

中国分子束外延技术发展历程

周均铭[†]

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2021-03-11 收到

[†] email: jmzhou@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20211207

1 前言

分子束外延(以下简称MBE)是一种化合物半导体多层薄膜的物理淀积技术。其基本原理是在超高真空条件下,将组成薄膜的各元素在各自的分子束炉中加热成定向分子束入射到加热的衬底上进行薄膜生长(图1)。由于每一台分子束炉的炉口装有一个能快速开闭的快门,因而生长时能快速改变所生长材料的成分及掺杂种类。MBE技术是

在20世纪60年代末由美国贝尔实验室首先发展起来的。MBE技术具有生长速度较慢且可控、表面及界面平整、材料组成及掺杂种类变化迅速、生长衬底温度低等特点,因而被广泛用来生长组分及掺杂分布陡峭的突变异质结和复杂的多层结构。

曾经因发明隧道二极管而获得诺贝尔物理学奖的江崎(L. Esaki)在1970年与朱兆祥(R. Tsu)一起提出了一个半导体超晶格的概念^[1]。他们

设想如果在一个半导体基底上交替生长两种晶格匹配的半导体材料的周期结构,则电子沿生长方向的连续能带将分裂成若干微带(图2)。如果沿生长方向施加外电场,只要电子的散射时间足够长,电子将会未经散射到达微带的边缘,即图2中 E_1 的 π/d 处,电子的有效质量将是负的,于是出现负阻,即发生了所谓的布洛赫振荡。若超晶格周

期为 d 的话,则在外电场 F 作用下的振荡频率为 edF/h (e 为电子电荷, h 为普朗克常数),这将是一个超强能力的微波器件。

要生长这样的超晶格结构,用当时比较成熟的气相及液相外延生长技术是无法实现的,1971年贝尔实验室的卓以和(A. Y. Cho)用分子束外延技术生长出GaAs/AlGaAs超晶格结构^[2]。由此掀起了分子束外延技术的发展及量子阱、超晶格物理研究的高潮。之后研究出了多个与量子阱有关的重要器件,如量子阱激光器、量子阱红外探测器、高电子迁移率场效应微波器件等。

分子束外延技术问世之后,西方就对我国实施分子束外延设备及相关材料的禁运,本文回顾了被禁运的十几年里,中国的科技工作者自强不息地发展分子束外延设备及分子束外延材料的历程。

2 第一代分子束外延设备的研制

70年代初,中国科学院物理研究所(以下简称物理所)一些年轻的科学工作者,敏锐地觉察到超晶格这一新概念的重要性,开始进行国内外的调研。1974年在物理所的支持下,向中国科学院提交了计划开展半导体超晶格研究及研制分子束外延设备的申请报告。在完成论证后,获得了100万元的专项经费支持,研制工作在1975年正式启动。在物理所启动分子束外延设备的设计工作不久,中科院半导体研究所也开始了分子束外延设备的研制,

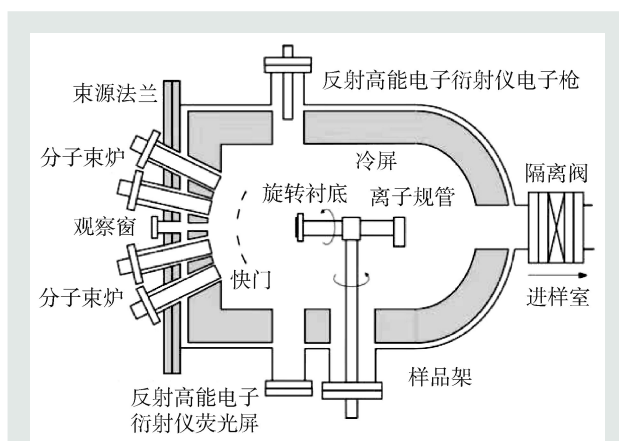


图1 分子束外延装置生长室的工作原理图,当样品架中衬底背后的离子规管转到面对各束源炉时,可以用来测量III族元素例如Ga, Al, In分子束的束流强度

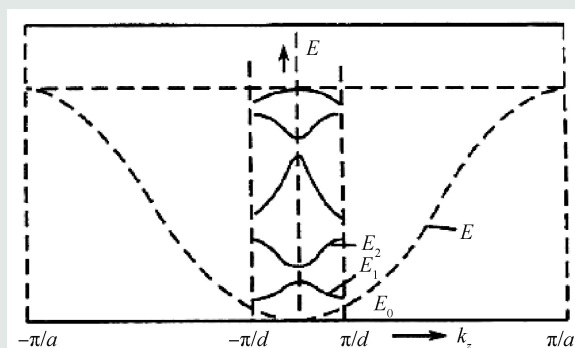


图2 超晶格与普通晶体能带的对比图



图3 我国研制的第一台分子束外延设备

所研制的设备后来被称为MBE-I型及MBE-II型,属于国产的第一代分子束外延设备。

中国第一代分子束外延设备是一个双室系统,即由生长室、进样室及样品传递系统组成。生长室与进样室之间由一个超高真空的角阀隔离,进样室有一个样品存放台。在进样室抽成高真空后,可以打开角阀,由磁力耦合传动杆将样品台上的样品传递到生长室中进行生长。由于生长室自始至终保持在超高真空状态,直至源材料耗尽为止,所以双室系统是分子束外延技术能够高效进行材料生长的重要设计,因为一旦生长室暴露于大气,系统抽气、烘烤及材料加热去气就要耗费多天时间。

生长室的无油超高真空获得系统由分子筛吸附泵、离子泵及钛升华泵组成。生长室内的主要部件有多维动作的样品架、分子束炉组件(包括由液氮冷屏包围的多个分子束炉及控制束源开闭的快门)、反射式高能电子衍射仪、四极质谱计及俄歇能谱仪。超高真空样品架从设计到加工是技术重点之一,样品头不仅有X、Y、Z三维移动,而且还有绕着垂直方向的转动及绕着水平方向的翘动功能,以配合与样品传递杆上的样品块交接,并且还要与反射式高能电子衍射仪配合,以使样

品表面与电子束入射保持合适的角度和方位,此外还要有加热样品最高至800℃的功能。反射式高能电子衍射仪是分子束外延过程的重要观察手段,可以监控外延生长表面状态及材料的生长质量,还能通过衬底表面氧化膜的脱附点来决定生长温度,之后又发现可以通过衍射

图像的振荡强度来测量生长速率,是MBE的重要部件。四极质谱计用于监测生长室中的残余气体组分及真空检漏。俄歇谱仪用来监测衬底表面清洁度及材料组分,在MBE之后的发展过程中证明俄歇谱仪并不必需而被拆除。

MBE-I型及MBE-II型设备的总体设计分别由物理所和半导体所负责,机械设计由航天部兰州物理所担任,设备的加工由中科院沈阳科仪厂承担,反射式高能电子衍射仪由中科院北京科仪厂负责研制,四极质谱计由北京分析仪器厂提供,俄歇谱仪由兰州物理所研制。

开始设计时只看到IBM实验室发表的一张设备照片,能参考的资料及与国外进行的学术交流都极少,设计方案多次反复修改,加上当时国内与MBE相关的超高真空部件的制造水平较低,因此许多MBE必需的部件,如超高真空的观察窗、焊接波纹管、热解氮化硼坩埚材料、陶瓷封接电极等都需从头研制,导致设计和制造的周期较长。

1979年12月18日,由中国科学院组织在沈阳召开了“分子束外延设备科研成果鉴定会”。鉴定书认定:“我国第一台分子束外延设备的研制成功填补了国内空白。”这台后来被称为MBE-I型的设备照片如图3所示。

在物理所的分子束外延设备鉴定会的第二年,半导体所也召开了II型MBE设备的鉴定会。之后,II型设备又加工了2台,分别提供给中科院长春物理所及上海冶金所使用。从此开始了中国科学院下属的物理研究所、半导体研究所,及之后加入的上海冶金研究所的科研人员自立更生发展我国分子束外延技术的历程。

MBE-I型设备运至物理所后,开始了边运转边改进的过程,在使用中首先将手动的快门操作改为单板机控制的步进马达驱动。在80年代初期,贝尔实验室卓以和博士访问物理所,在国际上,当时MBE技术经历了十余年的发展,已有长足的进步,他带来了国际上MBE技术发展的重要信息,给了物理所科技工作者很大的帮助。在这台国产设备上进行的一个最重大的改进是,物理所自行设计、加工了一个液氮冷屏置于生长室,冷屏极大地改善了生长环境,大幅度提高了外延生长材料的质量。1985年生长出高质量的GaAs/AlGaAs调制掺杂结构,其二维电子气的液氮温度(4.2 K)迁移率达到 $4.18 \times 10^5 \text{ cm}^2/(\text{v}\cdot\text{s})^{[3]}$,这个低温迁移率是表征材料质量的关键参数。卓以和博士来信称赞说当时国际上达到这个水平的实验室不超过10个。所谓调制掺杂异质结构是指只在宽禁带的AlGaAs层中掺杂,电子会转移到窄禁带的GaAs层界面上,形成一层二维电子气(图4),这层电子的迁移率基本上由GaAs外延层的材料纯度及质量所决定,因而二维电子气的低温迁移率很大程度上反映了外延技术水平。

MBE-II型分子束外延设备在半导体所科研人员的努力下,1980年研制了GaAs单晶薄膜,1983

年研制成功高纯 GaAs, 1984 年进入了 GaAs/AlGaAs 量子阱微结构的生长, 包括调制掺杂异质结、量子阱、超晶格及掺杂超晶格 (nipi-GaAs) 等一系列微结构材料, 并对它们的结构特性、光性及输运性质进行了广泛的研究。在 1984 年研制出高电子迁移率场效应晶体管 (HEMT)。之后得到的结果: 不掺杂的 P-GaAs 的空穴浓度为 $2 \times 10^{14} - 8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, 室温迁移率为 $360 - 400 \text{ cm}^2/(\text{v.s})$, N 型轻掺杂的 GaAs 的电子浓度 $n = 1.2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, 液氮 77 K 温度下的迁移率 $9200 \text{ cm}^2/(\text{v.s})$ 。调制掺杂结构中的二维电子迁移率在 77 K 温度下为 $1.8 \times 10^5 \text{ cm}^2/(\text{v.s})$, 电子面密度为 $4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ [4]。

调制掺杂结构在国外已被用来工业生产具有优良微波性能的 HEMT 器件。物理所及半导体所紧跟国际发展趋势, 将这种调制掺杂的外延片提供给电子工业部所属的第 55 所及第 13 所制作 HEMT 器件, 从而使我国的 HEMT 器件的研制成功提前了很多年。此后这类器件的研制被列入多个五年计划的攻关项目。

1985 年, 物理所与半导体所联合申请并获得了国家科技进步二等奖。

3 第二代分子束外延设备的研制

MBE-I 型及 MBE-II 型设备分别在物理所及半导体所多年运转期间, 不断暴露出设备的不足之处, 科技工作者们深感第一代国产 MBE 设备已经远不能满足生长器件研制的材料要求: (1) 材料生长的尺寸只有 1 cm^2 , 而且一次只能进一个样品, 效率极其低下; (2) 因为只有二室结构, 在进样室没有样品预处理装置, 新的样品在生长室加热, 带进去的水汽及污染脱附物对生长室产生污染, 另外从进样室直接将样

品传入生长室对生长室真空度的冲击较大; (3) 分子束源的容量太小, 换料频繁不利于材料生长, 而且控温系统及生长程序控制也亟待改进。

电子工业部南京 55 所的科技工作者们已深深地认识到 MBE 材料在制作高性能微波器件方面的重要性, 但是当时国际上对 MBE 设备及外延材料都实施禁运, 而 MBE-I 型设备已经不能满足器件研制的需要。于是南京 55 所作出了一个重要决定: 由他们出资, 请物理所与沈阳科仪厂合作设计和研制新一代的 MBE 设备, 设备放在物理所运转, 一方面向他们提供外延片, 同时还培训该所的技术人员学习 MBE 生长技术。这台后来被命名为 MBE-III 的设备 (图 5) 向实用化跨进了一大步。主要体现在:

(1) III 型外延设备从双室结构改为三室结构, 即增加了一个预处理室。样品由连接进样室与预处理室的磁力耦合传递杆进行这两室间的样品传输, 样品在预处理室内加热到 $400 \text{ }^\circ\text{C}$, 去除样品及样品托从大气中带入的水汽及沾污物。之后, 传递杆进行从预处理室向生长室的样品输送, 由于预处理室的真空度比进样室高得多, 所以在样品交接时, 对生长

室的真空度冲击较小。此外, 经过预处理的样品, 在生长室再次升温生长时, 很大程度地减少了对生长气氛的影响, 是提高外延质量的一个重要改进。

(2) 生长室与预处理室, 预处理室与进样室之间使用了全金属的闸板阀, 传递通路比角阀大幅增加, 为外延片的尺寸增加到 2 英寸提供了条件。为了改善所生长外延材料的组分、厚度及掺杂的均匀性, 在外延生长时样品必须连续旋转, 这是样品架功能的一个很大进步, 也为之后的外延衬底的进一步扩大奠定了基础。

(3) 分子束炉的容量有了大幅度

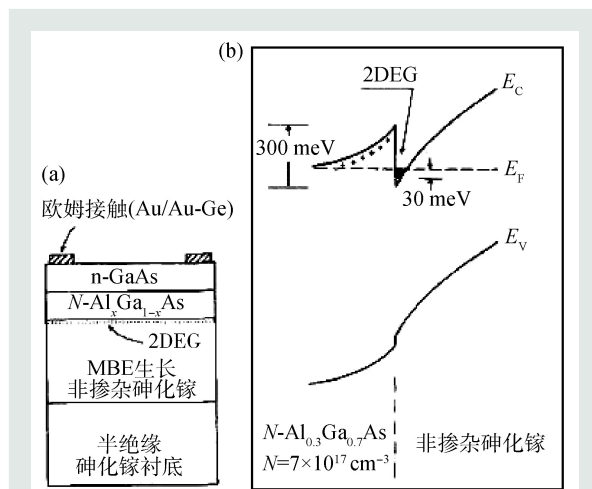


图 4 (a) GaAs/AlGaAs 调制掺杂材料的生长层结构示意图; (b) 调制掺杂形成的二维电子气 (2DEG) 的能带示意图

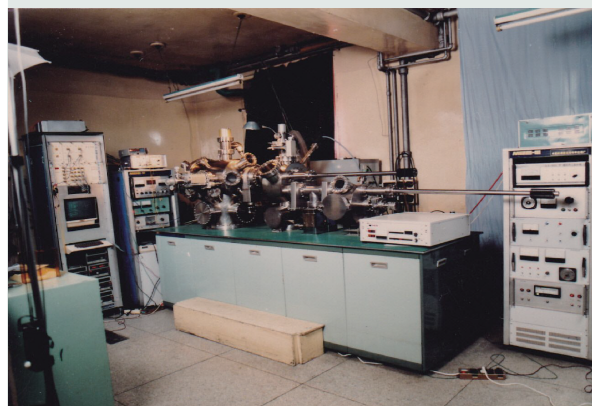


图 5 MBE-III 型设备的照片

的增加,建立了对温度及快门进行实时控制的微机系统,可以生长复杂的多层结构直至几十层的半导体超晶格。

(4)MBE-I及MBE-II型的生长室是垂直结构,即所有分子束炉安置在生长室的下方,外延衬底表面朝下,其优点是各分子束炉装料较多,缺点在于外延过程中从冷屏掉下来的凝聚物对分子束炉造成交叉污染,MBE-III型设备是水平配置,即分子束炉组件在侧面,样品垂直放置,从而避免了坠落物对分子束炉中材料的交叉污染。

1985年底MBE-III型设备运抵物理所进行安装和运转。经过10个月左右的生长实验,积累了大量数据。1986年10月18日,由中科院数学学部及技术条件局组织对“分子束外延材料和三室结构微机控制分子束外延设备”进行了鉴定,充分肯定了“III型设备是首次实现了用微机对分子束外延设备的控制……并为发展新材料提供了可能性”^[5]。设备的正常运转加速了国内与MBE材料相关器件的研制。在国内率先成功生长性能比以GaAs为二维电子气沟道的HEMT更加优异的以InGaAs作为沟道的PHEMT(赝配高电子迁移率场效应晶体管)材料。分子束外延设备的升级推进了复杂结构MBE材料的生长,如需



图6 MBE-IV型设备在莫斯科举办的“中国科技日”展览,图片的左侧是MBE-IV设备

要有几十层的GaAs/AlGaAs多量子阱的红外探测器结构,微机控制发挥了巨大的作用。除了生长这些应用性很强的分子束外延材料外,生长的各种多量子阱及超晶格材料也促进了相关的输运性质及光学性质的研究。

4 第三代分子束外延设备的研制

到了20世纪80年代中后期,国际上半导体多量子阱和超晶格的基础和应用研究开展得如火如荼,凡是研究半导体的大学及研究所几乎无一例外地都在开展MBE材料的生长及各种材料的量子阱及超晶格的物性研究,MBE设备已经发展出多种生产型号,以适应许多与MBE材料相关器件产业化的需要。鉴于MBE技术的重要性,中国科学院也意识到中国科学院的MBE设备制造及材料生长技术在国内占据优势地位,决定成立“MBE技术开发基地”,由沈阳科学仪器厂联合物理所、半导体所及上海冶金所研制MBE-IV型设备。

IV型设备除了样品架的基本设计沿用了III型的结构外,总体设计有了很大的变动。主要有以下几点:

(1)系统由一个进样室、一个预处理室及两个生长室组成,两个生长室布局在进样室及预处理室的两侧,样品经过预处理后可以根据需要传递到左或右生长室进行外延生长,提高了设备的效率。

(2)生长室的轴线与水平成 30° 的角度,这样既避免了垂直配置生长室冷阱上的凝聚物坠落引起的交叉污染,又没有水平配

置生长室中某些分子束炉角度向下的缺点。

(3)进样室、预处理室与生长室之间的样品输送采用转轴驱动的导轨实现,样品的装卸由磁力耦合的拨叉完成,使得样品传递过程更为简便且可靠。

(4)从MBE-I型到III型,分子束炉与转动的快门都安装在同一个大的束源法兰上,而MBE-IV型的快门采用电磁驱动或气动驱动的直线移动方式,安装在与生长室轴线垂直的法兰上,使得束源炉布局更宽松。

(5)样品的最大尺寸增加到3英寸,并且一次能装卸10块样品,使得IV型设备向实用化又迈进了一大步。

(6)IV型设备的计算机控制系统由物理所承担研制,其功能有很大的提升:设计成两级控制,上级为当时流行的IBM-PC/XT机,下级计算机为自行设计的实时控制机。在上级机中可以编写材料制备程序,该程序以通信方式传给下级机,下级机是一个专门设计的STD总线微机系统,对炉温、快门等进行实时控制。可以生长制备任何复杂的多层结构。

(7)在MBE-IV型设备的研制中,半导体所承担了RHEED强度振荡数据采集记录装置及碎裂解炉,物理所承担了分子束源炉、电磁驱动快门及快门驱动电源,并且提供给设备的各使用单位。

IV型设备共计制造了5台,其中分配给物理所、半导体所及上海冶金所各一台,从而使得这三个研究所分子束外延材料的制备能力有很大的提升。

1989年在莫斯科举办“中国科技日”,在中国科学院支持下,由物

理所与沈阳科仪厂联合，将MBE-IV运抵莫斯科参展，显示了中国在高科技领域的成就。该设备是展览会上大型设备之一(图6)。

5 金属有机源分子束外延设备的成功研制

MBE一般都是使用固体的高纯材料做分子束炉的源材料，在生长材料体系上有一定的局限性，例如较难生长含磷化合物及含氮化合物。而有机源分子束外延(MOMBE)技术能够弥补其不足。国产的MOMBE设备是“七五”期间由半导体所联合沈阳科仪厂研制成功的。该设备全程由计算机控制生长过程，可以生长量子阱超晶格复杂结构。20世纪90年代，半导体所用这台设备成功生长了GaAs、InP、InGaAs/(100)InP和GaAs/InGaAs多量子阱材料，X光双晶衍射观察到十级衍射峰，表示材料有较高质量^[4]。

半导体所研制的金属有机源分子束外延设备与MBE-IV型分子束外延设备联合申报，获得1993年的国家科技进步二等奖。

6 分子束外延材料与相关器件的研制

分子束外延设备不断地改进和发展，外延生长技术的不断提高，极大地促进了我国与分子束外延材料质量息息相关的基础研究及器件研制的发展。

我国的MBE材料生长研究是从GaAs-AlGaAs体系起步的。1981年开始GaAs-AlGaAs超晶格微结构生长，获得了较好性能的调制掺杂GaAs-AlGaAs高电子迁移率场效应晶体管(HEMT)结构。与电子工业部门研究所合作，很快制作成12 GHz

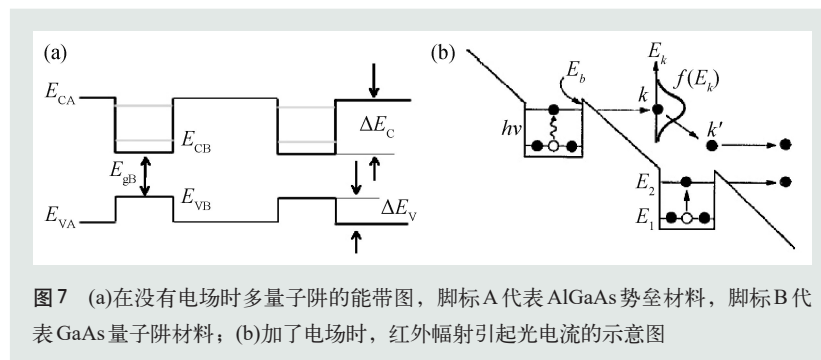


图7 (a)在没有电场时多量子阱的能带图，脚标A代表AlGaAs势垒材料，脚标B代表GaAs量子阱材料；(b)加了电场时，红外辐射引起光电流的示意图

的低噪声微波器件、功率HEMT器件及直接耦合场效应逻辑11级和25级HEMT环形振荡器。

1986年中科院半导体所研制出利用量子阱结构作为有源区的激光器，实现室温激射之后，又实现了室温连续激射，阈值电流密度达到 946 A/cm^2 。6 μm 宽单条MQW-LD的线性输出功率大于100 mW^[4]。由于多量子阱结构对载流子及光的双重限制作用，会大幅提升发光器件的性能，被广泛用于半导体各类激光器和半导体多种波长的发光二极管中。

在电子工业部研究所使用科学院的几个研究所制备的MBE材料成功研制HEMT微波器件后，国家科技攻关主管部门已认识到利用中国科学院的研究所制作MBE材料的优势，与电子工业部研究所器件研制优势结合起来，是快速推进我国与MBE材料相关的微波器件研制的有效方式。此后中科院的几个研究所都参加了与MBE材料有关的科技攻关任务。20世纪80年代中期国际上出现了以应变层作为电子沟道层的所谓PHEMT结构，该结构是在HEMT结构的GaAs和AlGaAs层之间加了一层应变的InGaAs，其电学性能明显优于HEMT结构。PHEMT材料，一种只在AlGaAs层中进行平面掺杂，适合制作微波低噪声器件；另一种

是在AlGaAs和GaAs都进行的双平面掺杂，在沟道里获得更高的电子浓度，适合制作功率器件。

到“八五”科技攻关阶段，电子工业部的器件研究所利用科学院提供的单平面及双平面掺杂的PHEMT材料制作了一系列性能优良的微波器件，例如：制备了8 mm低噪声三端器件，特征频率 $f_o=35 \text{ GHz}$ ，噪声系数 $F_n=2.46 \text{ dB}$ ，增益 $G_a>6.95 \text{ dB}$ ，成功填补了国内空白，并用于某工程雷达上；研制成 K_u 波段的低噪声单片， $f_o=11.7\text{—}12.2 \text{ GHz}$ ， $F_n=1.8 \text{ dB}$ ， $G_a=14 \text{ dB}$ ；制作成功 K_u 波段功率单片，在15.5—16 GHz下， $P_o=1.7 \text{ W}$ 输出，跨导 $g_m>300 \text{ mS/mm}$ 。研制成国内首支8 mm功率PHEMT器件，通过电子部军工基础局技术鉴定，认为达到当时国际实验室水平(当时无商品)。上海冶金所在科技攻关任务中，承担GaAs/AlGaAs异质结双极晶体管(HBT)的材料制备，器件的性能： $\beta=50$ ，特征频率 $f_T=7.5 \text{ GHz}$ ，在2 GHz工作频率下，相关增益达13 dB。在国家科技攻关期间，物理所、半导体所等单位也将MBE外延片提供给中科院微电子中心，研制成功环形振荡器及用移相掩膜技术制备的PHEMT等器件，提升了中科院研制微波器件的能力。

在制备包括多量子阱激光器在内的光电器件材料方面，MBE方法

渐渐被之后发展起来的金属有机化合物气相淀积(MOCVD)技术所取代。但是在制作微波场效应器件方面, MBE方法具有不可取代的地位, 这是因为MBE生长的GaAs缓冲层具有弱P型的半绝缘性能, 非常有利于制作高性能的器件。至今, 工业规模生产高频、高速场效应晶体管都是使用MBE材料。

量子阱红外探测器是半导体超晶格实际应用的一个范例, 它是基于量子阱子带间光电子跃迁对红外辐射的共振吸收制作而成的光导型红外探测器(图7)。其主要特点是中心响应波长可以由生长参数调节, 响应速度快, 制作工艺成熟, 热稳定性好, 一出现就得到国际上的重视。物理所是国内首家提出研制GaAs/AlGaAs量子阱红外探测器的单位。在国家自然科学基金支持下, 1990年10月研制出我国第一支量子阱红外探测器。1991年又获重点基金项目资助, 在原来已成功 45° 光耦合式的基础上, 又成功研制出更有实际应用价值的高水平光栅耦合式量子阱红外探测器。因此获得1993年中科院科技进步一等奖, 及1995年国家科技进步三等奖。

在国产MBE设备的支持下, 国内MBE材料的研究在多种材料体系及各种基础研究方面获得了进展, 例如: (1)在InP衬底上生长的InGaAs/InAlAs异质结调制掺杂HEMT及PHEMT器件, 其性能优于GaAs衬底上的HEMT; (2)开展了含Sb的III—V族化合物的生长, 在GaSb衬底上成功生长了制备光导探测器的材料; (3)开展了PbSnTe/PbTe、SnTe/PbTe量子阱材料的研

究; (4)在GaAs衬底上生长了ZnSe-ZnS, ZnSe-ZnSe_{1-x}Te_x超晶格, 并开展了相关研究; (5)在InP衬底上生长了ZnSe/ZnTe超晶格, 进行了一系列光学性质的研究; (6)对GaAs/AlGaAs量子阱结构的量子尺寸效应、量子限制斯塔克效应、共振隧穿效应进行了广泛的基础物理研究及器件应用研究; (7)含Hg的II—VI族窄禁带化合物是制作红外探测器的重要材料, 中科院上海技术物理所在用MBE方法制备HgCdTe红外探测器上做了大量工作, 获得了一系列重要结果。

国内MBE生长的量子阱、超晶格及各种微结构, 促进了该领域的基础研究, 在国家层面上的一个重大布局是中科院半导体所在1988年开始筹建半导体超晶格国家重点实验室, 实验室以研究和探索半导体量子阱超晶格体系中的新现象和新效应为主要目标, 获得了一系列的研究成果, 提升了我国在半导体光电子和光子信息方面的国际竞争力。

7 结束语

20世纪80年代末, 国内MBE技术的发展促使西方解除了对中国MBE设备的禁运, 之后国内的MBE市场基本上被进口设备所垄断, 其原因值得国人深思。总的来说, 国内分子束设备制造虽然经历了4个型号, 但是每个型号结束后, 再也没有投入对设备的研发, 也就是缺乏持续发展的能力。此外, 国内与MBE技术相配套的超高真空部件的制造水平较差, 致使设备的总体性能、可靠性及稳定性比较差, 故障率比较高。如果当时多用国外采购来弥补国内某些方面的

不足, 国产MBE设备与进口设备有可能并行发展, 毕竟国产设备的价格低得多, 维修服务也会更快捷。

国产分子束外延设备的发展经历了近15个年头, 创立了研究所与设计及制造方紧密合作, 不断互相反馈, 携手前进的典范。使中国的分子束外延技术不仅从无到有, 而且从实验型发展到了应用型, 大大促进了我国与分子束外延材料有关的微波器件、光电器件的研制以及量子阱超晶格的物理研究, 争取到了十余年的时间。不仅如此, 分子束外延设备制造技术也带动了国内超高真空技术的进步, 例如用可伐金属与玻璃封接的超高真空观察窗、焊接波纹管、高真空用的多维操作的样品架、陶瓷密封电极等, 都成为了商用产品。国内分子束外延技术及外延材料的发展过程为中国科技工作者不畏西方的禁运, 自强不息、自力更生发展我国科学技术, 留下了光辉的一页。2000年分子束外延国际会议第一次在中国召开, 中科院半导体所林兰英院士任会议主席, 物理所周均铭任大会副主席兼组织委员会主席, 与会外宾近200人, 会议的成功召开充分展示了国内自主发展的分子束外延技术, 为我国分子束外延技术在国际上取得的地位做出了重要贡献。

参考文献

- [1] Esaki L, Tsu R, IBM J. Res. Dev., 1970, 14:61
- [2] Cho A Y. Appl. Phys. Lett., 1971, 19:467
- [3] 周均铭等. 物理学报, 1986, 35:269
- [4] 孔梅影. 半导体情报. 1991, (06):002
- [5] 科学技术成果鉴定证书. 中国科学院 (86)成鉴字094号