

半导体科学技术发展的历史回顾

彭英才

(河北大学电子与信息工程系, 保定 071002)

半导体科学技术是 20 世纪中最伟大和最重要的科技成就之一。在高新技术迅速发展的今天, 重温其发展历程, 总结其发展规律和认识其发展特点, 具有重要的现实意义。作者着重评述了近半个世纪以来, 半导体科学技术在材料、物理、器件与工艺四个领域内所取得的一系列重大进展。

从 1948 年晶体管的发明到现在已经有 45 年了。晶体管的发明开创了半导体科学技术发展的新纪元。半导体科学技术的发展, 不仅有力地推动了现代科学技术的发展进程, 而且从根本上改变了当代人类社会生活的面貌。近半个世纪以来, 半导体科学技术把材料、物理、器件与工艺融为一体, 四者相互影响、促进、交叉与渗透, 成为完美体现当代科学技术发展新特点的一个典范。纵观 45 年的半导体科学技术的发展历史, 不难看出, 半导体新材料不断涌现, 新效应不断发现, 新器件不断问世, 新工艺不断采用。新的工艺技术创造了新的人工材料, 新的人工材料孕育着新的物理效应, 基于新的物理效应诞生了新型功能器件, 而新型功能器件性能的提高又直接依赖于器件结构的不断完善, 这自然又对工艺技术提出了新的更高要求。也正是这一具有正反馈效应的发展模式, 使半导体科学技术以生机勃勃的姿态, 不断取得一个又一个的新进展。

一、种类繁多的半导体材料

半导体材料是半导体科学技术发展的先导, 同时也是产生新效应的源泉和制造固态电子器件的物质基础。冯端教授曾经指出^[1]: “材料技术的核心为新材料的研制和传统材料性能的提高”。新材料是按照人的意志, 构想新的结构形式和设计新的化学组分, 并通过现代工艺技术来加以实现的。传统材料性能的提高, 是

物理

运用适宜的工艺手段改变材料的微观结构, 使其呈现出常规材料所不具有的全新的原子组态。

1. 传统材料

40 年代末期, 美国贝尔实验室 W. L. Shockley 的研究小组, 采用 Ge 单晶材料制成了世界上第一支点接触晶体管。这一具有划时代意义的伟大发明, 不仅奏响了固态电子器件发展的序曲, 同时也揭开了材料发展的序幕。50 年代中期, 人们利用悬浮区域提纯和直拉生长技术制备了高质量的 Si 单晶材料。1959 年前后, Si 平面型双极晶体管和集成电路的出现, 为 Si 材料的发展开辟了广阔的应用前景。迄今以 Si 为基质的半导体集成电路已经发展到超大规模集成和超高速集成以及三维多层集成的阶段。

GaAs 材料所具有的优异物理性质, 使其在微波、光电器件及其高速集成电路的应用中受到极大重视。但是由于 GaAs 材料中含有易挥发元素, 同时也因在其表面难以形成一层像 SiO₂ 那样的绝缘层, 以致使 GaAs 的应用落后于 Ge 和 Si 材料。60 年代中期, 高压液封直拉和液相外延生长技术的采用, 使 GaAs 的优良特性得以实现。其后, 以 GaAs 为基质的高速微波器件和半导体激光器相继问世, 为以 GaAs 为主的 III-V 族化合物半导体材料的发展奠定了坚实的基础。

Ge, Si 和 GaAs 都是组成原子具有严格周期排列的长程有序材料, 而由无规则共价键

形成网络结构的非晶态半导体材料具有什么样的性质呢? 30多年来,人们对此进行了大量的研究和探索。其中1968年硫系非晶态半导体中开关和存储效应的发现以及1975年a-Si膜中可控掺杂的实现,是非晶态半导体发展史上两项最重要的进展^[2,3]。它刺激了固体物理学工作者对非晶态材料研究的浓厚兴趣。而在80年代中期,以a-Si:H为基质材料的非晶态半导体超晶格的出现,为在更大范围内制备各类非晶态器件打下了良好的基础。

材料技术的不断发展正在丰富着人们的想象力和启迪着人们的思维。按照传统的观点,人们习惯于把材料中的完整晶体视为主体,而将其中的晶界和缺陷等视为从属。然而德国的H. Glitter教授则大胆地从完全相反的观点出发,设想制备出一种由缺陷占相当大体积百分比,而完整晶体却处于从属地位,并使之呈现出与单晶和非晶态绝然不同的物理特征的新材料。这一全新的构思成为80年代后期迅速兴起的纳米微粒、纳米固体与纳米薄膜材料研究的重要契机。初步研究表明,这种包含有大量界面原子且长短程均具无序性的新型功能材料,有着许多令人刮目相看的物理、化学和力学性能,被人们誉为“21世纪中最有前途的材料”。

90年代伊始,材料物理的发展景象蔚为壮观。1990年,英国科学家L. T. Canham首次在室温下观测到多孔硅的可见光光致发光现象^[4]。这一具有重要意义的发现,犹如一石激起千层浪,引发了人们对多孔硅光致发光研究的浓厚兴趣。一时间多孔硅热可谓风靡全球。这不仅使传统的观念受到强烈的震撼与冲击,同时也促使材料物理学家们在经历了许多年之后,重新认识Si这一人们最熟悉的半导体材料。多孔硅的光致发光或电致发光现象,使人们开始看到全硅光电子集成技术的新曙光。

金刚石集许多优异性能于一身,被称为“大自然赐予人类的最特殊材料”。这种材料所具有的宽带隙、高迁移率、高导热系数、大功率容量等独特优点,使它在高温、微波、大功率和高

速电子器件的应用中具有潜在的优势。而足球状碳分子C₆₀所具有的性能稳定,抗辐射和抗冲击能力强,光学非线性以及掺杂后可变为半导体等优异性能,引起了半导体器件工作者的强烈兴趣。

传统材料发展的简单回顾,使我们在一定意义上可以这样认为:就材料结构而言,它大体经历了由单晶→非晶→纳米材料阶段,这实际上是一种从严格的长程有序向高度混乱无序发展的演变过程;就带隙性质而言,它大体经历了由Ge→Si→GaAs→SiC和金刚石等阶段,这实际上是一种从窄禁带材料向宽带隙物质发展的沿革变化。目前,传统材料正在适应信息科学技术发展的需要,向着性能高、应用广和功能强的方向迅速迈进。

2. 人工材料

60年代中期,无线电通信和计算机技术开始获得急速发展。但这些技术的发展是以器件性能的日趋完善为前提。然而由于元素Si和化合物GaAs等传统材料受其自身物理性质的限制,器件性能难以从根本上得到提高,因此材料的发展既面临新的机遇,又受到新的挑战。它迫使材料物理学家们开始寻找新的途径,开发具有全新物理效应的新型人工材料。70年代初期,著名物理学家江崎与华裔科学家朱兆祥,基于试图人为地控制半导体中电子的势分布与波函数的设想,首次提出了半导体超晶格的新概念。恰逢此时,分子束外延技术也在美国贝尔实验室和IBM公司开发成功。新思想与新技术的巧妙结合,制成了第一类晶格匹配的组分型Al_xGa_{1-x}As/GaAs超晶格,开创了具有一维量子封闭性的半导体超晶格与量子阱研究的新局面。它标志着半导体材料的发展开始进入人工设计的新时代^[5]。

随着超薄层外延技术的长足进步,量子阱材料的种类逐渐增多,先后出现了一、二、三类组分型超晶格和nipi掺杂型超晶格等。但是,完全晶格匹配的异质结材料是十分有限的。为了拓宽超晶格材料的应用范围,80年代中期,膺匹配的应变层异质结研究获得了迅速的发

展,先后出现了 III-V 族, II-VI 族, IV-IV 族, IV-VI 族以及 III-V/II-VI 异族应变层超晶格结构,从而使超晶格与量子阱材料的研究又出现了一个新的热潮。它可以使人们利用能带工程,在更宽的范围内实现对材料能带结构的任意剪裁,进而导致了一系列新器件的出现。在应变层超晶格的研究中,有两个特别引人注目的方面。一是 Si 分子束外延的进展,使得以 Si 为基质材料的 GaAs/Si, Ge/Si 以及 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 应变层结构受到人们的极大重视^[6]。因为这类材料可广泛应用于异质结双极晶体管和调制掺杂场效应晶体管的制作,还可应用于长波长光纤通信以及光电子集成电路的制作。二是 II-VI 族宽带隙应变层超晶格具有较大的激子束缚能和很强的光学非线性,以致于它在蓝色和蓝绿色发光器件中占据着重要地位,因而倍受人们的青睐。

人工材料发展的突出特点,即低维化、量子化和功能化是显而易见的。既然人们能够用分子设计与能带工程实现对载流子的一维束缚,那么能否把独具匠心的人工设计与巧夺天工的工艺技术相结合,实现对载流子的二维乃至三维量子束缚呢?基于这种设想,日本年轻的物理学家 H. Sakaki 于 1976 年提出了量子细线与量子点的新概念,并从理论上预言,量子细线结构中的电子迁移率将超过 $10^7\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$,其平均自由程可达 $100\mu\text{m}$ 。这种超快的电子输运性质对于平面型超晶格及量子细线晶体管等新型快速器件的设计将是极鼓舞人心的。

结构的低维化带来的另一个显著特点,是载流子有效状态密度的变化,亦即系统对载流子具有更加有效的量子尺寸限制,这使得它们特别适宜制作微细结构激光器,这便是近年来各国科学家将选择生长超薄层外延技术与精细束加工技术密切结合起来,竞相研制量子细线与量子点激光器等光电子器件的主要原因。

二、蓬勃发展的半导体物理

半导体物理是半导体科学技术发展的重要

物理

基础,起着阐明半导体物理效应与性质的作用。伴随着每一种新材料的出现,都必然会引起人们对其从理论和实验上进行深入、细致和系统的研究。50 和 60 年代,固体能带理论、金属-半导体接触理论、p-n 结理论和隧道效应理论代表了这一时期研究的主导方向。进入 70 年代,随着半导体超晶格的产生,表面与界面物理研究的崛起以及非晶态半导体材料的发展,半导体物理领域中开始出现超晶格异质结物理,表面与界面物理和非晶态物理三个既相互独立,而又紧密相关的十分活跃的新分支。

1. 超晶格异质结物理^[7]

载流子的输运效应和激子的光学特性是超晶格异质结物理研究的两个主要方面。前者着重考察被封闭在异质系统中二维电子气在电场作用下的电荷输运和电场、磁场以及温度场作用下的能量输运过程;后者的目的在于探讨二维激子在磁场和光激发作用下的物理行为。

对异质结中二维电子气沿平行于界面的电荷输运最早进行研究的应首推 R. Dingle 等人,他们于 1978 年发现了电子迁移率增强现象。在这以后的短短几年内,物理学家和微电子学家合作,将二维电子气的迁移率提高了近三个数量级。三维电子气迁移率增强效应的研究有两个主要贡献,即导致了两年之后高电子迁移率晶体管的出现和为异质结系统中量子霍尔效应的发现创造了条件。

1980 年,德国的冯·克利青在研究低温强磁场下 Si-MOS 反型层的量子输运时,观测到了量子霍尔效应的存在^[8]。时隔两年, D.G. Tsui 的研究集体在电子迁移率极高的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 异质结中,先后发现了整数及分数量子化霍尔效应,成为超晶格异质结物理发展史上两个振奋人心的事件。如果说异质系统中局域电子态的存在是产生整数量子霍尔效应的物理起因,那么采用不可压缩的费米液体模型可以给出分数量子霍尔效应的简单解释。量子霍尔效应的发现进一步深化了人们对二维电子气的认识,也使物理学家们对低维系统的研究进入了一个新的层次。

任何异质结材料都无法回避载流子的垂直输运现象,这不可避免地要涉及势垒贯穿、负微分电阻、热电子的实空间转移等问题。而双势垒共振隧穿效应是近年人们研究的一个新热点,以此设计具有高峰谷比的器件则更为人们所期待。

量子阱中的二维激子具有比体材料中三维激子大四倍的束缚能,以及在室温下可明显地观测到激子吸收峰存在的物理事实,引起了人们对量子阱结构中二维激子光学性质的研究兴趣。1984年, D. A. B. Miller 等观察到激子吸收峰随电场强度变化发生红移或蓝移的量子约束光学斯塔克效应,以及由激子吸收系数或折射率变化引起的激子光学非线性效应。这为设计新一代光学器件和发展光电子集成技术提供了重要物理依据。近年来,二维激子物理的研究继续向纵深方向发展。人们开始系统研究能带混合对激子线宽的影响,混合价带中自由激子和平面角动量对激子束缚能的影响,以及激子-激子,声子和杂质的相互作用等。

被称为介观系统的量子线、量子点和量子环等一类低维结构所具有的各种鲜为人知的量子化现象,吸引了大批低维物理学工作者,使他们为之倾注心血。准确揭示上述量子化现象的奥秘和设计构思量子效应器件的任务,正促使人们对介观体系中的量子弹道输运,霍耳效应的低场猝灭,相位损失过程对共振隧穿的影响, Aharaov-Bohm 振荡以及量子点中的库仑阻塞现象进行系统的理论研究。

2. 表面与界面物理^[9]

表面与界面物理是半导体物理研究中的一个重要方面。表面和界面性质的最基本问题或核心内容,是表面的原子结构和电子态。随着器件尺寸的微型化,表面和界面所占的比重越来越大,以致于人们又提出了“表面和界面工程”的概念。

早在 60 年代初期,人们就意识到 Si-MOS 器件及其集成电路的稳定性与栅氧化层中的各种界面电荷状态直接相关。其后进行的 10 多年半导体表面钝化的研究,使 MOS 集成电路

获得了稳定发展。这一时期中各种表面能谱分析技术相继出现,促使人们开始从原子尺度上来研究表面及界面的电子结构与性质。近 30 年来,围绕着表面原子结构,价键的形成,表面的吸附,表面生长的细节以及表面实验方法而进行的卓有成效的研究,不仅进一步加深了人们对表面微观结构的认识,同时也对固体电子器件的设计产生了重大影响。

Si(111)7×7 表面再构,是自 1959 年以来关于 Si 表面研究中的一个热点。在此后的 27 年中,人们先后提出过许多模型,都未能对其物理本质作出合理的解释。直到 1985 年,日本东京工业大学的 K. Takayanagi 在前人工作的基础上,由透射电子衍射,提出配对-外加原子-层错(DAS)模型,第一次较成功地解释了 Si(111)7×7 表面再构^[10]。

毫无疑问,III-V 族化合物半导体表面与界面的研究是另一个引人注目的课题。除了极性与非极性表面的电子结构与表面化学吸附之外,人们似乎更加关心金属与 III-V 族化合物表面的接触问题,而其中有关肖特基势垒的形成起因又是一个至关重要的研究内容。20 多年来,一些表面物理学家先后提出了“统一缺陷模型”、“金属感应能隙模型”、“有效功函数模型”、“化学键模型”等,用于解释表面对半导体费米能级钉扎现象的影响,但均未获得成功。原因可能是金属与 III-V 族化合物半导体之间的界面发生原子互混、外扩散、置换反应等复杂的化学过程,因而对金属在半导体表面上的生长过程以及对半导体表面详细原子结构的了解就变得尤其重要。

近年来,表面及界面物理的发展方兴未艾。人们除了采用各种表面分析手段继续对 Si(111)7×7 进行深入研究外,还对其他 Si 表面的原子结构,金属及氢等对表面的吸附与解吸,以及 NiSi/Si, CoSi/Si, PtSi/Si, Co/Si, Pb/Si 等硅化物/硅和金属/硅的界面性质开展了广泛研究。III-V 族极性清洁表面的各种再构模型和电子态的色散关系,金属与 III-V 族化合物的界面结构,界面反应及费米能级的钉

扎,气体在表面的吸附位置,成键形式和初期氧化等,集中代表着 III-V 族化合物半导体表面与界面研究的主要方面。与此同时, III-V 族化合物半导体超晶格异质结,硅系应变层异质结和 IV/III-V 族异质结等体系的界面处的原子排列、互扩散、界面电子态的变化以及能带失配等都有丰富的研究内容。

表面与界面的研究离不开先进的表面分析手段。以超高真空技术为物理基础的俄歇电子能谱 (AES) 和 X 射线光电子谱 (XPS) 等表面分析技术在研究半导体表面和界面的基本特征方面发挥了积极的作用。但这些常规的方法还不能真正从原子尺度上对复杂的表面进行十分方便的研究,也不能探知表面下界面的结构与性质。因此人们又发展了多种表面分析手段,其中最具有影响的是 1982 年 G. Binng 等提出的扫描隧道显微镜 (STM) 技术。它不仅能对物质表面原子的几何排列和表面形貌直接进行观察,而且配合扫描隧道谱学 (STS) 原理,还可以获得表面价键、能隙等电子结构信息。而长期争论不休的肖特基势垒形成与费米能级钉扎等问题,也许可以从这里找到答案,作为 STM 的新发展,是原子力显微术 (AFM) 和弹道电子发射显微术 (BEEM) 的出现。AFM 可获得高分辨率表面原子像,特别是新出现的激光检测 AFM,由于它具有探测针尖对样品表面影响小,有较强的抗震能力,能避免沾污以及样品可自动调节等优点,将能提供有关表面原子结构的详细信息。而 BEEM 可得到有关肖特基势垒的局域高度,电子在界面处的量子力学反射以及金属膜中电子弹道输运等许多微观信息。最近, R. J. Warmark 又提出了光子扫描隧道显微术 (PSTM)。它是通过一个光学纤维尖端在表面上扫描,可得到三维光学表面拓扑,其分辨率可在亚波长级。而新近的利用氢将半导体表面原子移去或推开的办法,可使人们用 STM 观察表面下一层或者更多层,甚至整个原子断面结构的庐山真面目。

3. 非晶态物理^[1]

非晶态半导体的基础理论研究正在深入发

物理

展。由于非晶态材料具有许多与晶态半导体不同的新颖性质,因而研究的方法也必须作相应的改变。在非晶态半导体中,除了导带和价带的扩展态之外,带尾局域态以及带隙中的缺陷局域态都将对输运过程有贡献。因此,测定能带中的隙态密度分布和用弥散性传导理论研究材料中载流子的输运过程,便成为非晶态物理研究中的一个首要问题。从 70 年代初期开始,人们先后采用场效应 (FE) 法、深能级瞬态谱 (DLTS) 法、内光发射瞬态电流温度谱 (IPE TCTS) 法、空间限制电流 (SCLC) 以及电子自旋共振 (ESR) 法等,对非晶态材料的隙态密度及其分布成功地进行了测量分析。弥散性传导是对非晶态半导体中较复杂输运过程的一个科学而形象的描述。20 多年来,物理学工作者运用渡越时间法 (TOF),表面波传输法 (SAW) 和瞬态光电导衰减法 (TPC) 等,系统地研究了非晶态材料中的电子迁移漂移率以及弥散性传导过程等。

非晶态半导体薄膜在光电效应方面的敏感性,使它成为制备光电器件的自然候选者而受到人们的重视。但是,非晶态半导体的性能会因光照而发生具有亚稳的光诱导现象。因而,澄清代表光诱导现象的 Staebler-Wronski (S-W) 效应产生的机理和持久光电导 (PPC) 过程的起因,便成为非晶态物理研究中又一个关键问题。80 年代中,人们提出了 Si-Si 弱键断裂模型、悬挂键电荷变化模型和 Si-H 键断裂模型,并对 a-Si:H 中的 S-W 效应进行了可能的解释,使非晶 Si 的光致亚稳态变化研究取得了可喜进展。

实验上观察到的许多物理现象都表明,非晶态半导体的掺杂过程在本质上不同于晶态半导体。1982 年, P. A. Street 提出了“掺杂剂换位对” (PAVP) 模型,后由 J. Robertson 于 1985 年加以完善,使之成为一个能较有效地描述非晶态材料掺杂过程的理论。而用自洽场-原子轨道线性组合 (SCF-LCAO) 量子化方法研究 a-Si 及 a-Si:H 的掺杂机理是近年内取得的又一个新进展。

三、日新月异的半导体器件

新材料的出现和新效应的产生为新器件的设计开辟了广阔的道路。超高速逻辑器件、高性能光电子器件及其集成电路系统代表了当今器件发展的主流。小型化、功能化和量子化显示了器件发展的新特点。半导体器件的这种发展趋势预示着,以半导体科学技术为基础,以通信和计算机技术为两翼而发展的信息科学将出现突破性进展。

半导体器件目前尚无严格确切的分类方法。按物理效应可大致分为基于经典力学现象的常规电子器件和基于量子力学效应的量子电子器件;按有源区尺度可分为微米、亚微米和纳米器件;按结构维度可分为三维、二维、一维和零维器件。下面将按器件维度的分类方法来论述半导体器件的若干重要进展。

1. 三维器件

以 Si 为基础的双极和 MOS 器件及其集成电路,目前仍保持着良好的发展势头。最近,日本报道了世界上最小的、有效沟道长度为 $0.03\text{--}0.04\mu\text{m}$ 的 MOS 晶体管便是一个明证。但是,正如人们已经看到的那样,集成度的不断提高和器件尺度的不断减小,也正向其极限日益逼近。精细束加工技术可以使器件的特征尺寸进一步微细化,但寄生或二级效应将会使器件尺寸限制在一定水平,诸如速度饱和、自锁效应、热载流子效应、量子隧穿、引线延迟以及热耗散效应等。要解决这一系列棘手的问题,单靠一般的修修补补的办法已无济于事,必须采取新的科学措施。目前,国际上十分重视使用低温技术,以在一定程度上抑制或缓解这些因物理与工艺限制而带来的复杂困难。低温技术为微电子器件提供了优化的工作环境,并极大地提高了器件、电路与系统的工作性能,如可以提高工作速度,减小热噪声,增加可靠性等,从而为未来的千兆级集成电路(GSIC)和超高速大容量计算机的发展带来了光明的前景。

真空微电子器件具有集成度高、工作速度

快、耐高温、抗强辐射、抗强电磁脉冲等优良特性,成为近年来研究的又一个新热点。其中,场致发射极的结构设计和制作方法是这种器件研究的主攻方向。可以预计,真空微电子器件及其芯片的研制,不仅会促进电子信息技术的更新,而且将为真空电子学的复兴开辟道路。此外,以金刚石、碳化硅和 III 族氮化物等宽带隙半导体材料为基础的高温、高频、高速和大功率器件的研究也正迈向一个令人振奋的时代。

2. 二维器件

1966年由 C. A. Meed 研制成功的肖特基势垒场效应晶体管(GaAs MES FET)及其微波集成电路,正在卫星、通信和计算机中发挥着十分重要的作用。其实,GaAs 材料的魅力还不止于此,具有调制掺杂效应的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 超薄异质结,为二维电子气的输运提供了十分理想的结构系统。1980年,日本富士通公司的 T. Mimura 等人,不失时机地利用 R. Dingle 等人所发现的调制掺杂异质结中电子迁移率增强现象,成功地研制出高电子迁移率晶体管,成为半导体器件发展史上的一个重要里程碑^[2]。10余年来,高电子迁移率晶体管已从最初的分立器件发展到大规模集成的阶段,而且器件自身的结构、系统和性能也在发生着重大改变。几乎在同一时期,异质结双极晶体管也悄然登场。器件物理学家们对异质结双极晶体管的器件结构、输运特性和电路构成等方面都作了大量的系统研究,其中共振隧道基区异质结双极晶体管的实现和载流子输运过程的计算机模拟就是两个明显的例证。可以相信,异质结双极晶体管将以其所具有的高电流增益性质在快速动作器件的竞争中一展风采。而共振隧道二极管、共振隧道晶体管、热电子晶体管以及由周期性多量子阱构成的超晶格器件的设计与制作,将为双势垒共振隧穿效应等开辟新的研究方向。这类器件的成功也将在快速模拟-数字转换和记忆单元中显露锋芒。

半导体量子阱中能带与子能带跃迁过程的研究导致了量子阱激光器(QWL)、超晶格光波导和长波长量子阱红外探测器等一批光电器

件的出现。与双异质结半导体激光器相比, QWL 具有更低的阈值电流密度, 更高的调制速率, 更大的输出功率和更小的量子噪声等。超晶格光波导具有传输速率快和信息容量大等突出优点, 可望在光纤通信中获得广泛应用。红外技术的发展为量子阱红外探测器的研究开辟了新途径^[43]。在过去的 20 多年中, $\text{Hg}_{1-x}\text{CdTe}$ 单元红外探测器已经付诸实用。但是, 在开发多元阵列探测器的过程中, $\text{Hg}_{1-x}\text{CdTe}$ 单元探测器遇到了不可逾越的障碍。1987 年, B. F. Levine 研究小组首先在 GaAs/AlAs 掺杂量子阱中观测到了波长为 $8.2\mu\text{m}$ 的强子带吸收, 并制成了 $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ 共振隧穿的红外探测器。1988 年, 他们又研制成功由束缚态到扩展态跃迁的多量子阱红外探测器, 从而使长波长量子阱红外探测器的性能跃上了一个新台阶。近年来, 这一领域的发展可以说是高潮叠起, 前景广阔。

3. 一维及零维器件

进入 80 年代以来, 在超晶格与量子阱研究取得迅速发展的同时, 介观体系所具有的各种量子化效应, 正在促使人们着手设计并制作新一代量子功能器件, 这是一项适应 21 世纪需要的高度信息处理的革新性技术。这些器件包括: 利用量子细线中一维电子气的高电子迁移率效应设计超快速逻辑开关器件; 利用量子点(箱)的可集蓄电子原理构想大容量存储器或并行运算处理器; 基于控制电子波函数的相位设计横向量子干涉器件; 利用量子细线和量子点对载流子的强封闭效应制备微细结构激光器等^[44]。这些新型量子功能器件将同单电子学器件、超导电子器件、分子电子器件、神经元光学器件以及真空微电子器件一起奠定了新一代计算机设计与制作的基础。

尤其值得一提的是, 纳米区的科技发展为量子功能器件的设计开辟了一条崭新的坦途。1991 年美国 IBM 公司的科学家们已经制成了开关速度为 0.05 ns 的氩原子开关。随着纳米科学技术的发展, 如果能够准确无误地安排各类大量单个原子的位置, 便会极大地缩小电子电

路的尺寸, 还可以极大地提高数据存储密度。这将使得将来制造诸如便携式超级计算机成为现实。

四、巧夺天工的工艺技术

如果我们把半导体科学技术比喻成一座正在建造中的现代化大厦, 那么各种材料, 物理效应, 器件与电路便分别是营造这座大厦的建筑材料, 设计方案和房间布居, 而工艺技术则是支撑这座大厦的栋梁与支柱。在诸多的工艺技术中, 各类薄膜的制备技术和以电子束、离子束和光子束为主的三束微细加工技术又是最为重要的。

1. 薄膜制备技术

薄膜制备工艺是半导体工艺技术的核心。30 多年来, 薄膜工艺的发展有如下四个显著特点, 即工艺的低温化, 膜层的超薄化, 组分的多元化和区域的选择化。

50 年代末期, Si 高温气相外延 (VPE) 实现了第一支外延平面型晶体管。但 1000°C 以上的高基片温度所引起的诱生缺陷, 杂质沾污和气相自掺杂效应等不利影响, 一直阻碍着 VPE 的进一步发展。利用不同源气体材料之间的化学反应成膜的化学气相淀积 (CVD) 工艺, 不仅将生长温度降至 800°C 以下, 而且由此引发出许多 CVD 技术。其中低压 CVD (LP-CVD), 不仅使基片温度再度降低, 而且膜层的均匀性、重复性和膜层质量都得到了大幅度的提高。

70 年代中期, 兼备物理和化学气相淀积的等离子体增强化学气相淀积 (PE CVD) 开始出现。它将工艺温度降到 250°C 左右, 并在各类薄膜的制备中大显身手。迄今 PE CVD 一直在薄膜制备工艺中处于名声显赫的地位。然而, 等离子体辐照损伤是 PE CVD 的一个弱点。这个问题随着光化学气相淀积 (光 CVD) 的出现而得以解决。1979 年, D. H. Ehrlich 等采用氩激光倍频首先实现了金属膜的激光辅助生长。随后, 光 CVD 研究一直成为国际上的一个活跃领频^[45]。这种将光能引入 CVD 系

统,依靠源气体分子对光的选择吸收,采用光致气相分解和光致表面分解的成膜方式,不仅有效地避开了 VPE 和 PE CVD 的不足,而且将工艺温度降低到 100℃左右。这种清洁的低温化成膜工艺大大改善了膜层质量,从而使器件与电路性能得到明显提高。

以能够制备具有原子级平滑程度的超薄异质结构材料而著称的分子束外延 (MBE) 和金属有机化学气相淀积 (MO-CVD) 技术是超晶格与量子阱研究的生命线。近 20 年来,二者各有特色,互相补充,如今已达到了日臻完善的程度^[6]。MBE 的生长机理一般可以认为是发生在远离热平衡条件下的表面动力学过程。但调制分子束质谱技术和反射式高能电子衍射 (RHEED) 研究结果表明,MBE 的生长过程是一个热力学现象和动力学现象同时并存和相互关联的过程。近年,MBE 又有新的进展,先后出现了间隔生长 MBE,温度开关 MBE,锁相外延 (PLE) 和表面增强迁移外延 (MEE) 等。MO-CVD 的反应机制与 MBE 完全不同,它是用氢气把有机化合物蒸气和气态非金属氢化物一起送入反应室,使其在加热的衬底上发生热分解反应,进而在基片表面上生长出超薄外延层。它的生长过程涉及流体动力学、表面热力学和气-固表面反应动力学等复杂过程。作为 MO-CVD 的最新发展,低压 MO-CVD,光 MO-CVD 以及选择生长 MO-CVD 正在各类超薄异质结构的制备中发挥着日益重要的作用。

显然 MBE 和 MO-CVD 各自具有许多工艺特点,但也都有不足之处。例如在 MBE 生长中,外延层会出现与 Ga 相关的椭圆形缺陷,组分梯度生长困难,横向组分均匀性欠佳等。在 MO-CVD 生长中,由于衬底温度较高,因而将使膜层纯度和界面质量变差。于是,一种集 MBE 和 MO-CVD 二者优点的新型外延生长技术——化学束外延 (CBE) 应运而生。在 CBE 生长中的 III 族和 V 族元素全部采用气态源。进入超高真空生长室的气态源分子束流,直接喷向加热的衬底表面,经过表面吸附、

迁移、分解、脱附等一系列化学反应过程,生长出具有严格组分计量的高质量超薄层材料。采用 CBE 不仅可以获得突变异质结,大大降低与 Ga 相关的椭圆形缺陷,而且通过精密的电子质量流量计,可对生长过程进行瞬态控制,以实现多组元化合物薄层异质结生长。另外,基于“自限制生长效应”的原子层外延 (ALE),由于生长温度低,掺杂剂的扩散可以忽略不计,所以可获得很陡的杂质分布,对 δ 掺杂和选择生长极为有利。在超薄层外延技术的激烈竞争中,原子层外延技术也获得了进一步发展。其中,脉冲喷射外延 (PJE) 可在高于 500℃的衬底温度下实现单原子层生长。而激光 ALE 不仅可以在 400℃的低衬底温度下获得单原子层生长,而且具有选择生长的优势。所谓选择生长,通常具有两方面的含意:一是在由蚀刻所规定的确定部位或区域进行生长,而其他部位是非生长的;二是依靠源气体分子于不同的衬底表面温度和反应剂气压下,在不同晶向的衬底上具有不同的生长速率,以获得所期望的量子尺寸微结构,如量子线或量子点的生长等。

2. 精细束加工技术^[7]

束技术创造了微结构,微结构又发展了束技术。可以毫不夸张地说,半导体科学技术的整个发展过程就是精细束加工技术日益发展的一个真实写照。

60 和 70 年代的主要曝光手段是常规的接触式曝光。但这种曝光方法因需光刻掩膜与 Si 片紧密接触,易于引入大量工艺缺陷和损伤,后来逐渐被淘汰。取而代之的则是接近式或投影式曝光。这两种曝光方法的采用,不仅大大提高了光掩膜的重复使用率,而且使得光刻缺陷也随之大幅度减少,成为线宽小于 3 μm 光刻工艺的主要工具。

随着器件结构尺寸的日渐缩小,亚微米光刻工艺开始得到发展。此时投影曝光因受衍射作用的限制难于获得 1 μm 以下的光刻线条,因此人们不得不另辟蹊径。这就是 70 年代后期

(下转第 105 页)