

·成果简介·

新型器件及其超薄层异质外延材料和表面、界面研究

王占国

(中国科学院半导体研究所半导体材料科学实验室, 北京 100083)

陈维德

(中国科学院半导体研究所, 表面物理国家重点实验室, 北京 100083)

[关键词] 分子束外延, 表面钝化, CaAs 欧姆接触, 界面物理, 异质结双极晶体管, 高电子迁移率晶体管

随着分子束外延 (MBE)、化学束外延 (CBE) 以及金属有机物化学汽相沉积 (MOCVD) 等超薄层生长技术的发展, 人们已经成功地生长出原子级厚度和原子级平整的优质异质结构外延材料。以此为基础, 研制成功多种新一代半导体光电子和微电子器件, 如: 量子阱激光器、高电子迁移率晶体管 (HEMT) 和异质结双极晶体管 (HBT) 等。这些器件不仅大大促进了国防电子工程技术的发展 (如雷达、导弹), 而且在超高速计算机、卫星通讯和电视接收等方面也有重要应用。超薄层外延材料具有许多新颖的物理特性, 已成为凝聚态物理研究前沿领域之一。随着器件尺寸的减小, 表面和界面效应越来越突出, 并严重影响器件性能。因此, 利用现代表面分析技术, 从原子尺度上了解超薄层材料生长机理, 及器件表面和界面的物理特性, 有利于新型材料和器件的发展。三年来, 我们在此领域做了许多深入研究, 取得了一批具有较高学术价值和应用价值的研究成果。

1 高质量 CaAs/AlGaAs 二维电子气材料研制及器件应用

我们利用 Riber-32p MBE 设备, 通过对生长工艺和材料结构的分析和研究, 首先将系统的背景杂质浓度降到 $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 以下, 进而将 CaAs/AlGaAs 界面平整度控制到 1 个原子层。研制出的优质 GaAs/AlGaAs 二维电子气 (2DEG) 材料, 在 4.8 K 时电子迁移率高达 $1.14 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ (暗场)^[1], 从而结束了我国 2DEG 材料迁移率长期徘徊在 $5 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 的局面。该材料具有高稳定性和重复性, 达到国际先进水平。在此基础上我们成功地设计和制备出优质的 HEMT, P HEMT 和 HBT 等器件结构材料, 如 P HEMT 材料迁移率 $\mu_{300\text{K}} = 6\ 350 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 载流子浓度 $n_s = 3.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 其性能达到 90 年代国际同类产品水平; 用此材

国家自然科学基金“八五”重大项目, 批准号: 69391700.

本文于 1998 年 2 月 9 日收到.

料已做出 8 mm 波段的低噪声管和我国第一只毫米波段可实用的功率管。该项成果获 1995 年度中国科学院科技进步奖二等奖。

2 超薄层异质结构材料物理性质的研究

利用光致发射 (PL), PL Mapping, X-光双晶衍射, 反射高能电子衍射 (RHEED) 和透射电子显微镜 (TEM) 等多种测试分析技术, 对 MBE 衬底材料与外延层质量的关系, 异质结构外延材料结构参数对 GaAlAs/GaAs 2DEG 材料电学性质影响, 大失配 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/(\text{Al})\text{GaAs}$ 应变异质结构材料体系生长动力学、生长条件、衬底取向、结构参数对分数层 InAs/GaAs 超晶格结构及其光学性质影响等, 进行了系统的研究。首次提出, 当系统本底杂质浓度低于 $3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 时, GaAlAs/GaAs 界面粗糙引起的散射对制备低温电子迁移率超百万 2DEG 材料是必须考虑的。首次发现二维 InGaAs 岛临界半径、二维岛密度以及 In 原子在 GaAs 表面的分凝等 3 种因素决定 InGaAs/GaAs 的生长动力学过程。提出应变外延生长动力学模型和二维、三维生长模式转变机制。成功地抑制了界面失配位错的产生, 获得了结构完整、表面和界面平整、热稳定的应变异质结构材料^[2]。提出了应变异质结构有效临界厚度的概念。获得了高质量的分层 InAs/GaAs 量子点材料。发现分数层 InAs/GaAs 超晶格材料低温 (10 K) 和室温的积分发光强度比整数层超晶格高一个数量级, 比合金 (InGaAs) 量子阱高得更多。同时, 还深入研究了 AlGaAs 中 DX 中心对 2DEG 输运性质的影响。并提出了相应的理论模型^[3]。

3 新型欧姆接触材料

AuGeNi 是目前 III-V 族化合物半导体器件应用最广泛的一种金属化系统, 但因其共晶温度低 (375°C), 表面粗糙、界面不平整等, 使它在未来亚微米器件中的应用受到了很大的限制。我们采用非合金固相反应的方法, 研究了 3 种不同的金属化系统: Ge/Ni-In/Ni, PdGe, Pd/AuGe/Ag/Au 与 n-GaAs 的欧姆接触。在 $500\text{--}800^\circ\text{C}$ 退火后, NiInGe 系统的比接触电阻率约为 $10^{-6} \Omega \text{ cm}^2$, 最低为 $2.27 \times 10^{-6} \Omega \text{ cm}^2$; 在 $400\text{--}500^\circ\text{C}$ 退火后, PdGe 系统的比接触电阻率约为 $10^{-6} \Omega \text{ cm}^2$, 最低为 $1.4 \times 10^{-6} \Omega \text{ cm}^2$ ^[4]; $400\text{--}500^\circ\text{C}$ 退火后, Pd/AuGe/Ag/Au 系统的比接触电阻率为 $2 \times 10^{-6}\text{--}5 \times 10^{-6} \Omega \text{ cm}^2$, 平均为 $3.5 \times 10^{-6} \Omega \text{ cm}^2$ 。上述结果与传统的 AuGeNi 欧姆接触比较, 不仅比接触电阻率低, 而且结浅, 表面光滑, 界面平整, 黏附性和热稳定性都有较大改善, 达到国际先进水平。这些新型欧姆接触材料在 GaAs 亚微米器件中有潜在应用前景。

4 III-V 半导体表面的化学钝化

GaAs 和 InP 是新一代微电子和光电子器件的基础材料, 但它们的表面容易氧化, 形成很高的表面态密度, 导致费米能级钉扎和非辐射复合中心增加, 从而严重影响了 GaAs 器件的电学和光学性能。近些年, 采取多种化学技术对 GaAs 表面进行钝化, 虽有一定效果, 但问题并未得以解决。我们提出一种用氯化硫钝化 III-V 族半导体材料和器件的新方法——S 钝化法^[5]。先将样品预清洗, 在室温下将其放入氯化硫溶液中几十秒, 取出后分别用无水有机溶剂、丙酮和水清洗, 用氮气吹干。HBT 管经此钝化后, 小电流放大倍数增加 10 倍, 效

果很好。本方法可在室温下进行, 工艺简捷, 可用于 GaAs, InP, InSb 等 III-V 族半导体材料和器件的表面钝化, 已获国家发明专利^[6]。我们还采用 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ 和热处理方法对 InP 表面进行化学钝化^[7], 钝化后光荧光强度提高近一个数量级, 效果也很好。

5 半导体表面和界面理论研究

由于 Si 和 Ge 的晶格常数不匹配, 生长的 Si/Ge 超晶格会发生形变, 从而使 Si/Ge 超晶格的生长厚度及质量受到限制。我们从理论的角度详细研究了生长在不同合金衬底上 Si/Ge 超晶格的几何结构, 还详细研究了合金界面下 Si/Ge 超晶格的振动特性, 解决了 Si/Ge 超晶格 Raman 光谱实验与理论的矛盾, 解释了 400 cm^{-1} 峰的起源, 并建立了评价界面品质的方法。此外, 还首次研究了 $\alpha\text{-Sn/Ge}$ 超晶格的晶格振动理论, 并首次建立了形变半导体的声子色散理论^[8]。采用经验紧束缚方法, 计算了生长在 Si (001) 衬底上的应变合金 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 层、GaAs 层及生长在 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 合金衬底上的应变 Si 层的电子能带结构和光学性质。同时, 根据总能最小原理研究了 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 合金中键长与合金组分关系。结果表明, 键长基本与合金组分无关。在紧束缚计算中, 利用标度定则, 并根据材料的畸变与常数实验值确定它们的标度指数, 计算得到的应变层电子能带结构及物理常数, 与实验符合很好^[9]。

6 实发射极自对准 HBT 的研究

研究成功一种新型自对准结构 AlGaAs/GaAs HBT, 其最小发射区面积可达 $1 \times 6\ \mu\text{m}^2$, 是国内报道的最小尺寸。基区金属与发射区间距减至约 $0.1\ \mu\text{m}$ 。在使用未经优化的材料结构及 $2\ \mu$ 套刻等宽松工艺条件下已得到 β 为 20—80 的直流特性, 截止频率 $f_T = 23.47\ \text{GHz}$ 和 $f_{\text{max}} = 19.48\ \text{Hz}$ 的高频特性。此法不同于国际上已采用的“假发射极”和“双剥离”自对准结构, 工艺简单, 具有发射极尺寸小, 基区电阻小等优点, 是发展高频小尺寸 HBT 器件及集成电路较理想的自对准结构。

7 18 GHz HEMT 混合集成混频器

HEMT 具有高频、高速、低噪声的优点, 将逐步取代目前正在使用的金属半导体场效应晶体管 (MESFET), 成为雷达制导, 通信 (包括卫星通信和移动通讯等) 等接收系统不可缺少的重要器件。18 GHz HEMT 混合集成混频器的成功研制为较高波段的通讯技术及下一步单片集成打下了基础。18 GHz HEMT 混频器包括器件和混频电路两个方面。在实现了器件的亚微米栅长的微细加工、图像反转和金属剥离等关键技术突破基础上, 采用大、小信号分析方法, 利用器件的散射参数和优化电路设计程序设计了匹配电路, 并结合异质结构材料与器件性能关系的研究结果, 研制成功 18 GHz HEMT 混频器, 其混频增益为 0.5 db, 单边带噪声为 6.0 db, 属国内领先。

8 InP HEMT 及其分频器

开展了 InP 基 HEMT 及 P HEMT 的结构设计分析和计算机模拟, 提出了较新颖器件用的材料结构。对 InP 基 HEMT 器件的隔离、亚微米栅、形貌良好的欧姆接触、阈值电压精确控制和二次布线进行了研究, 作出了国内领先的 InP HEMT 和 HEMT 高速电路。其中, InP

HEMT最大跨导达600—1000 ms/mm , f_T 及 f_{\max} 均在30—40 GHz, DCFL 25级 InP HEMT 环形振荡器平均延迟时间为24 ps。InP HEMT 静态分频器最高工作频率到1 GHz 有正常分频功能, InP HEMT 动态分频器最高工作频率达4.5 GHz。

9 其他

在项目实施过程中,共发表论文199篇,其中包括国际著名刊物46篇,国际会议特邀报告2篇,国内核心期刊47篇,特邀报告8篇,已出版和将出版专著4部。

本项目是由林兰英和谢希德两位院士主持,由中国科学院半导体研究所,微电子中心,复旦大学,电子部第13研究所共同承担的一项国家自然科学基金重大项目。

参 考 文 献

- [1] Yang Bin, Cheng Yonghai, Wang Zhanguo et al. Interface roughness scattering in GaAs-AlGaAs modulation-doped heterostructures. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **65**: 3329.
- [2] Li Wei, Wang Zhanguo, Liang Jiben et al. Investigation of the epitaxial growth of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ on GaAs (001) and extension of two-dimension-to-three-dimension; growth mode transition. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **66**: 1080.
- [3] Yang Bin, Wang Zhanguo et al. Influence of DX centers in the $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ barrier on the low-temperature density and mobility of the two-dimensional electron gas in GaAs/AlGaAs modulation-doped hetero-structure. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **66**: 1406.
- [4] Chen Weide, Xie Xiaolong et al., Microstructure studies of PdGe/Ge ohmic contact to n-type GaAs formed by rapid thermal annealing. *Appl. Surf. Sci.*, 1996, **100/101**: 530—533.
- [5] Li Z S, Cai W Z, Su R Z et al. S_2Cl_2 treatment a new sulfur passivation method of GaAs surface. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**: 3425.
- [6] 侯晓远,李哲深,蔡卫东等.一种用氯化硫钝化III-V半导体表面的方法,国家发表专利,申请号94112024.4, 1994.1.
- [7] Chen Weide, Li Xiugong, Duan Lifong et al., Photoluminescence enhancement of $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ passivated InP surface by rapid thermal annealing, *Appl. Surf. Sci.*, 1996, **100/101**: 592—595.
- [8] Zi Jian, Zhang Kaiming, Xie Xide. Vibrational properties of Si/Ge and $\alpha\text{-Sn}/\text{Ge}$ superlattices with intermixed interfaces. *Phys. Rev.*, 1993, **B47**: 9937.
- [9] Xu Zhizhong. Electronic band structure of coherently strained $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ alloy on Si (001) substrates. *Phys. Rev.*, 1993, **B47**: 3642.

NOVEL DEVICES AS WELL AS SUPER-THIN LAYER HETERO-EPITAXIAL MATERIALS AND SURFACE/INTERFACE INVESTIGATIONS

Wang Zhanguo

(Lab of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors, CAS, Beijing 100083)

Chen Weide

(National Key Lab of Surface Physics, Institute of Semiconductors, CAS, Beijing 100083)

Key words molecular beam epitaxy, surface passivation, GaAs ohmic contact, surface/interface physics, material physics, HBT, HEMT