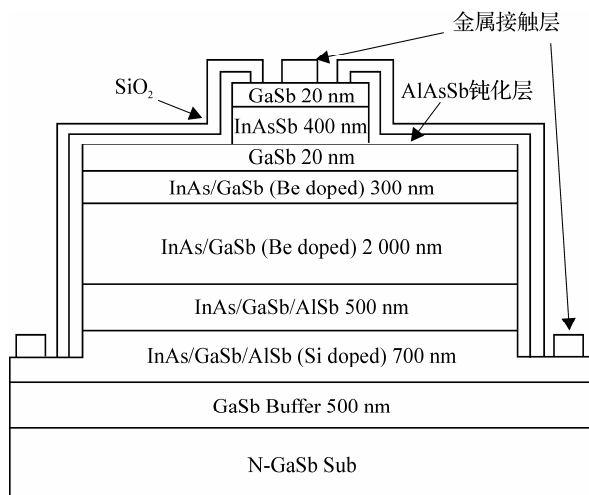


图2 AlAsSb 外延再生长钝化后的器件横截面

2 结果和讨论

通过 AFM 和高分辨率 X 射线衍射仪(HRXRD)检测了 InAs/GaSb II 类超晶格长波材料的质量. 图3和图4分别显示了 MBE 生长的 InAs/GaSbII 类超晶格长波材料的 AFM 图像和 2θ 扫描曲线. 从图3中可以看出, 在 $30\mu\text{m}\times 30\mu\text{m}$ 的面积上, 表面均方根粗糙度(RMS)为 0.317nm , 表明生长过程得到了很好的控制. 在图4中, 主峰和卫星峰表现出窄的半峰全宽(FWHM)且对称性好, 而超晶格材料的零级衍射峰的 FWHM 为 20.75arcsec , 与衬底峰的失配为 $+100\text{arcsec}$, 进一步证实了该材料具有良好的晶体质量.

对于台面区域的制备, 早期的研究表明湿法腐蚀溶液选择不当会造成腐蚀表面粗糙, 并会进一步导致表面漏电流增加. 因此, 为获得光滑的腐蚀表面, 应该选择合适的腐蚀溶液. 具体从实验的角度来分析, 选择使用的腐蚀液对 InAsSb 的腐蚀选择应该比 GaSb 大得多, 同时在酸和碱中不产生不溶性的化学产物. 基于这一标准, 选择柠檬酸/双氧水($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7/\text{H}_2\text{O}_2$)的混合溶液, 因为该溶液对 InAsSb 材料的腐蚀表现出活跃的特性, 而对 GaSb 则很难腐蚀, 可以保证更好的腐蚀效果, 同时获得光滑的腐蚀表面^[23].

对于 MBE 生长的 InAs/GaSb II 类超晶格长波

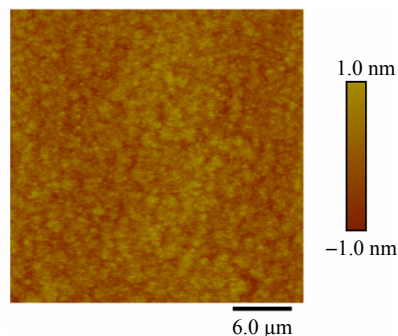


图3 InAs/GaSbII 类超晶格材料在 $30\mu\text{m}\times 30\mu\text{m}$ 区域的原子力显微镜图像

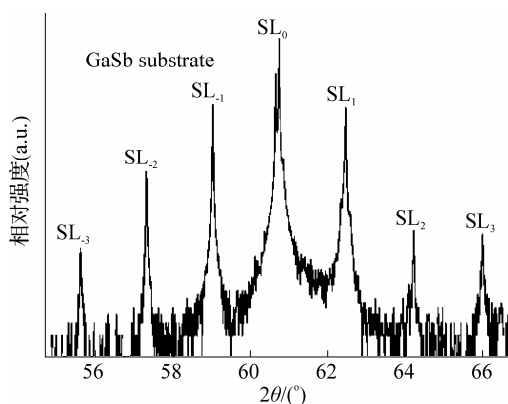


图4 InAs/GaSb II 类超晶格材料的 X 射线衍射曲线材料, 首先使用酒石酸钾钠($\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6\text{KNa}$):去离子水(H_2O):盐酸(HCl):双氧水(H_2O_2)(15 g:200 mL:160 mL:14 mL)的混合溶液腐蚀顶部的 GaSb 层^[23], 随后通过固定柠檬酸和双氧水的体积比为 2:1 对 InAsSb 进行腐蚀. 在柠檬酸和双氧水的初始用量为 30 mL/15 mL 的情况下, 分析腐蚀速率的变化趋势. 由表1可见, 随着柠檬酸和双氧水含量的增加, 腐蚀速率首先呈上升趋势, 同时台面侧壁和下表面逐渐变得光滑. 但是, 当柠檬酸和双氧水的含量逐渐超过 40 mL/20 mL 时, 腐蚀速率呈现下降趋势, 而台面侧壁和下表面也开始逐渐变得粗糙.

表1 不同体积的柠檬酸和双氧水的腐蚀速率

样品	柠檬酸/mL	双氧水/mL	腐蚀速率/($\text{nm}\cdot\text{min}^{-1}$)
1	30	15	100.0
2	40	20	102.7
3	50	25	97.3
4	60	30	93.3
5	80	40	89.3

通过分析上述实验结果, 可以作如下解释. 当溶液中双氧水较少时, 双氧水与材料的氧化反应

中产生的氧化物也会较少。此时,如果柠檬酸用量较多,那么柠檬酸与氧化物反应后多余的柠檬酸会直接腐蚀材料,造成材料腐蚀界面粗糙。而当双氧水的含量处于适量状态时,柠檬酸只与双氧水氧化过程中产生的氧化物反应,而不再直接腐蚀材料,因此,材料的表面形貌是光滑的。当双氧水的含量过高时,双氧水与材料的氧化反应过程中会产生过氧化物,这些氧化物不能被柠檬酸完全反应,导致剩余的氧化物堆积在台面侧壁上,造成界面粗糙,也对腐蚀速率造成一定的影响。

基于上述结果,在随后的腐蚀溶液中引入去离子水,而溶液总体积不变,通过改变去离子水的体积来观察腐蚀速率的变化情况。实验结果表明,引入去离子水后,总腐蚀速率略有增加,在溶液比例为60:30:90时,腐蚀表面更加光滑(表2)。基于实验结果,可以推断去离子水的引入稀释了柠檬酸和双氧水的效果,使原来的溶液变得不饱和,最终导致反应速率的轻微增加。

表2 固定柠檬酸和双氧水的比例,总溶液体积不变的腐蚀速率及表面粗糙度

样品	A/mL	B/mL	C/mL	D/(nm·min ⁻¹)	E/nm
1	40	20	120	100.5	4.76
2	50	25	105	101.5	3.53
3	60	30	90	103.5	2.05
4	80	40	60	101.5	4.91

注: A:柠檬酸; B:双氧水; C:去离子水; D:腐蚀速率; E:表面粗糙度。

为进一步改进腐蚀实验,将柠檬酸和双氧水的体积分别固定为60 mL和30 mL,并改变去离子水的体积,寻找更合适的比例。由表3可见,随着去离子水体积的增加,腐蚀速率首先增加,台面侧壁和下表面的粗糙度也逐渐改善。然而,当去离子水体积超过90 mL时,腐蚀速率出现下降,台面侧壁和下表面慢慢变得粗糙,主要是因为当去离子水含量过高时,造成柠檬酸和双氧水的腐蚀溶液过度稀释,使腐蚀溶液的效果降低,最终导致腐蚀速率的减小。从图5的SEM图像可以证实,用这种比例的柠檬酸溶液腐蚀的台面侧壁光滑均匀,没有附着颗粒污染。因此,最终确定腐蚀过程的最佳体积比例为 $V(\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7):V(\text{H}_2\text{O}_2):V(\text{H}_2\text{O})=2:1:3$ 。

在湿法腐蚀台面后,对T2SL材料结构进行钝化处理,每种钝化处理的细节描述如下。对于 SiO_2

表3 固定柠檬酸和双氧水体积为60 mL和30 mL,改变去离子水体积的腐蚀速率

样品	去离子水/mL	腐蚀速率/(nm·min ⁻¹)
1	80	96.5
2	85	97.5
3	90	103.5
4	95	100.5
5	100	95.5

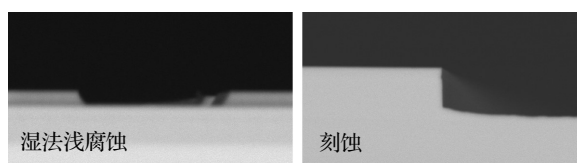


图5 湿法浅腐蚀和刻蚀下电极横截面的扫描电镜图

钝化,在200℃左右的沉积温度下,通过等离子体增强化学气相沉积(PECVD),在刻蚀台面和侧壁上沉积了一层 SiO_2 薄膜。对于外延再生长材料的设计,关键是要考虑各种参数,包括材料带隙、能带偏移和晶格常数。首先,外延再生长材料的晶格常数必须接近顶部GaSb的晶格常数(6.1 Å),以匹配材料晶格。结合晶格常数接近6.1 Å的材料,并考虑到有效的超晶格带隙在中波红外器件的~300 meV到长波红外器件的~100 meV之间,外延再生长材料应该有更宽的带隙。此外,大的能带偏移将阻止载流子从超晶格到再生长层的转移。最后,综合上述因素,AlAsSb被选为外延再生长材料。由于AlAsSb材料本身在空气中比较容易被氧化,所以在外延再生长后,通过PECVD在材料表面沉积一层 SiO_2 薄层,以防止AlAsSb材料的氧化,同时达到绝缘的目的。根据具体实验情况,本文设计了两组AlAsSb外延再生长结构a和b,分别是AlAsSb/AlAs/GaAs以及AlAsSb/GaSb的组合。

最后,经AlAsSb/GaSb组合外延再生长钝化后的不同台面尺寸的器件暗电流密度和阻抗面积乘积(RA)曲线分别如图6和图7所示。结果表明,该器件具有良好的性能,暗电流密度得到明显抑制,器件性能随着台面直径的增加而提高。

此外,图8和图9分别显示了刻蚀后未钝化的器件和不同钝化处理后的器件之间的暗电流密度和RA曲线的比较,每种钝化方法下的台面直径为500 μm。在77 K,偏置电压为-0.1 V时,未钝化样品的暗电流密度为 $1.79 \times 10^{-1} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$, SiO_2 钝化样

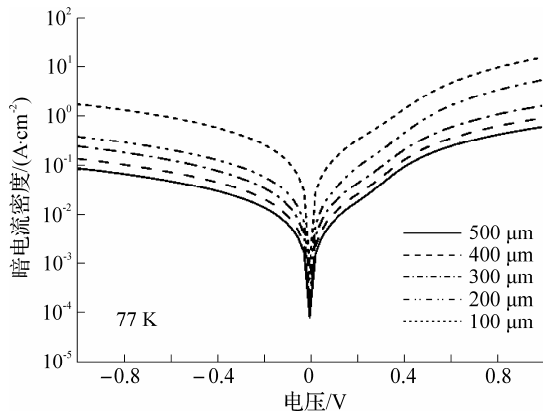


图6 经 AlAsSb/GaSb 外延再生长钝化后, 不同台面尺寸的器件暗电流密度与偏压的关系

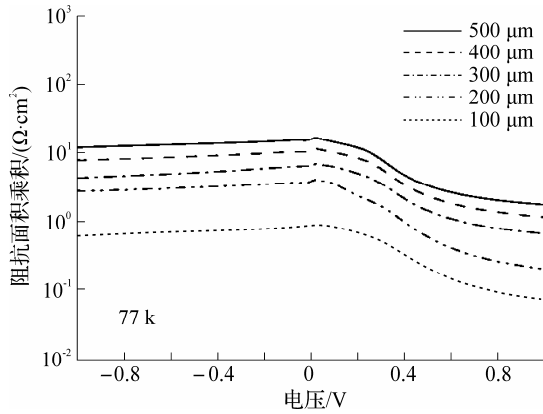


图7 经 AlAsSb/GaSb 外延再生长钝化后, 不同台面尺寸的阻抗面积乘积与偏压的关系

品的暗电流密度为 $1.01 \times 10^{-2} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$, AlAsSb 外延再生长 a 钝化样品暗电流密度为 $1.18 \times 10^{-2} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$, 而 AlAsSb 外延再生长 b 钝化样品的暗电流密度为 $6.59 \times 10^{-3} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$. 结果显示, 经 AlAsSb/GaSb 外延再生长钝化样品的暗电流密度表现出最低的暗电流密度, 表明这种钝化方法对抑制表面漏电流有最明显的效果.

结合工艺和相关原理, 对上述结果进行解释. 对于图8中 AlAsSb 外延再生长 a 的暗电流曲线, 由于 AlAsSb 层向 AlAs 层过渡过程中的应力积累和最终 GaAs 覆盖层本身的缺陷, 整体钝化结构并不完善, 限制了暗电流的抑制效果. 对于图8中 AlAsSb 外延再生长 b 的暗电流曲线, 整体结构中的应力积累减少, GaSb 覆盖层比 GaAs 更稳定. 同时, 宽带隙 AlAsSb 外延再生长钝化材料可以与下面的超晶格结构实现更好的晶格匹配, 由此产生

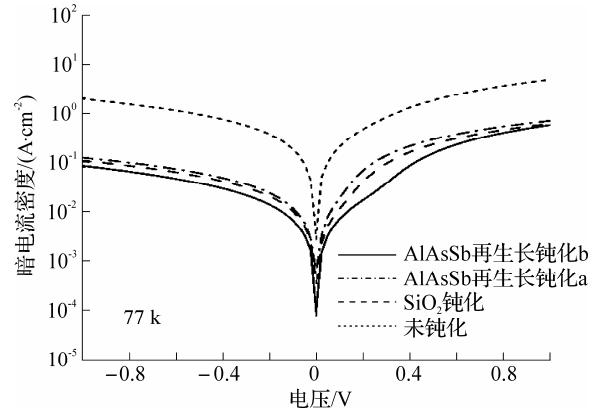


图8 不同钝化方式的暗电流密度与偏压的关系曲线

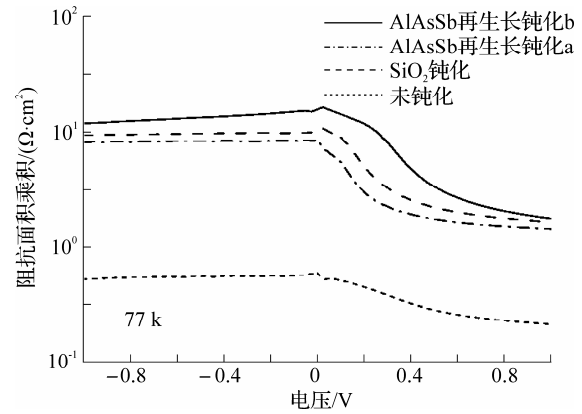


图9 不同钝化方式的阻抗面积乘积与偏压的关系曲线

的能带偏移也会阻止载流子从超晶格流向再生生长层, 提高器件的性能, 表现出相对更好的暗电流抑制效果. 对于图8中 SiO_2 钝化的暗电流曲线, 所采用的 PECVD 工艺技术并不完善, 同时, SiO_2 中的一些固有电荷很容易导致在干法刻蚀台面的侧壁上形成漏电通道, 从而降低器件的性能.

此外, 图10显示了在 77 K, 偏置电压为 -0.1 V 时, 未钝化的器件和用不同钝化方法处理的器件的阻抗面积乘积的倒数 $((RA)^{-1})$ 与像元周长面积比 (P/A) 的曲线.

$(RA)^{-1}$ 的表面相关性可用式(1)来近似计算:

$$\frac{1}{RA} = \frac{1}{r_{\text{surface}}} \frac{P}{A} + \frac{1}{r_{\text{bulk}}}, \quad (1)$$

式中: RA 为阻抗面积乘积; r_{surface} 为表面电阻率; r_{bulk} 为体电阻贡献; P 为像元周长; A 为像元面积. 从式(1)中可以看出, 表面电阻率倒数与表面的相关漏电流成正比. 在 77 K, 偏置电压为 -0.1 V 时, 发现未钝化表面电阻率为 $16.92 \Omega \cdot \text{cm}$, SiO_2 钝化的

表面电阻率为 $267.38 \Omega \cdot \text{cm}$, AlAsSb 外延再生长 a 条件下, 表面电阻率为 $242.72 \Omega \cdot \text{cm}$, 而 AlAsSb 外延再生长 b 条件下, 表面电阻率为 $303.95 \Omega \cdot \text{cm}$. 结果表明, AlAsSb 外延再生长 b 条件下, 钝化后表现出最高的表面电阻率, 显示出更好的表面漏电流抑制效果.

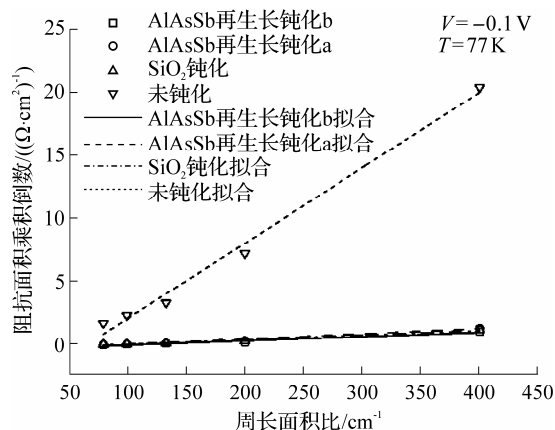


图 10 不同钝化方式阻抗面积乘积倒数与周长面积比关系

3 结论

研究了湿法腐蚀制备浅台面工艺, 通过优化后的柠檬酸/双氧水/去离子水混合溶液($V(\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7): V(\text{H}_2\text{O}_2): V(\text{H}_2\text{O})=2:1:3$)对 InAsSb 进行湿法腐蚀, 获得了光滑的 InAsSb 台面. 然后, 利用 MBE 外延再生长来抑制 InAs/GaSb II 类超晶格 LWIR 探测器表面的漏电流. 使用 AlAsSb/AlAs/GaAs、AlAsSb/GaSb 两种不同的外延再生长组合和单一的 SiO_2 薄层分别对刻蚀后的台面进行钝化, 同时还保留一个没有钝化的对照样品进行比较. 暗电流特性测量的结果显示, 利用 AlAsSb/GaSb 外延再生长钝化器件在 77 K, 偏压 -0.1 V 时, 台面直径为 $500 \mu\text{m}$ 的 LWIR 探测器的暗电流密度为 $6.59 \times 10^{-3} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$, R_0A 为 $15.8 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 表现出最佳的暗电流抑制效果. 而 SiO_2 钝化对器件暗电流的抑制效果相对较差, AlAsSb/AlAs/GaAs 的外延再生长钝化效果次之. 综上, 该研究成果为抑制 T2SL LWIR 探测器表面漏电流提供了一个新的思路.

参考文献:

[1] 杨斌. 二类超晶格红外光电材料研究与应用[J]. 中国基础科学, 2019, 21(1): 52-54; 64.
[2] Rogalski A. HgCdTe infrared detector material: History,

status and outlook[J]. Reports on Progress in Physics, 2005, 68(10):2267-2336.
[3] 邢伟荣, 刘铭, 温涛, 等. II 类超晶格长波红外探测器研究进展[J]. 红外, 2021, 42(3):1-5; 10.
[4] Deng G R, Yang W Y, Zhao P, et al. High operating temperature InAsSb-based mid-infrared focal plane array with a band-aligned compound barrier[J]. Applied Physics Letters, 2020, 116(3):031104.
[5] Gautam N, Myers S, Barve A V, et al. High operating temperature interband cascade midwave infrared detector based on type-II InAs/GaSb strained layer superlattice[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(2):021106.
[6] Gunapala S D, David T, Rafol S, et al. High operating temperature T2SL digital focal plane arrays for earth remote sensing instruments[J]. Infrared Technology and Applications XLVII, 2021, 11741:130-137.
[7] Youngdale E R, Meyer J R, Hoffman C A, et al. Auger lifetime enhancement in InAs-Ga_{1-x}In_xSb superlattices[J]. Applied physics letters, 1994, 64(23):3160-3162.
[8] Rogalski A. Competitive technologies of third generation infrared photon detectors[J]. Opto-Electronics Review, 2006, 14(1):84-98.
[9] Rogalski A, Martyniuk P, Kopytko M. InAs/GaSb type-II superlattice infrared detectors: Future prospect[J]. Applied Physics Reviews, 2017, 4(3):031304.
[10] Rogalski A, Martyniuk P, Kopytko M. Type-II superlattice photodetectors versus HgCdTe photodiodes [J]. Progress in Quantum Electronics, 2019, 68:1115114.
[11] Cui S N, Jiang D W, Sun J, et al. Investigation of active-region doping on InAs/GaSb long wave infrared detectors[J]. Chinese Physics B, 2020, 29(4):048502.
[12] Hood A, Razeghi M, Aifer E H, et al. On the performance and surface passivation of type-II InAs/GaSb superlattice photodiodes for the very-long-wavelength infrared[J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(15):151113.
[13] Jiang D W, Xiang W, Guo F Y, et al. Very high quantum efficiency in InAs/GaSb superlattice for very long wavelength detection with cutoff of $21 \mu\text{m}$ [J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(12):121110.
[14] Nguyen B-M, Chen G, Hoang M-A, et al. Growth and characterization of long-wavelength infrared type-II superlattice photodiodes on a 3-in GaSb wafer[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2011, 47(5):686-690.
[15] Sullivan G J, Ikhlassi A, Bergman J, et al. Molecular beam epitaxy growth of high quantum efficiency InAs/GaSb superlattice detectors[J]. Journal of Vacuum Science & Technology, B Microelectronics and Nanometer

- Structures: Processing, Measurement, and Phenomena, 2005, 23(3):1144-1148.
- [16] 李俊斌, 李东升, 吴圣娟, 等. 二类超晶格红外焦平面探测器的研究进展[J]. 红外技术, 2021, 43(11):1034-1043.
- [17] Chen G, Huang E K, Hoang A M, et al. Surface leakage investigation via gated type-II InAs/GaSb long-wavelength infrared photodetectors[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(21):213501.
- [18] Chen G, Nguyen B M, Hoang A M, et al. Elimination of surface leakage in gate controlled type-II InAs/GaSb mid-infrared photodetectors[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(18):183503.
- [19] Plis E A, Kutty M N, Krishna S. Passivation techniques for InAs/GaSb strained layer superlattice detectors[J]. Laser & Photonics Reviews, 2013, 7(1):45-59.
- [20] Hood A D. Surface passivation and performance characteristics of type-II indium arsenide/*Gallium antimonide* superlattice infrared photodetectors for focal plane arrays[D]. Evanston, IL, USA: Northwestern University, 2007.
- [21] Rehm R, Walther M, Fuchs F, et al. Passivation of InAs/(GaIn)Sb short-period superlattice photodiodes with 10 μm cutoff wavelength by epitaxial overgrowth with $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ [J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(17):173501.
- [22] Braga O M, Delfino C A, Kawabata R M S, et al. Surface passivation of InGaAs/InP p-i-n photodiodes using epitaxial regrowth of InP[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(16):9234-9244.
- [23] Dier O, Lin C, Grau M, et al. Selective and non-selective wet-chemical etchants for GaSb-based materials[J]. Semiconductor Science and Technology, 2004, 19(11): 1250-1253.

Surface passivation of InAs/GaSb infrared detectors using epitaxial regrowth of AlAsSb

YAN Dingyu^{1,2}, SHEN Xiang^{1,2*}, WANG Shumin⁴, SHI Zhangyong^{1,2}, ZHANG Yanchao³, ZHANG Fan³

(1.Advanced Technology Research Institute, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Key Laboratory of Photoelectric Materials and Devices of Zhejiang Province, Ningbo 315211, China;

3.Zhejiang SuperMat Sen-Ray Optoelectronics Co., Ltd., Ningbo 315400, China;

4.College of Micro-technology and Nano-science, Chalmers University of Technology, Gothenburg 41296, Sweden)

Abstract: Passivation of InAs/GaSb type-II superlattice (T2SLs) infrared detectors by epitaxial regrowth of AlAsSb using molecular beam epitaxy (MBE) technology has achieved a significant reduction of dark current. Firstly, the optimal etching recipe for wet etching shallow mesa surfaces is investigated to obtain low lateral corrosion, smooth etching mesa sidewall, and a uniform corrosion interface. Thereafter, the post-etched mesa is passivated using two different epitaxial regrowth combinations of AlAsSb/AlAs/GaAs and AlAsSb/GaSb and a single SiO_2 thin layer, respectively. A control sample without any passivation layer is also kept for comparison, and the dark current characteristics of the four different passivations are investigated. It turns out that the passivation layer prepared with the epitaxial regrowth of AlAsSb/GaSb further reduces the dark current of the device, whereas the SiO_2 passivation shows relatively less satisfying performance, and the epitaxial regrowth passivation of AlAsSb/AlAs/GaAs is the least effective. Therefore, epitaxial regrowth passivation technology proves to be an effective method to reduce the dark current of long wavelength infrared detectors.

Key words: epitaxial regrowth passivation; surface passivation; InAs/GaSb type-II superlattice; long wavelength infrared detector; wet etching

(责任编辑 章践立)