

InAs/GaSb II 类超晶格电学性能研究

邢伟荣, 刘 铭, 周 朋, 周立庆
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 为了提高 InAs/GaSb 超晶格探测器性能和工作温度, 研究了超晶格吸收层载流子输运性能。利用分子束外延在半绝缘 GaAs 衬底上生长 InAs/GaSb 超晶格材料, 用霍尔测试表征材料电学性能, 研究了不同条件, 包括退火、束流比和在超晶格不同材料层的掺杂对超晶格电学性能的影响。

关键词: InAs/GaSb; II 类超晶格; 电学性能; 霍尔测试

中图分类号: TN213 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2019.06.015

Research on electrical properties of InAs/GaSb type II superlattice

XING Wei-rong, LIU Ming, ZHOU Peng, ZHOU Li-qing
(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: To improve the performance and the work temperature of InAs/GaSb type II superlattice photo-detectors, the transport performance of super-lattice absorption layer carriers is studied in this paper. InAs/GaSb type II superlattices materials are grown on semi-insulating GaAs substrates by molecular-beam epitaxy (MBE). Hall measurement is used to characterize the electrical properties of the materials, and the effects of different growing conditions, including annealing, beam ratio and doping in different layers of the superlattice, on the electrical properties of the superlattice are studied.

Key words: InAs/GaSb; type II superlattice; electrical properties; Hall measurement

1 引 言

InAs/GaSb II 类超晶格由诺贝尔得主 L. Esaki 于 1970 年代提出^[1], 由于其独特的量子机制和在红外探测领域的巨大应用潜力, 该低维材料在世界范围被广泛研究, 尤其在红外探测领域获得了重大进展。近 20 年来, InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器在结构设计、材料生长和器件制备方面取得了重要突破。不过目前探测器性能与其理论水平相比仍存有差距。要提高探测器性能和工作温度, 除了改进器件工艺还应该提升超晶格材料的电学性能, 因为吸收层载流子浓度和迁移率在很大程度上决定了少数载流子的寿命和扩散长度, 进而影响探测器的量子效率和探测率。

本文希望通过研究不同生长条件下超晶格长波探测器吸收层的电学性能, 找到其影响因素, 帮助提升探测器性能。通常高质量的 InAs/GaSb 超晶格材料是在晶格匹配的 GaSb 衬底上生长得到的, 然而目前通用的 GaSb 衬底均为高掺衬底, 衬底导电性良好, 采用传统的霍尔测量方法对难以得到超晶格材料的电学性能。为了测试超晶格的电学性能, 研究者开发了衬底去除技术、变磁场霍尔和迁移率谱拟合技术, 及电容—电压 (C—V) 技术等不同技术^[2]。鉴于以上技术的复杂性, 本文采用更为简单的以半绝缘的 2 in GaAs 晶圆作为外延超晶格材料衬底的方法, 尽管超晶格材料与 GaAs 衬底失配较大 (~7% 应变) 容易产生大量失配位错^[3], 但通过

缓冲层生长工艺优化,可以降低超晶格内部的失配位错密度,减小对其电学性能的影响。材料生长完成后,采用传统霍尔测试方法在 77 K 测试超晶格材料的电学性能。

2 实验

材料外延采用 2 in Si - GaAs (001) 衬底,外延设备是 DCA P600 MBE 系统,衬底采用无钢粘接的方式固定,通过裂解型砷源和锑源分别提供 As₂ 和 Sb₂,由在线离子规测试源束流,BandiT 实时测试样品温度,用腔室上配置的反射式高能电子衍射仪 (RHEED) 实时对样品表面状态观察和测试 GaAs、GaSb、InAs 生长速率。

生长流程如下:epi-ready GaAs 衬底装入 MBE 系统中,经进样室和缓冲室除气后,传送至生长室;随后将 GaAs 衬底升温至 600 °C 去除氧化层;然后降温至 670 °C 进行 GaAs 缓冲层生长,生长速率采用 0.8 ML/s;随后降温生长 GaSb 缓冲层,经前期优化,该缓冲层生长温度选择 500 °C,该温度与报道一致^[4],然后 520 °C 退火 20 min,以减少缓冲层内缺陷;最后在 400 °C 生长用于实验测试的 InAs、GaSb 单层体材料和 InAs/GaSb 超晶格材料,其中 p 型掺杂采用 Be,n 型掺杂采用 Te,材料电学性能测试均为 77K 下用霍尔方法测试。

3 结果与分析

InAs/GaSb 超晶格探测器吸收层由 InAs、GaSb 两种材料组成,为研究超晶格的电学性能,首先研究了 InAs、GaSb 单层体材料的相关性能。上述缓冲层上分别生长了 0.5 μm 厚的 InAs,1 μm 厚的 GaSb,然后利用霍尔方法测试其电学性能。虽然 InAs、GaSb 适宜生长温度均不在 400 °C 附近,但为了获得单层材料的更接近在超晶格中的性能,两种材料的生长温度均选择 400 °C。测试结果为:本征 GaSb 导电类型为 p 型,本征 InAs 导电类型为 n 型(见表 1),与报道一致。其原因为:GaSb 生长过程中,Sb 的表面迁移率低,从而形成团簇或析出,使得 GaSb 晶格中的 Sb 原子位置被 Ga 原子占据,形成 Ga 反位缺陷 (Ga_{sb})。由于 Ga 的价电子比 Sb 少,故起受主的作用,使非故意掺杂 GaSb 表现为 p 型导电特性^[5]。而本征 InAs 为 n 型则是生长过程中形成了 As_{in} 缺陷和材料表面态是施主态造成的^[6]。

为了进一步研究两种材料的电学性能,将两种材料进行退火。由于超晶格材料在大幅高于生长温度时退火,会导致界面质量变差。同以上生长温度的选择类似,InAs、GaSb 均在在 430 °C 退火,退火 15 min 后重新进行电学性能测试。发现结果发生了改变,其中 InAs 经过退火后,载流子浓度和迁移率均为上升,而 GaSb 载流子浓度下降,迁移率小幅上升。后者是由于热处理能够部分消除点缺陷,使材料中的空位减少,提高晶格完整性,消除内应力,从而降低载流子浓度、提高迁移率。但 InAs 材料的载流子浓度退火后反而上升,分析原因可能是退火温度偏离 InAs 优化生长温度较多,使得 InAs 材料质量变差,缺陷增加造成的。可以看出,高于生长温度 30 °C 退火,对 InAs、GaSb 两种材料电学性能影响不大,且退火后两种材料的电学性能变好和变差的方向不同。

表 1 本征 InAs、GaSb 体材料电学性能测试

Tab. 1 Electrical properties of intrinsic InAs、GaSb bulk materials

样品编号	工艺条件	导电类型	载流子浓度/ cm ⁻³	迁移率/ (cm ² · V ⁻¹ · s ⁻¹)
A	本征 InAs	n 型	4.93 × 10 ¹⁶	5060
A'	A 退火	n 型	5.47 × 10 ¹⁶	6480
B	本征 GaSb	p 型	5.75 × 10 ¹⁶	300
B'	B 退火	p 型	3.85 × 10 ¹⁶	360

由于本征外延的 InAs 材料通常为 n 型,本征 GaSb 为 p 型,两者载流子浓度相当,而长波吸收层超晶格周期结构中 InAs 厚度几乎达到 GaSb 的 2 倍,因此经过补偿之后超晶格吸收层通常呈 n 型,从而正常长波超晶格吸收层少子为空穴。由于少子电子比空穴具有更高的迁移率,研究表明 p 型吸收层比 n 型吸收层可以使探测器具有更高的量子效率和更低的暗电流^[7-8]。为了提高长波超晶格探测器性能,故对超晶格吸收层进行弱 p 掺杂。第二组实验对比了超晶格材料在不同材料层掺杂时,其电学性能的差异。该组实验生长了两种 InAs/GaSb 超晶格吸收层材料,周期结构分别为:14 个分子层 (ML) InAs:Be 和 8ML GaSb,14ML InAs 和 8ML GaSb:Be,掺杂分别在 InAs 和 GaSb 层进行。生长过程中 Be 掺杂源温度相同,为 760 °C,该温度下为弱掺杂。两个吸收层厚度均为 1 μm,测试结果见表 2。

表 2 超晶格中不同材料层掺杂电学性能对比

Tab.2 Comparison of electrical properties of superlattices doped in different layers

样品编号	工艺条件	导电类型	载流子浓度/ cm^{-3}	迁移率/ $(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$
I ₁	GaSb 掺杂	p 型	1.25×10^{16}	1510
I ₂	InAs 掺杂	p 型	1.35×10^{17}	547

从测试结果看出, GaSb 层掺杂时, 超晶格吸收层载流子浓度为 $1.25 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, 迁移率为 $1510 \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 而在 InAs 层掺杂时载流子浓度为 $1.35 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, 迁移率为 $547 \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 即样品 I₁ 吸收层空穴浓度只有 I₂ 的 1/10, 因此 I₁ 具有更多的光生载流子和更低的暗电流。另外 I₁ 空穴迁移率约为 I₂ 的 3 倍, 可以看出, 在 GaSb 层掺杂的样品电学性能优于在 InAs 层掺杂的样品, 其具体原因有待于进一步研究。

第三组实验对比了生长中不同 Sb/Ga 束流比对超晶格载流子浓度的影响。超晶格材料周期结构厚度同第二组实验相同, 均为 14ML InAs/8ML GaSb 结构, 选择在 GaSb 层弱掺杂, 掺杂源 Be 源温度为 730 °C。生长中 InAs 束流比 As/In 为 4, 生长 GaSb 时 Sb/Ga 束流比分别选择 3 和 6。所得样品测试结果见表 3。

表 3 超晶格生长中不同束流比对电学性能的影响

Tab.3 Comparison of electrical properties of superlattices in different Sb/Ga rate

样品编号	工艺条件	导电类型	载流子浓度/ cm^{-3}	迁移率/ $(\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1})$
I ₃	Sb/Ga 为 3	p 型	6.08×10^{16}	306
I ₄	Sb/Ga 为 6	p 型	4.75×10^{16}	879

从表 3 可以看出, 在一定范围内提高超晶格生长中 Sb/Ga 束流比, 可以降低超晶格吸收层的载流子浓度并提高载流子迁移率, 从而提高吸收层的电学性能。分析原因应该是生长过程中充足的 V 族原子 Sb 可以明显抑制 Ga 反位缺陷 (GaSb) 的形成, 从而减少残余受主浓度, 并且缺陷的减少也会减小载流子输运中对载流子迁移的影响, 因而使得空穴浓度降低和迁移率升高。

4 总 结

通过以上实验和结果分析可以得出, 在高于超晶格适宜生长温度有限范围内退火, 对吸收层其电学性能改善效果有限; 在超晶格的 GaSb 层进行弱 p

掺杂比在 InAs 层掺杂可以取得更好的效果; 优化超晶格生长中 Sb/Ga 束流比可以提高超晶格探测器吸收层的电学性能。本文通过实验探索了相关因素对超晶格探测器吸收层电学性能的影响, 对优化提升吸收层的电学性能, 从而提高超晶格红外探测器性能和工作温度有一定的参考意义。

致 谢: 感谢霍尔测试中晋舜国、李乾和韩岗提供的帮助。

参考文献:

- [1] G A Sai-Halasz, R Tsu, L Esaki. A new semiconductor superlattice[J]. Appl Phys Lett, 1977, 30(12): 651–653.
- [2] XU Zhicheng, CHEN Jianxin, HE Li. Measurement of the background carrier concentration of type-II InAs/GaSb superlattices based on GaSb[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(1): 45–50. (in Chinese)
徐志成, 陈建新, 何力. GaSb 基的 InAs/GaSb II 类超晶格背景载流子浓度的测量[J]. 激光与红外, 2012, 42(1): 45–50.
- [3] G R Johnson, B C Cavenett, T M Kerr, et al. Optical, Halland cyclotron resonance measurements of GaSb grown by-molecular beam epitaxy[J]. Semicond Sci Technol, 1988, 3: 1157.
- [4] HAO Ruiting, XU Yingqiang, ZHOU Zhiqiang, et al. GaSb bulk materials and InAs/GaSb superlattices grown by MBE on GaAs substrates[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2007, 28(7): 1088–1091. (in Chinese)
郝瑞亭, 徐应强, 周志强, 等. GaAs 基 GaSb 体材料及 InAs/GaSb 超晶格材料的 MBE 生长[J]. 半导体学报, 2007, 28(7): 1088–1091.
- [5] M Hakala, M J Puska, R M Nieminen. Native defects and self-diffusion in GaSb[J]. Journal of Applied Physics, 2002, 91(8): 4988–4994.
- [6] H H Wieder. Transport coefficients of InAs epilayers[J]. Applied Physics Letters, 1974, 25(4): 206–208.
- [7] M Razeghia, B M Nguyen, P Y Delaunay. State-of-the-art type II antimonide-based superlattice photodiodes for infrared detection and imaging[C]. Proc. of SPIE, 2009, 7467: 74670T–1.
- [8] D Hoffman, B M Nguyen, P Y Delaunay, et al. Beryllium compensation doping of InAs/GaSb infrared superlattice photodiodes[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(14): 143507.