

GaAs 基 GaSb 体材料及 InAs/GaSb 超晶格材料的 MBE 生长*

郝瑞亭 徐应强 周志强 任正伟 牛智川†

(中国科学院半导体研究所 超晶格国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 采用分子束外延方法在 GaAs(100)衬底上生长 GaSb 体材料, 以此 GaSb 为缓冲层生长了不同 InAs 厚度的 InAs/GaSb 超晶格, 其 10K 光致发光谱峰值波长在 2.0~2.6 μm . 高分辨透射电子显微镜观察证实超晶格界面清晰, 周期完整.

关键词: 分子束外延; GaAs; GaSb; InAs/GaSb 超晶格

PACC: 7360F; 7280E; 6855

中图分类号: TN304.2⁺3

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)07-1088-04

1 引言

InAs/GaSb II 型超晶格作为一种极具潜力的红外材料受到人们越来越多的关注^[1~4]. 与传统的红外材料相比, 如碲铬汞(MCT)和量子阱红外探测器(QWIPs), InAs/GaSb II 型超晶格导带微带与价带微带间隙可调, 因此具有很宽的光吸收响应范围(2~30 μm), 并能有效抑制俄歇复合^[5], 有可能实现室温下高性能红外探测器^[6,7], 因此被认为是制造第三代红外探测器的最理想新型材料之一.

目前 InAs/GaSb II 型超晶格大都在晶格匹配的 GaSb 衬底上生长. 但由于 GaSb 衬底价格昂贵、无半绝缘衬底、工艺复杂等原因, 寻求在新的基片如 GaAs 衬底上生长 GaSb 体材料, 从而实现 InAs/GaSb 超晶格的生长成为国际上众多研发单位新的技术路线. 而且, GaAs 基 p-GaSb/n-GaAs 结构可以实现高效率的热光伏电池, 是目前的一个研究热点^[8,9]. 因此在 GaAs 衬底上制备出高质量的 GaSb 体材料具有多方面的重要价值. 但是 GaAs 与 GaSb 之间失配较大(~7%应变), 很容易在 GaSb 外延层内产生大量失配位错^[10,11]. 因此首先要在 GaAs 上生长出低位错密度 GaSb 体材料, 才能进一步生长出 InAs/GaSb II 型短周期超晶格. 采用具有原子级精度控制的分子束外延(MBE)技术是可行的方法之一.

本文研究了 MBE 方法在 GaAs 衬底上生长 GaSb 体材料, 通过优化生长参数, 得到了高质量的

GaSb 体材料. 采用原子力显微镜(AFM)、霍尔效应(Hall effect)、光致发光谱(PL)等方法表征了材料质量. 以此 GaSb 为过渡层, 进一步成功生长超短周期 InAs/GaSb 超晶格材料. 采用光致发光谱、高分辨率透射电子显微镜(HRTEM)等手段表征了材料质量.

2 实验

首先在 GaAs(100)衬底上生长了 GaSb 体材料. 采用的设备为 VG V80H MKII MBE 系统. Sb_4 和 As_4 是由传统的 K-cells 提供的. 外延过程包括: 在 580 $^\circ\text{C}$ 下, 先生长厚度为 500nm 的 GaAs 缓冲层, 然后生长 1 μm 厚的 GaSb 层. 对比了不同的生长温度: 400 $^\circ\text{C}$, 450 $^\circ\text{C}$ 和 500 $^\circ\text{C}$, 及不同的生长速率: 0.15, 0.25, 0.5 和 1 $\mu\text{m}/\text{h}$. Sb_4 和 Ga 的束流比在 3.3~11 之间变化. 生长过程中表面形貌由反射式高能电子衍射(RHEED)进行原位监测. 然后在 GaSb 缓冲层上进行了 InAs/GaSb II 型超晶格的生长. 其中 InAs 层的厚度分别为 2 和 4ML, GaSb 层厚度为 8ML. 生长温度为 400 $^\circ\text{C}$. InAs 的生长速率为 0.1 $\mu\text{m}/\text{h}$, GaSb 的生长速率为 0.25 $\mu\text{m}/\text{h}$.

3 结果与讨论

首先对比了不同 Sb_4 和 Ga 的 V/III 束流比和衬底生长温度对 GaSb 材料最小表面粗糙度和最大 Hall 迁移率等质量特征的影响. 表1为生长速率为

* 国家自然科学基金资助项目(批准号:60607016,60625405)

† 通信作者. Email: zcnui@red.semi.ac.cn

2007-01-23 收到, 2007-02-05 定稿

表 1 不同衬底温度下制备样品的 RMS($10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$)和室温空穴迁移率

Table 1 Best RMS surface roughness($10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$) and room-temperature hole mobilities of samples obtained at different substrate temperatures

sample	RMS surface roughness/nm	Hall Mobility /($\text{cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$)	substrate temperature/ $^\circ\text{C}$
Vg051204	0.569	572	400
Vg060402	0.60	618	450
Vg051109	0.563	626	500

$1\mu\text{m}/\text{h}$ 时,在三种温度下所获得的最小表面粗糙度、最大 Hall 迁移率样品的参数表.可以看出,在衬底温度为 500°C 时,GaSb 材料的均方根表面粗糙度最小,仅为 0.563nm ($10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$),Hall 迁移率最大,为 $626\text{cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$. 固定这个最佳的温度和 V/III 束流比,可以进一步对比生长速率对材料表面粗糙度的影响.采用 $0.15, 0.25, 0.5$ 和 $1\mu\text{m}/\text{h}$ 不同的生长速率.经 AFM 测试发现:以 $0.25\mu\text{m}/\text{h}$ 的生长速率生长的样品其表面粗糙度最小,为 0.1nm ($2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$),如图 1 所示.原子台阶清晰可见,表面平整,没有螺位错.更低的生长速率($0.15\mu\text{m}/\text{h}$)得到的样品表面粗糙度比高速率($0.25\mu\text{m}/\text{h}$)的大,这是因为,生长速率足够低时,Ga 原子的迁移长度很大,有足够的时间到达自由能最低的晶格位置,即由大的晶格失配引入的缺陷位置.原子不断地在缺陷位置周围聚集,形成岛,故而使表面粗糙度变大^[12].

图 2 所示为该样品 10K 温度下的 PL 谱.经过 $550^\circ\text{C}, 30\text{s}$ 的快速热退火处理后的样品的 PL 谱也在图中示出.可以看出,未退火样品的 PL 谱峰值波长为 $1.59\mu\text{m}$,FWHM 为 38meV .退火后的样品 PL 谱峰值波长为 $1.58\mu\text{m}$,FWHM 为 20meV .与退火前的样品相比, $550^\circ\text{C}, 30\text{s}$ 的快速热退火可以明显

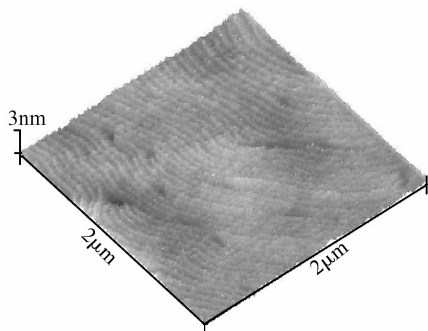


图 1 $0.25\mu\text{m}/\text{h}$ 速率生长的 $1\mu\text{m}$ 厚 GaSb 膜的原子力形貌
样品是在 500°C 衬底温度和 5.5 的 V/III 束流比条件下制备的
Fig. 1 AFM image of the surface of $1\text{-}\mu\text{m}$ -thick GaSb layer grown at $0.25\mu\text{m}/\text{h}$ The sample was grown under Sb_4 :Ga flux ratio of 5.5 at a growth temperature of 500°C .

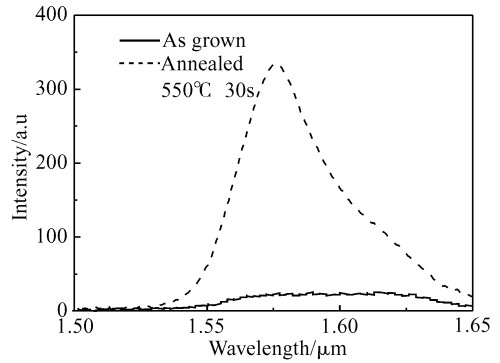


图 2 $550^\circ\text{C}, 30\text{s}$ 退火后样品与未退火样品的 10K PL 谱
Fig. 2 10K PL spectra of the samples of as grown and annealed at 550°C for 30s

使 PL 谱峰值强度增加 14 倍,FWHM 显著减小.有可能是退火消除了位错缺陷等非辐射复合中心.

在此 GaSb 缓冲层上,进一步生长了 InAs (2ML)/GaSb(8ML)超晶格,采用高分辨透射电子显微镜进行测试.如图 3 所示,可清楚观察到无晶格缺陷的超晶格结构(白色为 GaSb 子层,黑色为 InAs 子层).界面处的波动主要是 InAs 层中的 As 与下层的 Sb 原子发生交混^[13]所造成的.图 4 给出了 10K 和 300K 温度下测得的 PL 谱.10K 温度下 PL 谱峰值波长为 $2.03\mu\text{m}$,峰值半宽 (FWHM) 为 25meV .300K 温度下的 PL 谱峰值波长为 $2.2\mu\text{m}$,FWHM 为 60meV .随着测量温度的升高,荧光峰发生了明显的红移,这是因为超晶格的禁带宽度随温度升高而减小的缘故^[14],FWHM 变大.

在前面工作的基础上,我们研究了不同厚度 InAs 层对超晶格材料光谱特性的影响.图 5 为 InAs 层厚度分别为 4ML 和 2ML 的 InAs/GaSb 超晶格的低温 PL 谱.前者的 PL 谱峰值波长为 $2.6\mu\text{m}$,

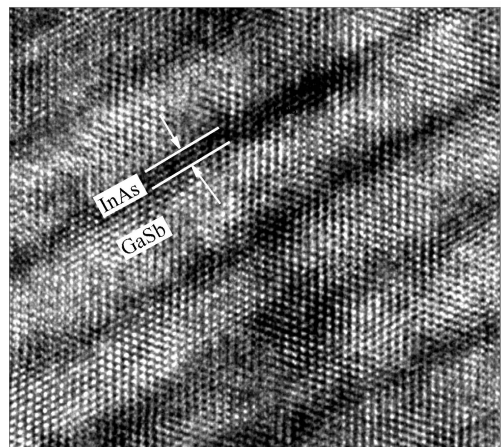


图 3 InAs(2ML)/GaSb(8ML)超晶格的 HRTEM 像
Fig. 3 HRTEM image of InAs(2ML)/GaSb(8ML) SLs

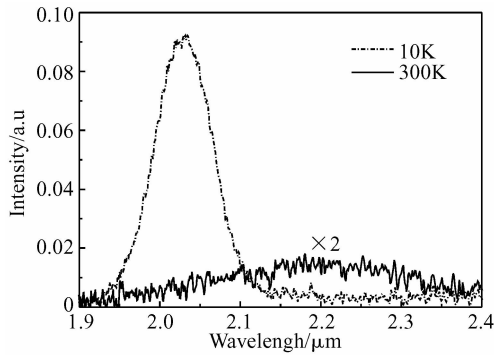


图 4 10K 和 300K 温度下测得的 InAs(2ML)/GaSb(8ML) 超晶格的 PL 谱

Fig. 4 10K and 300K PL spectra of the InAs(2ML)/GaSb(8ML) SLs

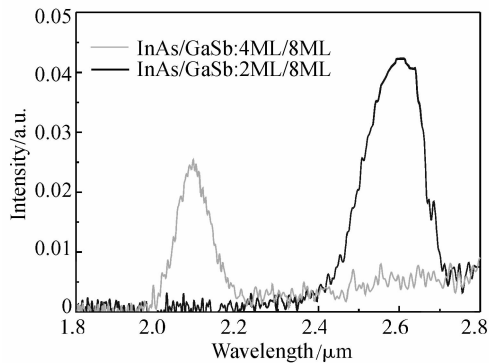


图 5 10K 温度下测得的 InAs(4ML)/GaSb(8ML) 和 InAs(2ML)/GaSb(8ML) 超晶格的 PL 谱

Fig. 5 10K PL spectra of the InAs(4ML)/GaSb(8ML) and InAs(2ML)/GaSb(8ML) SLs

FWHM 为 31meV. 后者 PL 谱峰值为 $2.09\mu\text{m}$, FWHM 为 29meV. 结果显示, InAs 层厚度的增加显著拓展了超晶格的 PL 谱的峰值波长, 但峰值强度和 FWHM 没有明显变化. 验证了通过调节 InAs 和 GaSb 的厚度, 使超晶格响应波长覆盖 $2\sim 3\mu\text{m}$, 而且材料质量稳定的事实.

4 结论

研究了 GaAs(100) 基 GaSb 体材料和 InAs/GaSb II 型超晶格分子束外延的生长方法. 测试结果表明采用较高的衬底温度 (500°C)、适当的 V/III 比和较低的生长速率 ($0.25\mu\text{m/h}$) 有助于提高表面平

整度. 在此 GaSb 缓冲层上可以生长出不同周期高质量 InAs/GaSb 超晶格, 其 10K 温度下 PL 谱峰值波长达到 $2.0\sim 2.6\mu\text{m}$. 这种 GaAs 基 GaSb 体材料和 InAs/GaSb 超晶格是制造下一代高效热光伏电池、第三代大面阵红外探测器的重要材料.

参考文献

- [1] Johnson J L, Samoska L A, Gossard A C, et al. Electrical and optical properties of infrared photodiodes using the InAs/Ga_{1-x}In_xSb superlattice in heterojunctions with GaSb. *J Appl Phys*, 1996, 80: 1116
- [2] Mohseni H, Wojkowski J, Razinegi M, et al. Uncooled InAs-GaSb type-II infrared detectors grown on GaAs substrates for the $8\sim 12\mu\text{m}$ atmospheric window. *IEEE J Quantum Electron*, 1999, 35(7): 1041
- [3] Fuchs F, Weimer U, Pletschen W, et al. High performance InAs/Ga_{1-x}In_xSb superlattice infrared photodiodes. *Appl Phys Lett*, 1997, 71: 3251
- [4] Aifer E H, Tischler J G, Warner J H, et al. W-structured type-II superlattice-based long- and very long wavelength infrared photodiodes. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5732: 259
- [5] Smith D L, Mailhot C. Proposal for strained type II superlattice infrared detectors. *J Appl Phys*, 1987, 62: 2545
- [6] Youngdale E R, Meyer J R, Hoffman C A, et al. Auger lifetime enhancement in InAs/Ga_{1-x}In_xSb superlattices. *Appl Phys Lett*, 1994, 64: 3160
- [7] Mohseni H, Litvinov V I, Razinegi M. Interface-induced suppression of the Auger recombination in type-II InAs/GaSb superlattices. *Phys Rev B*, 1998, 58: 15378
- [8] Wang C A, Huang R K, Shiao D A, et al. Monolithically series-interconnected GaInAsSb/AlGaAsSb/GaSb thermophotovoltaic devices with an internal backsurface reflector formed by wafer bonding. *Appl Phys Lett*, 2003, 83: 1286
- [9] Huang S H, Balakrishnan G, Khoshakhlagh A, et al. Strain relief by periodic misfit arrays for low defect density GaSb on GaAs. *Appl Phys Lett*, 2006, 88: 131911
- [10] Zhang Y, Baruch N, Wang W I. Normal incidence infrared photodetectors using intersubband transitions in GaSb L-valley quantum wells. *Appl Phys Lett*, 1993, 63: 1068
- [11] Johnson G R, Cavenett B C, Kerr T M, et al. Optical, Hall and cyclotron resonance measurements of GaSb grown by molecular beam epitaxy. *Semicond Sci Technol*, 1988, 3: 1157
- [12] Hao Ruiting, Xu Yingqiang, Zhou Zhiqiang, et al. Growth of GaSb layers on GaAs(001) substrate by molecular beam epitaxy. *J Phys D: Appl Phys*, 2007, 40: 1080
- [13] Haugan H J, Szmulowicz F, Mahalingam K, et al. Short-period InAs/GaSb type-II superlattices for mid-infrared detectors. *Appl Phys Lett*, 2002, 87: 261101
- [14] Shen Xuechu. Optical spectrum and optical properties of semiconductors. Beijing: Science Press, 2002: 125 (in Chinese)[沈学础. 半导体光谱和光学性质. 北京: 科学出版社, 2002: 125]

GaSb Bulk Materials and InAs/GaSb Superlattices Grown by MBE on GaAs Substrates*

Hao Ruiting, Xu Yingqiang, Zhou Zhiqiang, Ren Zhengwei, and Niu Zhichuan[†]

(*State Key Laboratory of Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

Abstract: GaSb thick layers were grown by molecular beam epitaxy on GaAs(100)substrates. High quality InAs/GaSb superlattices(SLs)with different InAs thicknesses were grown on GaSb buffer layers on GaAs substrates. The peak wavelengths of photoluminescence spectra at 10K are between $2\sim 2.6\mu\text{m}$. High-resolution transmission electron microscopy shows that the SLs have clear interface and integrated periods.

Key words: molecular beam epitaxy; GaAs; GaSb; InAs/GaSb superlattices

PACC: 7360F; 7280E; 6855

Article ID: 0253-4177(2007)07-1088-04

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos.60607016,60625405)

[†] Corresponding author. Email: zniu@red.semi.ac.cn

Received 23 January 2007, revised manuscript received 5 February 2007

©2007 Chinese Institute of Electronics