

我国 MBE GaAs 基材料如何从实验室走向产业化

孔梅影, 曾一平

(中国科学院半导体所, 北京 100083)

[摘要] 以分子束外延 (MBE) GaAs 基微结构材料为基础制作的 HEMT, PHEMT 等器件在信息产业中已广泛应用, 在国外并已进入产业化。20 世纪 80 年代中期以来, 中科院半体所研制的 MBE GaAs 基材料, 已被成功地用于制备出一系列新型半导体器件; 其 HEMT, PHEMT 微结构材料的实用化性能指标已经基本达到国际一流产品的水平; 并对 MBE GaAs 材料如何走向产业化进行了探讨。

[关键词] 分子束外延; GaAs 基微结构材料; PHEMT; 高技术产业

1 引言

30 年来, MBE 技术与超晶格量子阱等低维物理概念相结合, 创造出了一代新的人工改性半导体材料——半导体量子微结构材料, 开拓了一代性能优异的以量子尺寸效应为基础的新型半导体器件, 极大地促进了半导体科学技术的发展和低维量子物理的发展。用它制备的 MBE GaAs 基二维结构材料和器件已进入商品化和产业化阶段, 在信息技术中获得了十分重要的应用。

我国的 MBE 技术是 20 世纪 70 年代中在西方对我们封锁的情况下起步的。从自力更生研制 MBE 设备开始, 经历了先后两代 MBE 设备的研制。MBE 材料的研制则从 GaAs 基的二维微结构材料开始, 后已扩展到多种材料体系。材料的维度从二维进展至一维, 0 维。特别是在材料的器件应用方面, 通过材料和器件研制双方的密切合作和努力, 先后研制成功 QWLD, SEED, QWIRPD 和 HEMT, PHEMT, HBT, HFET 等一系列有重要实用意义的新型光电子、微电子器件和电路。由于我国改革开放的大好形势和我国自力更生发展 MBE 技术所达到的引人瞩目的水平, 终于使西方在 20 世纪 90 年代初解除了对我国 MBE 设备的禁

运, 这为进一步发展我国 MBE 材料和器件的研究创建了更好的环境和条件。

2 MBE GaAs 基微结构材料已达实用化水平

在研制成功一系列 GaAs 基微结构材料和器件的基础上, 中国科学院半导体研究所承担了国家“九五”科技攻关“MBE GaAs 基微结构材料实用化研究”任务。为了保证任务的完成和继而能向产业化方向推进, 我们引进了 EPI 公司的 Gen II 型 MBE 设备和改造了实验室环境, 结合我们长期积累的 MBE 人才和技术优势, 在很短的时间内就研制出了电学性能好, 大面积均匀, 表面缺陷少, 重复稳定和成品率高的 GaAs 基 PHEMT, HFET 和 MESFET 等多种器件结构材料。通过与器件研制单位的密切合作获得了相当好的器件结果。如 PHEMT 材料达到了好的性能指标:

$$\mu_{300K} \geq 8151 \text{ cm}^2/\text{v}\cdot\text{s}; n_s \geq 1.81 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2};$$

厚度, 组分, 浓度不均匀性为 $\leq \pm 1.5\%$; 表面缺陷密度 $\leq 100 / \text{cm}^2$

目前已可达到 2000 片/a, 成品率大于 90%。

上述材料的各项技术指标已接近和达到目前最著名的 MBE 材料生产公司美国 QED 和法国 Picogiga 公司的产品指标性能，它标志着我们的材料研制在实用化方面取得了突破。此项目已于 1999 年 9 月通过了信息部主持的鉴定和验收。

表 1~3 是我所 MBE 材料的技术指标及其器件应用结果与国际先进水平的比较：

表 1 PHEMT 结构材料的参数与国际先进水平的比较

Table 1 The performance of the PHEMT material compared with that of the world best

	定温迁移率/ $\text{cm}^2 (\text{v}\cdot\text{s})^{-1}$		载流子浓度/ 10^{12}cm^{-2}		材料不均	表面缺陷 /个· cm^{-2}
					匀性	
	单 δ	双 δ	单 δ	双 δ		
美国 QE	6500	5000	1.7	2.0	$\leq \pm$	≤ 20
D 公司	~7000	~6500	~2.0	~3.6	1.5%	
本课题	6300	5000	1.5	2.0	$\leq \pm$	
	~8100	~6500	~2.0	~4.0	1.5%	≤ 100

表 2 双 δ PHEMT 结构材料应用结果与国际先进水平的比较

Table 2 The device application results of the double δ HEMT material compared with that of the world best

器件研 制单位	栅长/ μm	g_m/ms $\cdot\text{mm}^{-1}$	I_{Dss}	I_{max}	公布 日期
			$/\text{mA}\cdot\text{mm}^{-1}$		
NEC	0.45	370	270	550	1995
NEC	0.45	400	240	510	1996
Sony	0.8	420	—	400	1999
电子 13 所	0.4	>400	—	800	1999
电子 55 所	0.7~0.8	320~400	280	520~580	1999

表 3 单 δ PHEMT 结构材料应用结果与国际先进水平的比较

Table 3 The device application results of the single δ HEMT material compared with that of the world best

器件研 制单位	栅长/ μm	g_m/ms mm^{-1}	f_t/GHz	公布 日期
TRW	0.1	700	93.5	1990
Mitsubishi	0.15	680	60	1993
微电子中心	0.1	650	81	1999

3 MBE GaAs 基微结构材料的重要用途及产业化

产业化要以市场需求为导向。20 世纪下半叶以来，以信息技术为先导，以微电子，计算机，光纤与卫星通讯，计算机网络为主要内容的技术革命浪潮以惊人的力量推动了经济全球化的进程和社会生产力的巨大飞跃。世界经济进入全球一体化和信息化的新阶级。信息技术的发展，对半导体器件的频率和功率提出了越来越高的要求。与 Si 器件相比，GaAs 微电子器件，特别是 GaAs 基微结构器件 PHEMT，HEMT 和 HBT 等在高频频段具有优越的性能。随着信息社会的发展，GaAs 主要市场已由对价格不敏感的军事和超级计算机领域转移到大容量，价格非常敏感的商用领域。今后在卫星通讯系统，汽车雷达，移动通讯基站系统和 10 Gb/s 以上的高速数据传输系统中都会有重要的应用前景。这意味着 GaAs 材料市场将会有较快的发展。但同时材料的成本，均匀性等提出了更高的要求，为迎接这一商机，国外已发展多片生产型 MBE 设备。直径 76~100 mm (3~4 英寸) 的外延片价格已降至 700~800 美元/片，均匀性达到了 $\pm 1\%$ 。同时近几年来除原有的 Picogiga、QED 等生长 MBE 材料公司外，还出现了不少大大小小的制备 MBE 材料的厂商，并且陆续有新加入者。根据我国 MBE GaAs 基材料的厂史和现状，我们应该在这市场占据一席之地，但必须看到这一席之地只有通过激烈的竞争才有可能占领。也只有通过竞争才可能扩大占据的市场份额。

邓小平同志说“科学技术是第一生产力”，因此我们的科研成果不能只停留在鉴定、评奖阶段，要把研究成果转化成为对国民经济起直接作用的生产力，这也正是中国科学院 1998 年提出的“迎接知识经济时代，建立国家知识创新体系”所要解决的两个问题之一：一是要提高我国的创新能力，提高我国的科学研究水平，即中国人要对自然界本质的认识作出更大的贡献；再一个就是要解决中国科学技术和经济结合的问题，促进我国经济的发展。对于从事应用研究的人十分重要的任务就是要不断地将我们的研究成果转向应用，转向开发，转向产业。MBE GaAs 基材料有重要的应用前景，但又面临着激烈的市场竞争。在建立知识创新体系工作中，我们首先考虑的一个问题就是如何尽快将此研

究成果转化为生产力,形成高技术产业,为我国新型半导体材料的产业化和为我国信息化经济的发展作出积极贡献。

4 如何建立我国 MBE 材料高技术产业

科研成果要转化形成高技术产业需经过研制→中试→生产三个阶段。我国利用国产 MBE 设备和 1992 年引进的 Riber MBE 设备,完成了第一阶段材料的研制工作。其主要标志是研制出高水平的 GaAs 基微结构材料,并用以作出了多种新型半导体器件,获得了多项国家和中科院的科技成果奖励。“九五”期间我们进入了第二阶段的中试工作,为此引进了 EPI Gen II MBE 设备,现已完成了中试的第一步工作——材料的实用化研制。其主要标

志是研制出电学性能好,大面积均匀,表面缺陷少并能提供一定数量供器件研制使用的外延材料,即作出了重复稳定可实际应用的材料。接着我们将要进行中试阶段的第二步工作,即材料的工程化研制。计划利用 2 年左右时间,建立起外延材料的质量控制系统,制定规范化的材料结构和生长工艺,降低成本,提高成品率和供片能力。在满足国内需要的同时,积极开拓国际市场。第三阶段则根据国内外市场需要,扩大规模,形成高技术产业。为此我们将调整运行机制以适应各阶段生产力的发展,使最终能完全按照现代企业制度参与市场竞争。与此同时我们还要进一步加强科技研究队伍,以技术作后盾,能不断推出拥有自主知识产权的高新材料,以提高我们在全球市场上的竞争力,为我国的经济的发展作出积极贡献。

How to Transfer MBE GaAs-based Microstructural Materials from Research to Mass Production

Kong Meiyong Zeng Yiping

(*Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

[**Abstract**] Novel microelectronic devices, such as HEMT and PHEMT, etc., which are based on molecular beam epitaxial (MBE) GaAs-based microstructures, have found widespread applications in modern day information technology. These devices have already been commercialized in some foreign countries. In China, continuous endeavor since mid-80's in making GaAs-based microstructural materials by MBE has led to successful realizations of many such novel devices. Notably, the HEMT and PHEMT devices made from microstructural materials grown by MBE in Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences have demonstrated very good performances approaching the world-best. This paper aims at exploring the ways by which such research results can be transferred from laboratory to market.

[**Key words**] MBE; GaAs-based microstructure materials; PHEMT; high technology industry

中国工程院召开第五次院士大会

中国工程院第五次院士大会于 2000 年 6 月 5 日至 9 日在京举行,本刊编辑部热烈祝贺院士会议的顺利召开。

感谢广大院士一年来对《中国工程科学》杂志社和编辑部工作的指导、支持和关爱,热忱欢迎继续为本刊撰稿并推荐优秀论文。预祝会议圆满成功!

《中国工程科学》杂志社、编辑部