

文章编号: 1672-8785(2021)03-0001-05

## II类超晶格长波红外探测器研究进展

邢伟荣 刘 铭 温 涛 周 朋 胡雨农

(中电科光电科技有限公司, 北京 100015)

**摘 要:** 由于具有带隙可调、电子有效质量大、俄歇复合率低等特点, II类超晶格在长波红外和甚长波红外探测方面具有独特优势。介绍了长波超晶格探测器制备方面的研究进展, 包括能带结构设计、表面缺陷控制、周期结构控制和表面钝化。最后报道了  $320 \times 256$  长波超晶格焦平面阵列及其测试性能。结果表明, 在 77 K 工作温度下, 该阵列的截止波长为  $9.6 \mu\text{m}$ , 平均峰值探测率  $D^*$  为  $7 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ , 噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) 为 34 mK, 响应非均匀性为 7%。

**关键词:** II类超晶格; 长波; 红外探测器

**中图分类号:** TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.03.001

## Research Progress of Type-II Superlattice Long-wave Infrared Detector

XING Wei-rong, LIU Ming, WEN Tao, ZHOU Peng, HU Yu-nong

(CETC Electro-Optics Technology Corporation Limited, Beijing 100015, China)

**Abstract:** Due to the characteristics of tunable bandgap, large electron effective mass, and low Auger recombination rate, type-II superlattices have unique advantages in long-wave and very long-wave infrared detection. The research progress in the preparation of long-wave superlattice detectors is introduced, including band structure design, surface defects control, periodic structure control and surface passivation. Finally, a  $320 \times 256$  long-wave superlattice focal plane array and its test performance are reported. The results show that at an operating temperature of 77 K, the cut-off wavelength of the array is  $9.6 \mu\text{m}$ , the average peak detection rate  $D^*$  is  $7 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ , the noise equivalent temperature difference (NETD) is 34 mK, and the response non-uniformity is 7%.

**Key words:** type-II superlattice; long-wave; infrared detector

### 0 引言

由于具有可穿透烟雾、抗干扰能力强以及全天候工作等特点, 红外探测器在国防和国民经济多个领域得到了广泛应用。随着新需求的

不断发展, 长波红外探测器呈现良好的市场前景。碲镉汞红外探测器具有量子效率高、响应速度快等优点, 已成为目前应用最为广泛的红外探测器。但它在长波波段存在均匀性差、成

**收稿日期:** 2020-09-23

**作者简介:** 邢伟荣(1986-), 男, 河北邢台人, 高级工程师, 主要从事III-V族光电探测器材料与器件研究。

E-mail: xingwog@163.com

品率低和成本高的问题,导致高性能长波红外探测器难以得到广泛应用。而 II 类超晶格红外探测器是近年来兴起的一种新型红外探测器,它具有以下几个特点:(1)材料带隙可调,光谱响应可覆盖  $2\sim 30\ \mu\text{m}$  波长范围。(2)独特的能带结构决定其具有较大的电子有效质量,并且随着探测波长的增大,电子有效质量却几乎保持不变。在长波红外波段,其电子有效质量约为碲镉汞材料的 3 倍,导致此类探测器隧穿电流小<sup>[1]</sup>。(3)通过应变调节能带结构,可以降低俄歇复合率,提高载流子有效寿命,从而实现较高的器件性能(见图 1)。(4)II 类超晶格通常采用分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)生长方式,材料均匀性较高。通过采用晶格匹配且可商业化供给的 GaSb 衬底,能够生长出大面积、均匀性良好的 II 类超晶格材料,从而易于制备大面阵红外探测器<sup>[2]</sup>。基于以上特点,研究人员认为 II 类超晶格在制备长波和甚长波红外探测器时具有独特优势,因此是制备新一代红外探测器的优选材料<sup>[3-4]</sup>。

## 1 理论设计

一个在反偏状态下工作的光伏型探测器的暗电流通常包括少数扩散电流、产生-复合电

流、隧穿电流和表面漏电流等。由于材料带隙较宽,II 类超晶格中波红外探测器的性能受暗电流的影响较小,所以采用 p-i-n 结构能够实现良好的探测器性能。但对于长波红外探测器来说,若仍使用简单的 p-i-n 结构,则隧穿电流、产生-复合电流以及表面漏电流等将会大大增加,进而严重制约器件性能。通过设计和引入异质结构,可以抑制以上暗电流,使探测器的暗电流仅由本征扩散电流控制。在光伏结构中,通过在超晶格吸收层两侧分别插入宽带隙的 p 型势垒层和 n 型势垒层来形成电子势垒和空穴势垒。双异质结的引入对于探测器暗电流的抑制起到决定性作用:首先,外加偏压的电场主要作用在宽带材料上,使得空间电荷区主要在宽带材料里产生,进而有效抑制器件的产生-复合电流;其次,由于宽带材料的引入,器件的隧穿电流也得到极大抑制;最后,通过在导电通道上引入宽带材料,能够提高其表面电阻率,使器件的整体漏电流得到有效抑制。采用经验紧束缚方法(Empirical Tight-Binding Method, ETBM)计算超晶格材料的能带结构。在设计中,长波吸收层周期结构由 13 个 InAs 分子层和 8 个 GaSb 分子层组成(13 MLs InAs/

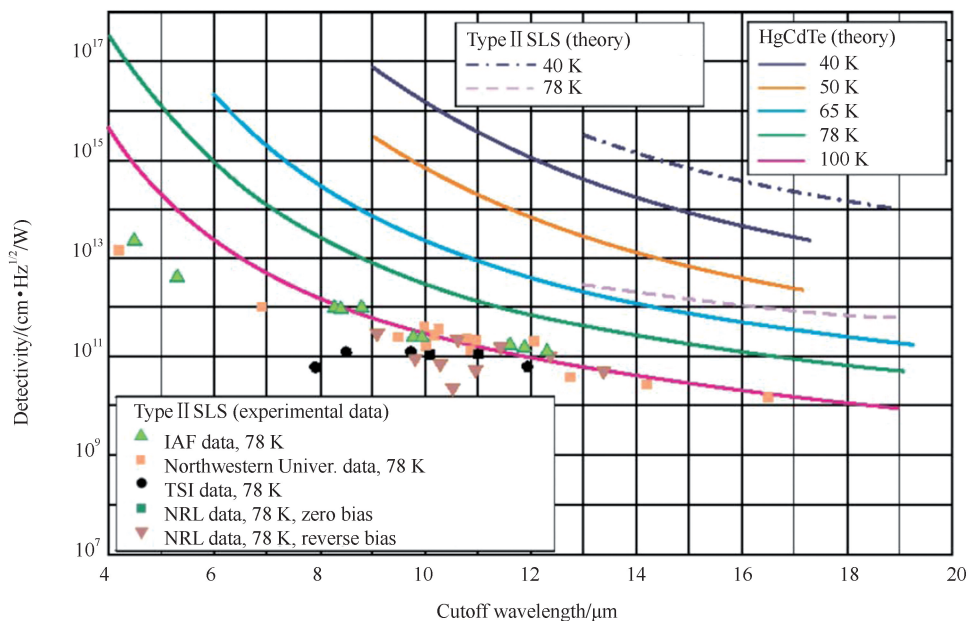


图 1 不同截止波长及工作温度下 II 类超晶格和 p-on-n HgCdTe 的理论性能对比

8 MLs GaSb), 而电子势垒层和空穴势垒层则分别由 8 MLs InAs/8 MLs GaSb 超晶格和 16 MLs InAs/4 MLs AlSb 超晶格构成。该异质结构(见图 2)能够较好地抑制暗电流, 从而提高长波红外探测器的性能。

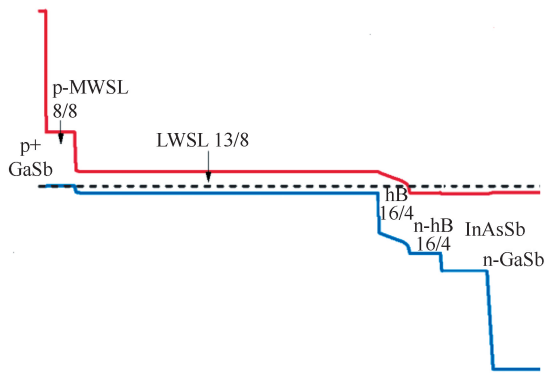


图 2 长波红外探测器的能带结构图

## 2 材料生长与探测器阵列制备

锑化物超晶格材料生长采用固态源 MBE 系统, 其中 Sb 源和 As 源均为裂解源(出射束流分别为  $Sb_2$  和  $As_2$ ), V/III 束流比由束流监测计获得。利用在腔室上安装的反射式高能电子衍射仪(Reflection High-Energy Electron Diffractometer, RHEED)实时观察样品表面状态, 并通过表面再构(见图 3)来校正温度。InAs 层和 GaSb 层均采用 III 族元素限制生长模式。

在 n 型 GaSb(100) 衬底上生长  $0.5 \mu\text{m}$  厚的 Si 掺杂 InAsSb 缓冲层, 然后是  $0.5 \mu\text{m}$  厚的 n 型掺杂 16 MLs InAs/4 MLs AlSb 电极层和不掺

杂的同周期结构的空穴势垒层, 接着是  $2 \mu\text{m}$  厚的 p 型弱掺杂 13 MLs InAs/8 MLs GaSb 长波吸收层(掺杂浓度为  $1 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ ), 最后是 8 MLs InAs/8 MLs GaSb 电子势垒层和  $20 \text{ nm}$  厚的 Be 掺杂 GaSb 盖层(掺杂浓度为  $2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ )。

生长的长波 II 类超晶格材料通过湿法腐蚀完成台面成型。经硫化去除本征氧化层后, 采用  $\text{SiO}_2/\text{SiON}$  复合膜层进行表面钝化以抑制表面漏电流。通过用热蒸发沉积工艺生长 Ti/Pt/Au 电极体系来实现良好的欧姆接触。探测器阵列制备完成后(见图 4)与读出集成电路(Readout Integrated Circuit, ROIC)倒装互联, 从而实现混成耦合。最后对混成芯片的 GaSb 衬底进行背减薄, 并将其封入杜瓦结构进行测试。

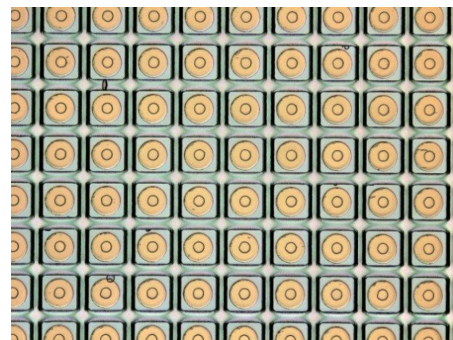


图 4 长波探测器阵列

## 3 结果与讨论

### 3.1 材料表面缺陷

由于不同厂家的衬底氧化层的厚度和透过

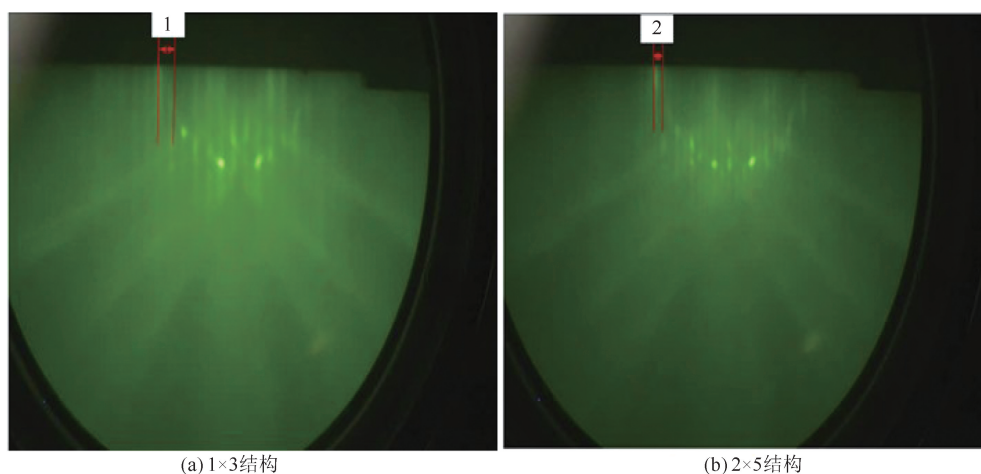


图 3 基于表面再构转变的 RHEED 衍射图

率不同,用国产衬底替代进口衬底后,超晶格材料的生长参数发生了变化。以前期优化的超晶格生长条件在新衬底上生长的超晶格材料的表面缺陷大幅增加,如图 5(a)所示。缺陷形状为底部近似椭圆的金字塔形,椭圆长轴尺寸约为  $6\ \mu\text{m}$ ,短轴约为  $3\ \mu\text{m}$ 。经 200 倍光学显微镜观察可知,缺陷密度为  $2000\ \text{cm}^{-2}$ 。通过对不同衬底的参数进行表征并对缺陷形状和缺陷分布进行分析,调整长波超晶格材料的生长条件(生长温度等),使材料表面质量得到明显提升。结果表明,材料表面缺陷密度降到  $800\ \text{cm}^{-2}$  以下时,可以满足红外焦平面阵列的制作要求(见图 5(b))。超晶格材料表面质量的提升,将会减小长波器件的暗电流,从而提高探测器性能<sup>[5]</sup>。

### 3.2 超晶格周期结构控制

传统碲镉汞(Mercury Cadmium Telluride, MCT)等体材料的带隙由组分决定,而超晶格材料则不同,其带隙由超晶格周期结构中 InAs 层、GaSb 层以及类 InSb 界面层的厚度决定。尽管在材料生长之前已经设计了确定的周期结构,但在 MBE 生长超晶格材料的过程中,以下因素通常会导致实际周期结构与设计方案之间存在偏差,比如高温生长中原子互扩散、原子活性不同而产生原子替换、富 V 族原子生长导致原子混入。

为了表征超晶格材料的实际周期结构,采

用高分辨 X 射线衍射仪(High Resolution X-Ray Diffraction, HRXRD)对其进行测试和模拟。以长波超晶格材料吸收层为例,首先测试实际衍射曲线,然后根据衍射峰位置模拟出实际结构参数,如图 6 所示。经模拟得到的 InAs 层、界面 1、GaSb 层和界面 2 的厚度分别为  $43\ \text{\AA}$ 、 $3\ \text{\AA}$ 、 $21.92\ \text{\AA}$  和  $1.76\ \text{\AA}$ 。通过对比设计值发现存在偏差,InAs 层的厚度增加,GaSb 层的厚度减小,界面层的厚度稍有增加。结合能带理论分析可知,InAs 层和界面层厚度的增加将会导致响应截止波长向长波方向偏移。同理,电子势垒层和空穴势垒层的结构偏差将会使该层能带结构改变,导致暗电流抑制作用减弱或者载流子输运受到阻碍,从而降低探测器性能。

结合上述原因,优化挡板开关顺序和时间,精确控制超晶格材料的实际生长结构。并且通过生长和测试的反复迭代,获得与设计周期结构一致的超晶格材料,以达到能带结构设计目的,进而获得具有良好性能的长波超晶格材料。

### 3.3 长波超晶格芯片的表面钝化

超晶格材料表面极易被氧化,从而形成  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  等多种氧化物导电层。另外,在芯片阵列制备中,台面刻蚀过程会导致晶体周期结构遭到破坏,产生悬挂键,引起表面漏电流。以上两种过程会严重降低 Sb 基超晶格探测器的

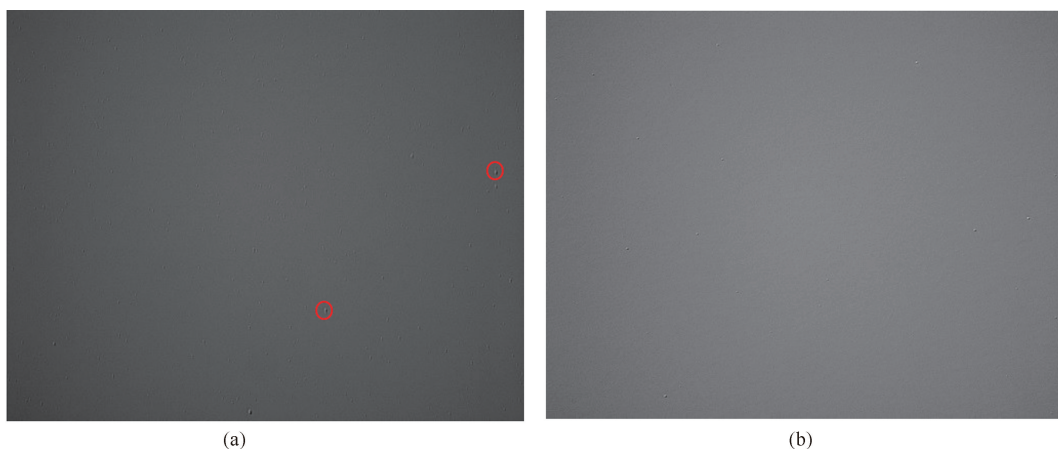


图 5 长波超晶格材料表面图像:(a)换衬底后外延表面缺陷多;(b)工艺调整后缺陷减少

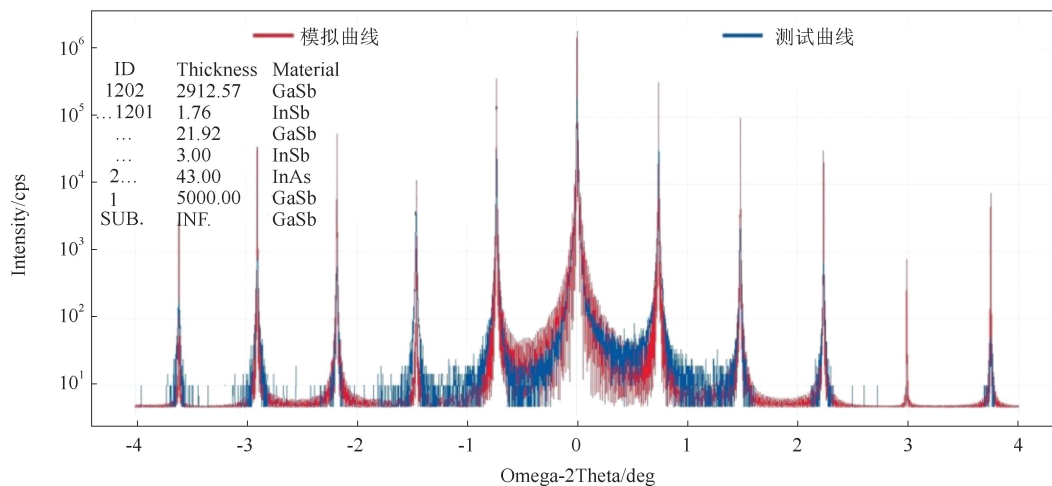


图 6 长波超晶格吸收层的 XRD 测试与拟合曲线

性能, 因此必须对该探测器进行表面钝化。

与中波超晶格探测器相比, 长波器件的带隙小, 受暗电流的影响更大, 使其表面钝化更加困难。因此, 我们结合 Sb 基超晶格的特点, 开发了硫化物钝化工艺。有效去除刻蚀后的本征氧化层, 然后通过沉积  $\text{SiO}_2/\text{SiON}$  复合膜层进行表面钝化加固, 从而增强钝化层的稳定性。结果表明, 该方法具有良好的钝化效果。

### 3.4 长波超晶格焦平面阵列测试

我们利用上述工艺制备了长波超晶格材料和  $320 \times 256$  长波超晶格焦平面混成阵列(见图 7), 并对其性能进行了测试。图 8 所示为光学  $F$  数为 2、工作温度为 77 K 时的光谱响应曲线。该探测器的截止波长为  $9.6 \mu\text{m}$ , 平均峰值探测率  $D^*$  为  $7 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ , NETD 为 34 mK, 响应非均匀性为 7%。可以看出, 这种焦平面阵列具有良好性能。

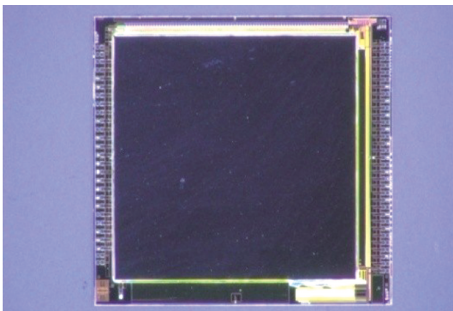


图 7 长波混成芯片

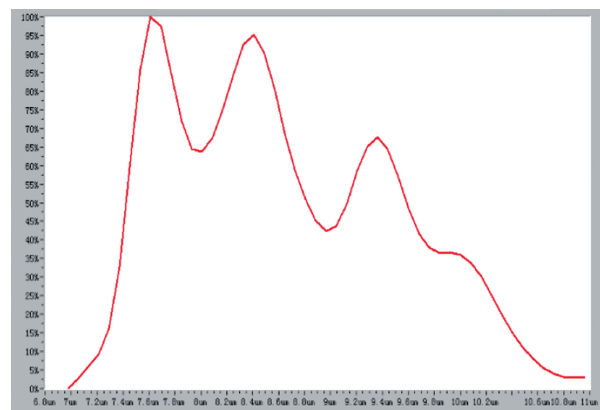


图 8 长波超晶格器件的响应光谱

## 4 结论

基于 II 类超晶格在长波探测方面的优势, 介绍了我们在长波超晶格探测器制备方面的研究进展。通过设计双异质结构抑制了器件暗电流; 优化生长温度等条件后减少了表面缺陷, 并通过用软件拟合超晶格周期结构来提高结构控制精度; 利用复合钝化层减小了漏电流。采用以上措施制备了  $320 \times 256$  长波红外焦平面阵列。测试结果表明, 77 K 温度下的平均峰值探测率  $D^*$  为  $7 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ , NETD 为 34 mK, 响应非均匀性为 7%。下一阶段将通过优化长波超晶格能带结构和长波钝化工艺来进一步提高长波超晶格探测器的性能。本文研究对长波超晶格探测器研制及其工程化应用具有参考意义。

(下转第 10 页)

宏观缺陷密度小于等于  $100 \text{ cm}^{-2}$ 、表面平整度小于等于  $15 \text{ }\mu\text{m}$ 、表面粗糙度小于等于  $1.0 \text{ nm}$ 、位错密度低于  $5 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$  的 4 in 硅基碲镉汞材料。该研究为后续的大面阵碲镉汞探测器研制奠定了坚实的材料基础。

### 参考文献

- [1] 巩锋, 周立庆, 王经纬, 等. 3 英寸硅基碲镉汞分子束外延工艺研究 [J]. *激光与红外*, 2012, **42**(7): 781–785.
- [2] 王经纬, 高达. 硅基短波碲镉汞材料分子束外

延生长研究 [J]. *激光与红外*, 2015, **45**(6): 646–649.

- [3] 王经纬, 巩锋, 刘铭, 等. 硅基碲镉汞分子束外延工艺优化研究 [J]. *激光与红外*, 2012, **42**(10): 1161–1164.
- [4] 周立庆, 刘铭, 巩锋, 等. 3 英寸 CdTe/Si 复合衬底外延技术研究 [J]. *激光与红外*, 2011, **41**(5): 537–541.
- [5] 葛玉斌, 高达, 王经纬, 等. 基于正交试验方法的 Si 基碲镉汞工艺优化 [J]. *激光与红外*, 2019, **49**(2): 209–212.

(上接第 5 页)

### 参考文献

- [1] 史衍丽. 第三代红外探测器的发展与选择 [J]. *红外技术*, 2013, **35**(1): 1–8.
- [2] Rogalski A. New Material Systems for Third Generation Infrared Detectors [C]. *SPIE*, 2009, **7388**: 73880J.
- [3] Razeghi M, Huang E, Nguyen B, et al. Type-II Antimonide-based Superlattices for the Third Gen-

eration Infrared Focal Plane Array [C]. *SPIE*, 2010, **7660**: 76601F.

- [4] Rogalski A, Antoszewski J, Faraone L. Third-generation Infrared Photodetector Arrays [J]. *J Appl Phys*, 2009, **105**(9): 1–44.
- [5] Frank F, Bürkle L, Pletschen W, et al. InAs/Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>Sb Infrared Superlattice Diodes: Correlation Between Surface Morphology and Electrical Performance [C]. *SPIE*, 1999, **3794**: 41–46.