

文章编号:1001-9014(2011)06-0511-04

用于红外探测的短周期 InAs/GaSb 超晶格材料的生长

汪韬¹, 杨瑾^{1,3*}, 尹飞¹, 王警卫¹, 胡雅楠^{1,3}, 张立臣^{1,3}, 殷景致²

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119;

2. 吉林大学 集成光电子国家重点实验室, 吉林 长春 130012;

3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:用金属有机物化学气相沉积法(MOCVD)在GaSb衬底上生长InAs/GaSb超晶格,探索了最佳的生长厚度,优化了各种生长参数,并且分析了源流量控制的重要性.得到的超晶格材料的光致发光(PL)谱、X射线双晶衍射图以及表面形貌图表明,生长的超晶格材料可以响应10 μm的长波,且具有良好的表面形貌和外延层质量.

关键词:InAs/GaSb超晶格;禁带宽度;金属有机物化学气相沉积法(MOCVD);原子力显微镜(AFM);光致发光(PL)谱

中图分类号:TN215 文献标识码:A

Growth of short-period InAs/GaSb superlattices for infrared sensing

WANG Tao¹, YANG Jin^{1,3*}, YIN Fei¹, WANG Jing-Wei¹, HU Ya-Nan^{1,3},
ZHANG Li-Chen^{1,3}, YIN Jing-Zhi²

(1. State Key Laboratory of Transient Optics and Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Jilin University, Changchun 130012, China;

3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The InAs/GaSb superlattice were prepared by metal organic chemical vapor deposition (MOCVD) on GaSb substrate. The optimized thickness and the various growth parameters were explored as well as the importance of source flux control. The photoluminescence (PL) spectra, x-ray diffraction data (XRD) and the surface topography map showed that the superlattice can response to incident light with long wavelength of 10 μm, and has good surface morphology and epitaxial layer quality.

Key words: InAs/GaSb superlattice; band gap; metal organic chemical vapor deposition (MOCVD); atomic force microscope (AFM); PL spectra

PACS: 78.66. Fd, 81.15. Gh, 85.30. De, 85.60. Gz

引言

红外技术作为光电技术研究中的一个重要的高科技发展领域,在军事和国民建设中占举足轻重的地位.与分子束外延(MBE)相比,用金属有机物化学气相沉积法(MOCVD)生长超晶格更利于大规模生产,具有很好的经济效益.红外探测器是红外系统的核心部件,在红外技术发展中起着关键和主导的作用.对于红外探测器,目前最常用的是InSb、HgCdTe,但都要求在低温下工作,需要专门的制冷

设备,造价昂贵,应用受到限制.而InAs/GaSb超晶格由于其材料的特殊性质,是目前最有可能实现室温工作的第三代红外探测器.自从Smith和Malhiot提出基于InAs/GaInSb应变层的超晶格(Strain Layer Superlattices, SLS)^[1],人们已注意到InAs/GaSb II型超晶格材料的带隙变化范围宽,做成的探测器波长可覆盖2~30 μm,与HgCdTe探测器相比具有低的暗电流、高的工作温度、小的俄歇复合率以及更好的空间均匀性^[2-5].虽然应变超晶格结构已提出了十多年,但是国内基于应变超晶格的实验报道很少.

收稿日期:2010-07-24,修回日期:2011-04-11

基金项目:国家自然科学基金(60676039)

作者简介:汪韬(1975-),男,陕西汉中,人,博士,副研究员,主要从事半导体光电探测器和太阳能电池方面的研究,E-mail:wangtao@opt.ac.cn.

*通讯作者:E-mail:yjn0131@163.com.

Received date: 2010-07-24, revised date: 2011-04-11

1 理论

第二类 InAs/GaSb 半导体超晶格带边结构,即 InAs 导带最小值比 GaSb 的价带最大值还要低. InAs/GaSb 异质结能带相对位置见图 1.

从图 1 中可见 InAs 和 GaSb 的禁带完全错开,使得电子和空穴在空间上分离. 电子和空穴被限制在不同的结构层中,形成了 GaSb 空穴势阱和 InAs 电子势阱,即电子和空穴被分别限制在 InAs 和 GaSb 薄层内,这样就可以通过控制生长参数,来调节超晶格的禁带宽度.

超晶格的有效禁带宽度与超晶格层厚度和材料等设计参数有关. 计算 InAs/GaSb II 型超晶格能带结构最普遍的方法是利用哈密顿算子基于包络函数近似的形式. 在包络函数近似时假设超晶格是一个理想的周期系统,故可以直接利用标准形式的 $k \cdot p$ 理论,其唯一输入参量就是超晶格中的材料. 从而建立了禁带宽度与超晶格材料之间的对应关系. 有了这个对应关系,就可以设计合适的超晶格周期和层厚,实现超晶格材料禁带宽度的裁剪,以响应 $10 \mu\text{m}$ 以上的长波. 图 2 所示是 D. L. Smith 等人通过计算获得的在相同 InAs 和 GaSb 层厚时 [111] 超晶格的禁带宽度随厚度的变化,其中厚度以单层 (monolayer) 为单位.

理论和实验证明控制超晶格各层的厚度和周期可实现对带隙和能带结构的裁剪,但是,随着超晶格单层厚度的增加,集中在 InAs 中的电子的限制能级会下降,而集中在 GaSb 中的空穴的限制能级将往上升,当超晶格厚度继续增加使得电子能级低于空穴能级时,超晶格的禁带宽度将趋于零,甚至产生负带隙现象^[6].

2 实验与讨论

用金属有机物化学汽相淀积 (MOCVD) 法通过

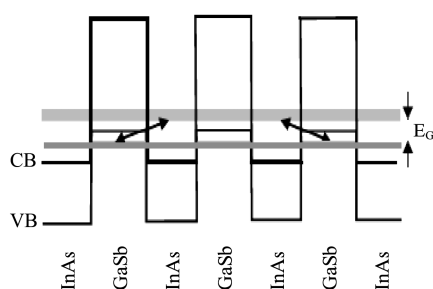


图 1 InAs/GaSb II 型超晶格的能带图
Fig. 1 Band edge diagram of InAs/GaSb superlattice

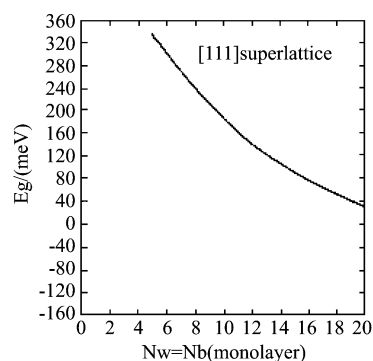


图 2 InAs/GaSb [111] SL 的禁带宽度随层厚的变化关系,SL 由等厚的 InAs 和 GaSb 层组成,厚度以单分子层 (monolayer) 为单位

Fig. 2 Bandgap of InAs/GaSb [111] SL as a function of layer thickness. The SL consists of equally thick InAs and GaSb layers (thickness of the monolayer as unit)

自主研发的 MOCVD 机器在低压 (100 Torr) 下生长 InAs/GaSb II 型超晶格,探索最佳的生长厚度和优化各种生长参数.

在 n 型 GaSb 衬底 (100) 上进行 InAs/GaSb 超晶格的生长,经过多次的试验比较,得出的生长条件和优化参数如下:外延生长所用的衬底为 n 型 GaSb 单面抛光单晶片, GaSb 衬底晶向为 (100),在反应生长之前先对 GaSb 衬底进行 585°C 高温处理,以除去衬底表面的氧化物. 根据 E_g 与 InAs、GaSb 层厚的关系以及现有设备和条件,选择了合适的生长参数,优化了生长过程. 首先,生长一层 GaSb 缓冲层;然后,生长约 $0.1 \mu\text{m}$ 厚的 GaSb 层;再次,生长 10 个周期的 InAs/GaSb 超晶格层,超晶格周期约为 $16 \sim 20 \text{ nm}$, InAs 和 GaSb 采用相等的厚度均为 8 nm ;最后,生长约 $0.1 \mu\text{m}$ 厚的 GaSb 层. 超晶格结构如图 3 所示. 其中, GaSb 缓冲层、GaSb 层的生长温度分别为 500°C 、 520°C ;生长时间分别为 1 min 、 10 min . 超晶格的生长温度为



图 3 InAs/GaSb 超晶格结构图
Fig. 3 The diagram of InAs/GaSb SL structure

520℃, InAs 层和 GaSb 层的生长时间均为 1 min, 交替生长. 特别要注意的是, 在生长超晶格材料时, 为了得到陡峭的超晶格界面, 防止在更换通入机源时产生 GaAs 和 InSb, 影响超晶格质量, 采用的有机源流量控制见图 4. 具体操作为在 InAs 生长前后引入 $t(1 \sim 3 \text{ s})$ 的 As_2H_3 流量中断, 在 GaSb 生长前后引入 $t(1 \sim 3 \text{ s})$ 的 TMSb 流量中断. 每两层超晶格材料生长之间停留 $t_2(3 \sim 5 \text{ s})$ 的时间. 为了研究特殊源流量控制对生长超晶格质量的影响, 分别生长了两组超晶格材料, 一组采用如上所设计的特殊源流量控制, 一组采用同时关断、打开有机源的一般源流量控制, 并且对比了两种样品在 77 K 下的光致发光(PL)谱, 发现采用一般源流量控制生长的样品未观察到明显的 PL 谱, 而采用特殊源流量控制生长的样品观察到了明显的 PL 谱.

样品在 77 K 下的光致发光谱(PL)见图 5. PL 谱的测量采用配置了锗/溴化钾(Ge/KBr)分光镜和中红外 HgCdTe 探测器的傅里叶变换红外光谱仪^[7-9], 红光泵浦源选用 514.5 nm、功率 80 mW 的氩激光器.

从图 5 可以看出在波数接近 1000 时, 光致发光密度达到最大, 此时, 对应的光致发光波长在 10.713 μm 附近, 半高全宽 FWHM 约 41.8 meV, 比较窄.

理论和实验表明, 超晶格材料的光学性能和电学性能在很大程度上受到材料表面形貌和外延层质量的影响. 样品表面 10 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 区域内的表面形貌图如图 6 所示, 从图中可以看出, 超晶格材料表面 10 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 区域内具有较清晰和平滑的形貌.

窄角度范围 InAs/GaSb 超晶格样品双晶 X 射线衍射曲线图如图 7 所示. 由图可见, 外延生长的 InAs/GaSb 超晶格结构经过 X 射线衍射观察到 6 个尖锐的卫星峰, 说明外延层没有明显的弛豫现象.

结果表明, 制作的超晶格材料响应到 10 μm 长

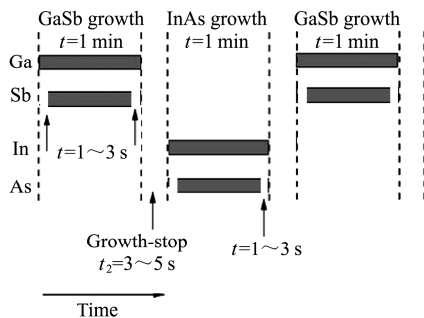


图 4 有机源流量控制示意图
Fig. 4 Flux diagram of the organic source

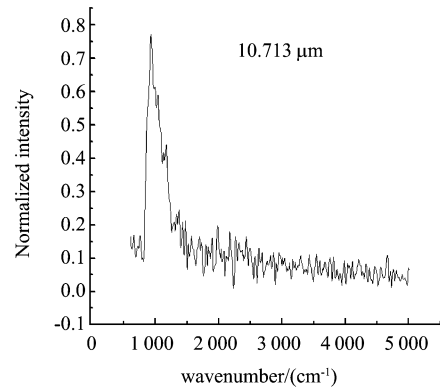


图 5 InAs/GaSb 超晶格在 77 K 下的 PL 谱, 横坐标表示波长的倒数波数(1/λ)
Fig. 5 The PL spectra of the SL grown adopting the source flux control at 77 K

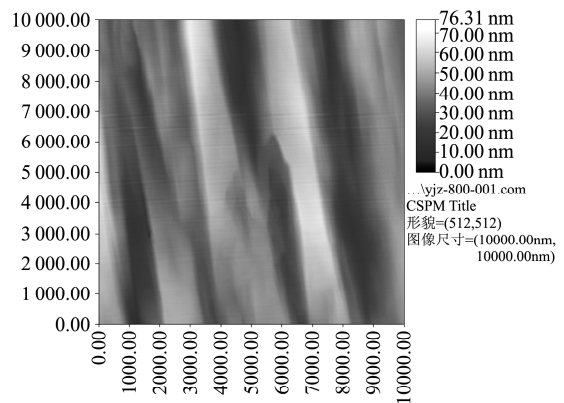


图 6 用 AFM 得到的 InAs/GaSb 超晶格材料表面形貌图
Fig. 6 The AFM image of the surface of the InAs/GaSb SL

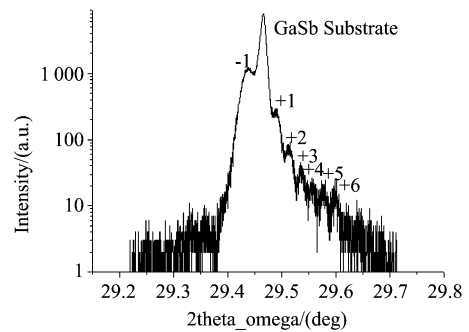


图 7 窄角度范围 InAs/GaSb 超晶格样品双晶 X 射线衍射曲线
Fig. 7 A narrow angle range of X-ray diffraction(XRD) data of the SL layers

波, 具有较窄禁带宽度和良好的能带结构, 且各层参数的一致性较好. 但是实际中为了得到相同禁带宽度的超晶格材料, 实验生长的超晶格厚度往往比理
(下转 550 页)

像信息更多了、细节更清楚了,这与定性分析中人眼的主观观察结果一致。但是,实验中也发现图像处理时间因阈上随机共振而延长,而且,随机共振次数增加,效果随之改善,但耗时更长。

5 结论

对于弱信号双色中波红外图像的融合,增加随机共振环节,可以使原弱信号图像得到复原,融合图像的细节更清楚、信息更丰富,更利于目标识别。但是本方法的执行效率较低,下一步将研究在保证一定融合效果的条件下降低算法复杂度的方法。

REFERENCES

- [1] YANG Feng-Bao, NI Guo-Qiang, ZHANG Lei. Images fusion of subdivision band MWIR based on wavelet packet transform[J]. *J. Infrared and Millim. Waves* (杨风暴,倪国强,张雷. 红外中波细分波段图像的小波包变换融合研究. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(4): 275 - 279.
- [2] YANG Feng-Bao, LIN Su-Zhen, LENG Min. Fusion of dual color MWIR images based on segmentation and support value transform[J]. *J. Infrared and Millim. Waves* (杨风暴, 蔺素珍, 冷敏. 双色中波红外图像的分割支持度变换融合. *红外与毫米波学报*), 2010, **29**(5): 362 - 366.
- [3] Zheng S, Shi W Z, Liu J, et al. Multisource image fusion method using support value transform[J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2007, **16**(7): 1831 - 1839.
- [4] Benzi R, Sutera A, Vulpiani A. The mechanism of stochas-

(上接 513 页)

论计算值大^[10-12],除了算法的近似外,主要是由于理论计算采用了一系列的理想化假设,如理想的超晶格、晶格完全匹配、界面陡峭、光滑、无缺陷等^[6]。而实际中是不可能达到这种理想效果的,因此,实验值和理论值之间存在一定的差异。

3 结论

采用自制的 LP—MOCVD 技术,在(100)面 n 型 GaSb 衬底上外延生长了 II 型 InAs/GaSb 超晶格材料。合理设计了生长温度、过渡层、界面层、源流量控制等影响超晶格质量的生长参数。分别用 AFM 法和 XRD 法对其表面形貌和超晶格质量进行了分析,并得到其在 77K 温度下的 PL 谱。这些分析说明生长的超晶格材料可以响应到 10 μm 的长波,且具有较好的表面形貌和外延层质量。

致谢 感谢中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室在 PL 谱测试方面给予的帮助。

tic resonance[J]. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 1981, **14**(11): 453 - 457.

- [5] Das A, Stock N G, Hins E L. Enhanced coding for exponentially distributed signals using supra-threshold stochastic resonance[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2009, **14**(1): 223 - 232.
- [6] Sasaki H, Sakane S, Ishida T, et al. Supra threshold stochastic resonance in visual signal detection[J]. *Behavioral Brain Research*, 2008, **193**(1): 152 - 155.
- [7] Sasaki H, Todorokihara M, Ishida T, et al. Effect of noise on the contrast detection threshold in visual perception[J]. *Neuroscience Letters*, 2006, **408**(2): 94 - 97.
- [8] XUE Ling-Yun. Study on application of neural stochastic resonance in speech and image processing[D]. Hangzhou: Zhejiang University (薛凌云. 神经元随机共振机制及其在语音与图像处理中的应用研究. 杭州:浙江大学), 2008: 67 - 83.
- [9] XIANG Xue-Qin, FAN Ying-Le, PANG Quan, et al. Research on gray-scale image restoration based on neuron supra-threshold a periodic stochastic resonance mechanism[J]. *Journal of Image and Graphics* (向学勤, 范影乐, 庞全, 等. 基于神经元阈上非周期随机共振机制的灰度图像复原研究. *中国图象图形学报*), 2009, **14**(1): 77 - 81.
- [10] GUO Zhe-Wei, PANG Quan, FAN Ying-Le. Application of stochastic resonance mechanism to speech enhancement in strong noise environment[J]. *Computer Simulation* (郭浙伟, 庞全, 范影乐. 随机共振在强噪声环境中语音增强应用. *计算机仿真*), 2009, **26**(7): 351 - 353.
- [11] Stocks N G. Supra-threshold stochastic resonance: an exact result for uniformly distributed signal and noise[J]. *Physics Letters A*, 2001, **279**(1): 308 - 312.

REFERENCES

- [1] Smith D L, Mailhot C. Proposal for strained type II superlattice infrared detectors[J]. *J. Appl. Phys*, 1987, **62**(6): 2545 - 2548.
- [2] Sullivan G J, Ikhlassi A, Bergman J, et al. Compositional variations in MBE grown InAs/GaSb superlattices for infrared detector applications[J]. *Infrared Technology and Applications*, 2005, **5783**: 131 - 137.
- [3] Grein C H, Young P M, Ehrenreich H. Minority carrier life-times in ideal InGaSb/InAs superlattices [J]. *Appl. Phys. Lett*, 1992, **61**(24): 2905 - 2907.
- [4] Miles R H, Chow D H, Schulman J N, et al. Infrared optical characterization of InAs/Ga_{1-x}In_xSb superlattices [J]. *Appl. Phys. Lett*, 1990, **57**(8): 801 - 803.
- [5] Johnson J L, Samoska LA, Goddard AC, et al. Electrical and optical properties of infrared photodiodes using the InAs/Ga_{1-x}In_xSb superlattice in heterojunctions with GaSb [J]. *J. Appl. Phys*, 1996, **80**(2): 1116 - 1127.
- [6] Johnson N F, Ehrenreich H, Hui PM, et al. Electronic and optical properties of III-V and II-VI semiconductor superlattices[J]. *Phys. Rev*, 1990, **B41**(6): 3655 - 3669.
- [7] Shao J, Lu W, Lu X, et al. Modulated photoluminescence spectroscopy with a step-scan Fourier transform infrared spectrometer[J]. *Rev. Sci. Instrum*, 2006, **77**(6): 063104-6.

(下转 555 页)

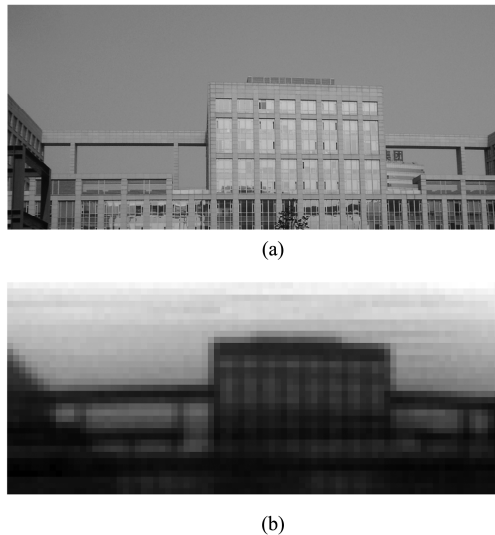


图5 建筑物被动毫米波成像实验结果 (a)实物图 (b)毫米波图像

Fig.5 Passive millimeter-wave imaging results (a) visible image (b) millimeter-wave image

程中的信号转换及噪声特性进行了分析,讨论了影响信号检测性能的主要因素.通过搭建毫米波辐射计扫描成像实验系统进行了室外成像实验,验证了采用光子学技术的被动毫米波成像的可行性.该成像方法在光波频率处理毫米波信号具有带宽高的优点,辐射计中光信号传输使用光纤,具有体积小和重量小、抗电磁干扰的优点.被动毫米波成像中的图像去噪、图像畸变校正、超分辨率处理等问题需要进一步研究,以提高成像质量.本文所提的方法还可以扩展应用于微波、太赫兹波段并应用于被动综合孔径成像系统,不仅大大降低体积重量,还可以实时成像,在航空航天平台被动成像应用方面具有广阔的应用前景.

REFERENCES

[1] Yujiri L, Shoucri M, Moffa P. Passive millimeter-wave imaging[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2003, **4**(3):39-50.

- [2] WANG Hua-Li, LI Xing-Guo, PENG Shu-Sheng, *et al.* Passive millimeter wave imaging techniques[J]. *J. Infrared Millim. Wave* (王华力,李兴国,彭树生,等.被动毫米波成像技术. *红外与毫米波学报*), 1997, **16**(4):297-302.
- [3] ZHANG Guang-Feng, ZHANG Zu-Yin, GUO Wei. Research on 3mm band radiometric imaging[J]. *J. Infrared Millim. Wave* (张光锋,张祖荫,郭伟.3 mm 波段辐射成像研究. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(6):422-426.
- [4] Seeds A J. Microwave photonics[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, **50**(3):877-887.
- [5] Yao J P. Microwave photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*. 2009, **27**(3):314-335.
- [6] Blanchard P M, Greenaway A H, Harvey A R, *et al.* Coherent optical beam forming with passive millimeter-wave arrays[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, **17**(3):418-425.
- [7] Schuetz C A, Mirotznik M S, Shi S, *et al.* Optical techniques for sparse-aperture, millimeter-wave imaging[J]. *Passive Millimeter-Wave Imaging Technology IX*. 2006, **6211**:68004.
- [8] HE Yun-Tao, JIANG Yue-Song, WANG Chang-Wei. Application of electro-optic modulation in passive synthetic aperture imaging detection[J]. *Acta Optica Sinica* (何云涛,江月松,王长伟.电光调制在被动综合孔径成像探测中的应用. *光学学报*), 2008, **28**(6):1201-1207.
- [9] Schuetz C A, Samluk J, Chen C, *et al.* Millimeter-wave imaging using optical upconversion detectors[J]. *Proceedings of SPIE - Electro-Optical Remote Sensing, Detection, and Photonic Technologies and Their Applications*. 2007, **6739**:67390R.
- [10] Schuetz C A, Murakowski J, Schneider G J, *et al.* Radiometric millimeter-wave detection via optical upconversion and carrier suppression[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2005, **53**(5):1732-1738.
- [11] Shi Y, Yan L, Willner A E. High-speed electrooptic modulator characterization using optical spectrum analysis[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, **21**(10):2358-2367.
- [12] ZOU Yan, FENG Li-Shuang, ZHANG Chun-Xi, *et al.* The application of lock-in amplifier in the detection of weak signal[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation* (邹燕,冯丽爽,张春熹,等.锁定放大器在微弱光信号检测中的应用. *电测与仪表*), 2005, **42**(11):15-17.

(上接 550 页)

[8] Shao J, Lu X, Lu W, *et al.* Cutoff wavelength of $Hg_{1-x}Cd_xTe$ epilayers by infrared photoreflectance spectroscopy[J]. *Appl. Phys. Lett*, 2007, **90**(17):171101-3.

[9] Shao J, Ma L, Lü X, *et al.* Evolution of infrared photoreflectance line shape with temperature in narrow-gap $HgCdTe$ epilayers[J]. *Appl. Phys. Lett*, 2008, **93**(13):131914-3.

[10] Brown G. J, Szmulowicz F, Haugan H, *et al.* Design of InAs/Ga(In)Sb superlattices for infrared sensing[J]. *Mi-*

croelectronics Journal, 2005, **36**(3-6):256-259.

- [11] Rodriguez JB, Christol P, Chevrier F, *et al.* Optical characterization of symmetric InAs/GaSb superlattices for detection in the $3.5\mu m$ spectral region[J]. *Physica E*, 2005, **28**(2):128-133.
- [12] Haugana HJ, Szmulowicz F, Brown G. J, *et al.* Short-period InAs/GaSb type-II superlattices for mid-infrared detectors[J]. *Appl. Phys. Lett*, 2005, **87**(26):261106-3.