

# 砷化镓集成电路基础技术研究

林金庭

(南京电子器件研究所)

**[摘要]** 砷化镓集成电路(GaAsIC)是微电子发展的重大新领域。本文将介绍其特点、主要方向和用途。重点介绍砷化镓集成技术基础研究对发展我国 GaAsIC 的重大意义。国家自然科学基金委员会安排“砷化镓集成电路基础技术研究”重大项目,其目的是研究国际上正在发展的第二代砷化镓集成技术——难熔栅全离子注入集成技术,为发展砷化镓超高速集成电路微波单片集成电路打下牢固的基础。

## 一、砷化镓集成电路的特点和用途

砷化镓集成电路包括了砷化镓超高速集成电路(VHSIC)、微波单片集成电路(MMIC)和光电集成电路(OEIC)。GaAsIC 主要指以 GaAs 半导体材料为主所制作的集成电路,其有源器件主要是金属肖特基场效应晶体管(MESFET)和结型场效应晶体管(JFET);同时还包含了用分子束外延(MBE)和有机金属汽相沉积(MOCVD)生长的材料所制作的高电子迁移率晶体管(HEMT)和异质结双极晶体管(HBT)等器件所研制的集成电路。

与硅集成电路相比,GaAsIC 的优点是:(1)GaAs 材料的电子迁移率比硅大 5 倍,因此 GaAs 器件的速度及其在微波毫米波的性能比硅器件高得多;(2)半绝缘 GaAs 单晶(电阻率达  $10^7\Omega\cdot\text{cm}$ )适合制作各种 MMIC 电路,而硅却无此特性;(3)GaAs 器件和 GaAsIC 高温工作可达  $300^\circ\text{C}$ ,亦可工作于  $-70^\circ\text{C}$  而不需恒温,且性能得到改善。一般硅双极型器件和 SiIC 都无如此好的低温特性;(4) GaAs 材料固有的抗辐照特性使得 GaAs 器件和 GaAsIC 的抗辐照性能比硅的高 1—3 个数量级。基于这些特点,GaAsIC 在近 15 年来得到了飞速的发展。美、日、西欧等都有相应的发展计划,其中代表性的是美国国防部的 MIMIC 计划,从 1987 到 1992 年投资 5.6 亿美元。日本发展砷化镓技术主要集中在民用产品方面,某些技术领先于美国。

砷化镓集成电路在国民经济建设和国防建设中有着许多重要用途,而且是硅集成电路所替代不了的。其主要应用领域是:通信卫星、电视卫星接收、移动通信、高清晰度电视、微波毫米波数字频率源、光通信、超高速率讯号处理、微型超级计算机、恶劣环境下用计算机和控制机、高性能仪器、微波传感以及许多重要的国防军用电子装备等。

在国际上,经过近 15 年来的研究发展,已有许多高性能的 GaAsIC 产品开发出来。在 GaAs VHSIC 方面,如简化指令微处理器(RISC)芯片已达每秒 10 亿条指令(1000MIPS)的运算速率;35 万门的 GaAs 门阵列在实验室已出样品;3 万门以下的门阵列已有商品,其功耗只有硅 ECL(发射极耦合逻辑)门阵的  $1/5$ — $1/10$ ,而其速度却比硅 ECL 门阵快 5—10 倍。在 MMIC 方面, $K_u$  波段电视卫星接收机高频头和 C 波段接收机的 GaAs MMIC 电路已

进入低价格批量生产,蜂窝电话用的 GaAs 器件和功率单片也已开始进入市场。如美国 ANADIGICS 公司计划于 1991 年生产 200 万块用于  $K_u$  波段电视卫星接收和有线电视 (CATV) 用的 MMIC 电路。许多军用 MMIC 已开始进入新一代军用电子装备。在 1991 年 6 月于波士顿召开的第 10 届国际微波毫米波单片集成电路会上,美国国防部先进研究计划局主持 MIMIC 计划的总经理科恩 (Eliot D.Cohen) 报告说:已有 16 种武器系统使用 GaAsMMIC 电路,其中一些武器已用于海湾战争。GaAsIC 的商业应用阶段已经到来,预计 90 年代末将形成 100 亿美元左右的市场。

GaAsIC 与硅 IC 相比,其历史要短得多,对 GaAsIC 的基础和应用基础研究在国内也仅仅是最近几年的事。无论在材料物理、器件物理、基本电路设计、表面界面、工艺基础以及集成电路的制造技术等方面,均要作深入的大量的基础研究工作。

砷化镓集成电路是建立在优质半绝缘砷化镓单晶,亚微米工艺,全离子注入技术以及新型器件物理,电路原理和计算机辅助设计 (CAD) 基础上的。其工艺流程一般来说比硅工艺要短一半左右,但精度和难度却很高。关于 GaAsVHSIC,国外目前的工艺线为 0.5—1.0 微米,净化厂房为 10 级或更高;而 MMIC 工艺则要求达 0.2—0.5 微米的线条。国际上目前有 80 多家公司和实验室在研究开发高性能的 GaAsIC,正在  $\phi 75$ —100mm 大圆片上生产和加工砷化镓集成电路。

砷化镓集成电路的成熟是与多年的基础研究分不开的,如 GaAs 材料物理、亚微米器件物理、器件和电路模拟、MMIC 的 CAD 等等的研究。只有把基础研究搞扎实,将基本技术搞透,将先进的工艺设备和测试手段建立起来,GaAsIC 才有可能走向成熟,走入商品化和得到广泛的应用。

## 二、研究内容

1989 年国家自然科学基金重大项目“砷化镓集成电路基础技术研究”的目的是研究难熔栅全离子注入自对准集成技术(国际上称 SAG 技术),为发展我国的 GaAsIC 打下牢固的基础。承担单位有机电部南京电子器件研究所、中国科学院半导体所、上海冶金所、北京大学微电子所、上海交通大学和机电部第 13 研究所等。

SAG 技术在国际上被称为第二代砷化镓集成技术。其特点是器件均匀性非常好,成品率非常高。它的基本技术既适合于制作 GaAsVHSIC 也适合于制作 MMIC 电路。当然,在 CAD、测试、封装和亚微米技术上,两者是有很大差别的。这是一项很新的技术,目前国际上也正在成熟之中,因此我们及时选择这项先进的应用基础研究,对发展我国 GaAsIC 有着重大意义。

本项目的特点是:(1)将优质 GaAs 材料的研究与器件、集成电路紧密结合起来,以促使材料物理、材料制备和加工的深入研究;(2)把基础工艺研究与器件和集成电路紧密结合,以促使工艺技术的深入研究和器件电路的设计扎根于工艺实际,为实用 GaAsIC 的开发打下基础;(3)确立实用化的微波通信收发组件集成电路作为基础技术研究成果的汇总和检验。

根据上述构思,本重大项目设下列七个子课题进行研究:

1. 直径为 50mm 低位错密度优质半绝缘砷化镓单晶研究。目的是研制出位错密度低、热稳定性好、电阻率均匀、加工后表面平整、适合全离子注入工艺的优质半绝缘砷化镓

(SI-GaAs)单晶和单晶片。

2. 砷化镓中离子注入与器件物理研究。内容有: 低能离子注入, 各种注入离子与 GaAs 的相互作用和特性, 注入形成增强/耗尽场效应管(E/DFET)、TFET 器件物理和新器件研究等。

3. 高温难熔栅及肖特基特性研究。主要研究复合低阻高温栅及肖特基结的基本物理和电学特性。

4. 自对准、介质膜、隔离等平面工艺技术。内容包括全平面自对准亚微米栅长 FET 的制造工艺, 单片集成电路中无源、有源元器件兼容工艺, 干刻蚀、隔离和互联技术等等, 为 GaAsIC 制造打下工艺基础。

5. GaAs 器件特性与 GaAs 材料质量关系的研究。着重研究用难熔栅自对准离子注入所制作的 MESFET 的特性与 SI-GaAs 材料质量的关系。

6. 砷化镓器件与 GaAsIC 的 CAD。主要研究器件建模与分析, 工艺模拟, 线性和非线性微波单片集成电路的优化设计等。

7. 微波通信用砷化镓单片集成电路研究。目的是综合上述研究成果, 设计和制造出 C 波段微波通信用的收发组件中几种单片电路。

本项目计划三年完成, 最终成果主要是基础技术, 它将为发展我国砷化镓微波单片电路、砷化镓超高速电路和光电子集成电路打下较扎实的基础。

### 三、进展情况

本项目开始于 1989 年 10 月, 1990 年 10 月进行了年度检查和学术报告会, 会上邀请了国内得到自然科学基金会资助的有关砷化镓面上课题的专家参加, 交流了研究工作成果和经验, 促进了项目的进展。主要进展和成果如下:

1. 在 SI-GaAs 单晶热稳定性和电学性能方面, 采用光注入瞬态电流谱(OTCS)、深能级瞬态电容谱、红外吸收、低温光致发光(PL)等手段, 对影响 SI-GaAs 热稳定性的原因进行了较系统的实验研究, 并在此基础上提出了五能级的电学补偿模型, 从理论上解释了 SI-GaAs 单晶在热处理过程中高电阻率变为中阻和转型的问题。(有关理论模型的论文已在 1990 年召开的“第 6 届国际 III—V 族半绝缘材料会议”上发表。)这方面的研究表明, 要制备热稳定性好、未掺杂的 SI-GaAs 单晶, 必须满足: (1) 浅受主杂质的总浓度  $N_A$  与浅施主浓度  $N_D$  和禁带中心上半部较深能级浓度  $N_{TD}$  必须满足  $N_A > N_D + N_{TD}$ , 而且碳占砷位  $C_{As}$  应控制在  $1-5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$  内。(2) 禁带中心附近能级  $EL_2$  的浓度  $N_{EL2}$  应满足  $N_{EL2} > (N_A + N_{TA}) - (N_D + N_{TD})$ , 其浓度应控制在  $1-2 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$ 。(3) 尽可能少的重金属杂质沾污。在研究工作中发现, 铁的沾污可使单晶在热处理中电阻率不稳定。此外, 还研究了单晶片表面抛光损伤层以及电学均匀性等问题, 控制了质量较高的直径为 50—75mm 的单晶。

2. 在离子注入研究方面, 着重改装了低能离子注入设备, 研究了双离子注入以及注入入射角与沟道效应等基本特性。Mg<sup>+</sup>和 P<sup>+</sup>双离子注入比 Mg<sup>+</sup>+As<sup>+</sup>双离子注入能更有效地提高 Mg<sup>+</sup>的电激活率(即导电杂质的比率), 同时实验表明, 快速热退火比常规热退火更有利于消除注入损伤。这些结果为制造 P 型 GaAs 隐埋层提供了基础。在 B<sup>+</sup>注入研究方面, 注入剂量

$\times 10^{11}—1 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ , 退火温度在  $500^\circ\text{C}$  以下和注入剂量  $1 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$  退火温度  $650^\circ\text{C}$  以下, 均能得到方块电阻  $R_{\square} > 10^9 \Omega / \square$  的性能。这个数值超过器件隔离层的要求, 这在国内是第一次。与 GaAs 技术有关的面上基金课题还报道了  $\text{Si}^+$ ,  $\text{S}^+$ ,  $\text{Be}^+$  以及  $\text{O}^+$  注入 GaAs 及其退火后电学特性方面的研究报告。离子注入是本课题的关键之一, 上述工作为全离子注入——难熔栅集成电路技术的发展打下了基础。

3. 在高温难熔栅肖特基势垒特性和氮化物栅方面, 进行了 ZrN, WSiN, WN, WSi 等肖特基结特性的研究。肖特基特性是 GaAsMESFET 器件的基础, 由于国际上也不清楚 N 在 GaAs 中的行为, 所以我们在研究工作中用离子注入方法注入  $\text{N}^+$ , 然后磁控溅射 Zr, 并改变溅射功率, 用反射式电子衍射分析、X 射线衍射分析等技术进行了分析研究, 初步认为 N 或 N-缺陷复合体在 GaAs 中可能起受主杂质的作用。其物理模型和机理正进一步研究, 该结果将在国际会上发展。有关 WSiN 的研究也正在深入, 用俄歇能谱(AES)、扫描电镜(SEM)等研究其表面和界面特性, 并观察其组份在界面的变化和对器件可靠性的影响。因为 WSiN 是目前被认为比较成熟的高温栅复合材料, 我们用于制造 GaAsIC。初步结果认为 N 在肖特基势垒的稳定性和可靠性方面也起着重要作用。

4. 在 GaAs 材料与器件的关系方面, 还研究了等电子掺铟(In)的特性。掺 In 能降低 GaAs 单晶中的缺陷密度 (EPD), 但对单晶的热稳定性却有不利影响, 原因是 In 改变了 GaAs 中本征缺陷的平衡。因此掺 In 材料对器件制造不利, 这也是一年多来本项目的主要成果之一。

5. 在亚微米技术和器件工艺方面, 主要研究了亚微米器件的制作、反应离子刻蚀、多层金属互连、表面保护膜生长工艺、质子注入隔离以及自对准技术等。采用全离子注入自对准全套工艺进行了器件和集成电路的初步试验, 成功的制成了性能良好的增强型和耗尽型场效应晶体管 (E/D MESFET) 以及差分输入放大器集成电路。E/D MESFET 是低功耗 GaAsIC 的基础。差分输入集成电路在 DC—1000MHz 频率范围内增益大于 20dB, 平坦度很好, 相当于 1985 年国际上论文报告的水平。GaAs 芯片上 MESFET 的成品率高达 92%, 这是目前国内的挖槽结构工艺 (成品率一般只有 10% 左右) 所无法比拟的, 初步证实这项重大项目最后所要形成的基础工艺的确很先进。上述工艺技术研究还证明, 采用光学技术和自对准方法可以稳定的获得  $0.5—0.8 \mu\text{m}$  质量很好的线条。

6. 在计算机辅助设计 (CAD) 和 MMIC 设计方面, 一年多来设计了行波混频器, 功率放大器, 压控振荡器 (VCO) 和有源环行器等电路。利用现有工艺对这些电路进行了实验验证, 并获得了初步性能。压控振荡器在 9.3—11.6GHz 下, 转出功率大于 10mW; 双栅行波混频器在 2—12GHz 下变频损耗小于 8.5dB; 两级功率单片放大器在 670—1470MHz 下, 最大小信号增益为 24dB, 最大输出功率 300mW; 对有源环行器电路进行了基本原理的论证。上述这些结果在国内均属首次。这些单片电路都是以攻读硕士学位的 4 名研究生为主完成的。通过重大课题培养年青一代科技骨干, 这是新一代 GaAsIC 的发展急需解决的问题。

上述主要研究成果已发表论文共 22 篇, 刊于 1991 年《固体电子学研究进展》(R&P of SSE) 杂志第 2, 3 两期, 该刊物在国内外公开发行。发表于国际会议和国际刊物的论文 6 篇, 培养博士和硕士生分别为 4 和 15 名。

“砷化镓集成电路基础技术研究”今后将进一步深入各子课题的研究, 重点是半绝缘砷化

镓单晶质量、高温栅材料和器件物理、多层金属、离子注入技术、亚微米工艺、器件模拟、电路设计等关键基础技术。加强各子课题间的联系和协作,将原订的目标提高一步,在直径 50mm 的圆片上实现全离子注入自对准技术,为发展我国的第二代 GaAsIC 工艺打下基础。

砷化镓集成电路在国际上发展极其迅速,其基础研究也在不断的深入和提高,集成技术也在日新月异地发展,生产厂和加工线正在生产和接受订制高性能的 MMIC 电路,应用市场正在迅速形成。我国在进行 GaAs 集成技术基础研究的同时,应制订 GaAsIC 的发展规划,加强投入,以免与国际先进水平的差距进一步拉大。

## RESEARCH OF GaAsIC BASIC TECHNOLOGY

Lin Jinting

(Nanjing Electronic Devices Institute)

### Abstract

GaAsIC is a new important area of microelectronics development. This paper describes its features, main trends and applications, with the emphasis on great significance of GaAs integrated technology for developing GaAsIC in our country. The major project "Research of GaAsIC basic technology" supported by NSFC is devoted to study the second generational GaAs integrated technology—refractory metal gate, fully ion implantation integrated technology, which is being developed internationally, in order to lay a strong base for GaAs VHSIC and GaAs MMIC.

---

## 启 事

本刊 1991 年第 4 期刊登的第二届国家自然科学基金委员会委员简历中,由于编辑部编辑工作疏忽,遗漏了卢良恕委员的简历情况,现予补正,并向卢良恕教授表示歉意。

**委 员:** 卢良恕 研究员

1924 年出生,1947 年毕业于金陵大学农学院。任中国农学会会长,农业部科技委员会副主任。中国农业科学院学术委员会主任。国家发明奖评审委员会副主任。

专业:小麦育种、栽培。

本刊编辑部