

# 我国半导体超晶格科学的进展

郑厚植\*

**【摘要】** 半导体超晶格是当代固体物理学的新生长点和重要前沿领域。它是以具有各种人工剪裁能带结构的半导体低维电子系统(二维、一维和零维)为其主要研究对象,涉及半导体物理、材料和器件的综合性研究领域。

“半导体超晶格微结构”的研究属国家自然科学基金委员会重大基金项目,它以探索、开发新一代固态电子、光电子器件作为研究工作的着眼点;以生长超薄、陡变和大面积均匀的超晶格、多层异质结等低维量子结构的分子束外延(MBE)和金属有机化合物气相淀积(MOCVD)等超薄层材料生长手段为技术基础;着重开展半导体超晶格低维系统与普通三维固体不同的新物理现象和效应及其潜在的应用前景方面的基础研究;研究和探索新一代超晶格量子器件的新原理、新模式和新结构。

本项目的总体设想是要在全国范围内组织起具有国内第一流水平,国际先进水平的,对半导体超晶格量子阱材料、物理和器件进行综合性基础研究的科研实体;经过“七五”和“八五”期间的工作,应当将我国在该领域内的基础研究整体水平推进到国际先进行列,并且在某些专题研究方面应当做出具有特色的、国际领先的研究成果。

## 一、发展本学科的意义

半导体超晶格是当代固体物理学的新生长点和重要前沿领域。它是以具有各种人工剪裁能带结构的半导体低维电子系统(二维、一维、零维)为主要研究对象,涉及半导体物理、材料和器件的综合性研究领域。

自从1969年美国IBM公司的江崎(L. Esaki)和朱兆祥等提出超晶格的概念以来,建立在分子束外延(MBE)和金属有机化合物气相淀积(MOCVD)技术基础上的半导体超晶格量子结构的研究,目前已成为世界半导体科学技术极其重要的前沿领域。

1. MBE材料生长技术代表了对以往传统半导体材料生长技术的一次带根本性的革命。它把半导体材料的组成、掺杂和半导体器件层次结构的控制精度从微米、亚微米尺度直接推进到原子层的层度。半导体材料的MBE生长成了人工“能带剪裁工程”技术。因此,它是制备各种具有优异性能的新型人工剪裁半导体材料的独特手段。半导体材料生长技术上这一带根本性的突破正在从半导体物理到器件的广阔领域内酝酿着一次意义极为深远的新飞跃。

2. 半导体超晶格量子结构物理是当代固体物理的新生长点。大量的实验结果和理论预计表明,在超晶格量子结构中所实现的低维电子系统(二维、一维或零维)呈现出一系列极为重要的物理属性。不仅固体中的电子态、元激发过程和各种相互作用过程等重大基本物理问题,均表现出与三维固体十分不同的特性,而且许多在寻常三维固体中观察不到的新量子效应,相

\* 中国科学院半导体研究所, 半导体超晶格国家重点实验室

继出现于低维量子结构之中。

二维电子系统在低温、强磁场下的整数量子霍尔效应 (IQHE)、分数量子霍尔效应 (FQHE) 就是其中突出的例子。特别是分数量子霍尔效应揭示了低维电子在朗道能级的特殊分数填充状态下, 由于电子间多体相互作用而形成的新凝聚态——高度关联的费米液体态。IQHE 和 FQHE 的发现被誉为近十年来凝聚态物理中的重大突破。

随着超晶格量子结构的尺度逐步逼近各种描述固体物理属性的特征长度 (例如非弹性散射长度、电子热扩散长度), 电子作为电子波的量子属性在宏观输运现象中表现得越来越明显。在亚宏观结构上观察到的, 分别以半个磁通量量子和一个磁通量量子为周期的磁导振荡现象 (AAS 效应和 Aharonov-Bohm 效应), 以及幅度为  $e^2/h$  的量子电导涨落现象, 均是反映电子波量子相干属性的电导现象。这类量子相干电导现象的发现表明, 在超晶格量子结构中人们第一次得以能摆脱宏观系统中的平均效应, 直接观察各种物理现象的微观量子属性, 这将推动固体物理学的研究进入一个新层次。另一方面, 随着集成电路集成度的不断提高, 单元尺寸不断缩小。而进入亚宏观尺度范畴。预计, 传统的孤立电路元件的概念将失效, 新的考虑电子波量子相干效应的输运理论会取而代之, 成为设计下一代超大规模集成电路的物理基础。

3. 半导体超晶格量子结构的研究开拓了新的、十分重大的应用前景。它把固态电子器件和光电子器件推入到一个全新的发展阶段。

一方面, 由于超晶格量子结构的组份、掺杂和层次结构可以在原子尺度上随意控制, 这就为设计新型固体器件提供了极大的自由度。精心的材料工程设计可保证获得最佳的器件性能。利用调制掺杂技术获得高电子迁移率的器件 (HEMT 器件) 就是其中突出的实例之一。在能带结构经过人工剪裁的多层异质结结构中, 利用量子隧道穿透和热电子纵向弹道输运等各种量子效应, 可以构成新的晶体管效应, 并且由此而发展成新一类量子电子器件和量子集成电路 (美国 Texas Instruments 公司推出的新概念), 成为当前固态电子学注目的发展方向。

另一方面, 超晶格量子结构中呈现的新物理现象和效应不断开辟出新的器件应用领域。例如, 利用量子阱中维度限制造成的激子饱和吸收和光学非线性效应, 可构成通导时间快 (PS 量级)、高频性能好 (GC 量级)、能耗低 (PJ 量级)、可室温工作的光学双稳器件, 以及光开关、光调制器等, 为光计算技术提供了关键性的元件。量子阱中电子能态的量子化使量子阱激光器 (以量子阱为有源区的半导体激光器) 具有低阈值电流、 $T_0$  值高以及易实现不同波长激光的优点。可以相信, 随着对超晶格量子结构研究的不断深化, 不仅会使现有的应用获得更坚实的基础, 而且更新的、内容丰富多彩的应用也必将被不断开发出来。

综上所述, 不难看出半导体超晶格量子结构的研究代表着当代半导体科学技术发展的主流方向。半导体超晶格研究的意义之重大是前所未有的, 它的历史地位可以与 40 年代末 P-N、晶体管的发明相提并论。它必将对新一代计算信息处理技术、光电子技术和人工智能工程产生不可估量的深远影响。

## 二、国外发展状况

美、日、西欧等科技先进国家高度重视半导体超晶格量子结构的研究和应用开发工作, 在材料生长技术、基础物理研究和新器件的探索开发三个方面目前正处在一个生气勃勃的大发

展阶段,而且发展的速度和广度是前所未有的。

分子束外延设备(MBE)已从初期实验室使用阶段迅速进入工业实用阶段。超薄生长技术本身又有了引人注目的发展,化学束外延(CBE)、气体源MBE(GSMBE)、原子束外延(ALE)、低压MOCVD(LPMOCVD)、热阱外延(HWE)等新技术正不断被开发出来和进入运用。另一方面超晶格材料体系已由Ⅲ—Ⅴ族扩充至Ⅳ族,Ⅱ—Ⅵ族、Ⅳ—Ⅵ族和非晶态体系等等,为半导体科学技术提供了丰富多采、性能特异、自然界不存在的新材料和新结构。

物理研究正向着更深层次和更宽广的领域发展。超晶格、量子阱中电子态、声子谱和各种元激发过程的理论、研究正向一维、零维系统扩展,各种相互作用过程和多体效应受到重视。电子沿超晶格量子结构纵向的量子隧道穿透、弹道输运过程中电子和杂质、声子的相互作用,电子隧穿时间等问题引起了极大的研究兴趣。

但是最引人注目的动向是超微结构物理的出现和迅速发展。已有许多实验报道了由于电子波相干性引起的非定域量子相干电导现象。它们一方面推动了固体理论的发展,要求建立与之相适应的物理模型和理论处理方法;另一方面预计超微结构中出现的物理规律和人们的新物理思想的结合将形成新的量子工程。

各种利用超晶格量子结构的新型电子器件、光电子器件被开发出来和走向应用阶段。

量子阱激光器的波长覆盖范围已达到 $0.6\text{--}20\mu\text{m}$ 。可作为光双稳、光电调制和光电开关的自光电效应器件(SEED)的电时间常数极限已小于 $100\text{ps}$ 。波长为 $10\mu\text{m}$ 、 $2.5\mu\text{m}$ 、 $1.3\text{--}1.55\mu\text{m}$ 直至蓝光波段的各种光探测元件正不断开发出来。双势垒共振隧穿器件的电流峰/谷比已高达80,最大电流密度达 $10^5\text{A}/\text{cm}^2$ ,振荡频率接近 $20\text{GHz}$ ,并在微波振荡、放大、多值高速逻辑上得到应用。由高电子迁移率晶体管(HEMT)和异质结双极晶体管(HBT)制成的逻辑电路,不仅实现了迄今半导体器件的最短开关时间,而且已进入LSI/VLSI的应用领域。

概括起来,近年来国际上的发展动态,表明了半导体超晶格生长技术日趋成熟,完备并得到极大的普及;物理研究不断深化,揭示出内涵丰富的重要新现象、新效应,开拓出凝聚态物理的重要前沿领域;新一代光电器件、电子器件研制和开发,不仅是层出不穷而且正迅速推向实用。半导体超晶格的发展迎来了整个半导体科学技术发展的新纪元。

### 三、我国的研究成果和重要进展

我国半导体超晶格量子结构的研究始于70年代中期,从开始研制国产分子束外延设备起,经历了十多年时间的预先研究。在“六五”期间,中国科学院就着手部署了能谱、二维电子气物理和深能极三个重点实验室,开始了这方面的物理研究。1986年以来又承担了“半导体超晶格微结构”院重大项目和国家自然科学基金重大项目,在全国范围内组织起一批层次结构较为合理,熟悉专业领域、学术水平和研究素质较高的研究队伍,形成了一个较为完善的将超晶格量子结构的材料、器件和物理三方面工作综合起来从事研究的科研实体。这个实体包括了中科院五个研究所和八个重点高等学校,并且开拓了一批具有特色的、学科较为全面的研究课题,获得了一批已在国际学术界发生影响的研究成果。1988年起在国家计委的投资支持下,又正式筹办“半导体超晶格”国家重点实验室,使得国内这一方面研究工作得以进一步集中起来,向纵深方向开拓和发展。目前半导体超晶格已初步确定为我国“八五”期间全国自然科

学基础研究和应用基础研究重大项目之一。已取得的重要成果和进展如下

1. 提出和发展了用 Luttinger-Kohn 有效质量方程的轻重空穴为基函数,将超晶格波函数直接按超晶格倒格矢展开来计算空穴子带的新理论方法,对深化半导体超晶格电子态的物理认识作出了重要贡献;在国际上首次提出了二维激子的四分量旋量模型,被国际学术界公认为迄今为止最完整的超晶格激子理论。此两项工作获科学院自然科学二等奖。

在国际上首次提出了超晶格声子谱和弗洛里希相互作用的新微观理论模型,发展了目前最完整的超晶格拉曼散射理论;发展了处理 GaAs/AlAs 和 GaAs/AlGaAs 短周期超晶格中电子态的理论方法,正确讨论了由 I 型至 II 型超晶格转换的临界单原子层数为 T/X 混合的重要问题。

2. 建立了低维电子非线性输运平衡方程理论,受到国际学术界普遍重视;首次从空穴-空穴多体相互作用出发提出了正确解释二维空穴正磁阻效应的物理模型和相应的多体量子理论;首次解释了平行界面磁场对 GaAs/AlGaAs 异质结界面二维电子局域化效应的影响。

3. 在国际上首先提出用压力荧光光谱手段成功地测定了短周期 GaAs/AlAs 超晶格发生 I 型至 II 型转变的临界层厚,从实验上给出了 T/X 态混合程度的信息;首先在室温和非共振条件下,在 GaAs/AlAs 短周期超晶格 Raman 散射中测量到完整的 GaAs 层和 AlAs 层的 LO 声子和 TO 声子限制模,在 GaAs/AlGaAs 短周期超晶格的 AlGaAs 层中的类 AlAs LO 声子限制模和 GaAs 层中 LO 限制模,并给出相应的晶体光学声子色散曲线;对光调制反射谱机制提出了新理论见解,从理论与实验上证明它与介电函数一阶微商有关;发展了微微秒非线性荧光相关技术,使它成为一种定量的时间分辨光谱技术,并研究了量子阱维度限制和应力等对热电子的电声子作用和热电子能量驰豫的影响,获得科学院科技进步三等奖。在 GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As 多量子阱样品的反射二次谐波的研究中,首次报道了由轻重空穴激子吸收诱导的共振色散效应。

4. 首次提出了双势垒隧穿二极管的一种新工作模式,使器件电流峰/谷比达到国际先进水平;研究了 GaAs/AlAs 双势垒共振隧穿结构阱中电子寿命对隧穿过程中电-声子相互作用的影响。提出了一种新型光栅耦合式 GaAs/AlGaAs 多量子阱波导的反射型光双稳器件,并从实验上实现了光学双稳现象。

5. 用国产分子束外延设备成功地研制了多种 GaAs/AlGaAs 量子阱结构,样品的光学性质、晶体质量和层厚控制良好。并且开展了量子阱结构本征发光、杂质发光、压力光谱等多项研究工作。该工作获 1986 年科学院科技进步三等奖。由此研制出的量子阱激光器的阈电流密度  $1000\text{A}/\text{cm}^2$ ,  $T_0=360\text{K}(-35^\circ\text{C} \sim -40^\circ\text{C})$ , 并且具有良好的 TM 波的抑制特性。在光电流谱上利用量子限制 Stark 效应实现了光双稳效应。成功地开发了 Si 上外延 GaAs 和 GaAs/AlGaAs 材料,获得 1989 年科学院科技进步三等奖。

6. 成功地制备出 a-Si:H/a-SiN<sub>x</sub>:H 超晶格结构,首次获得了准周期结构中的小角 x 射线衍射谱,证实了非晶超晶格准周期性的存在。

#### 四、下一步主要研究内容

1. 深入开展半导体超晶格材料的物性、生长工艺和机理的研究,制备出性能优良、具有国

际水平的超晶格量子结构材料并且形成较稳定的、适应物理研究和新器件研制需要的材料供应能力。与此同时要重视开发适合我国国情、投资少见效快的超薄层材料生长技术和制备一维、零维超晶格及其他特殊量子结构的特殊材料生长工艺;注意具有特殊应用前景的超晶格材料的研制,例如硅上 GaAs / GaAlAs, II—VI族超晶格材料的研制。

2. 深化半导体超晶格电子态、晶格动力学等方面的理论研究并向一维、零维系统开拓。注重与器件物理密切相关的高激发态研究;共振隧穿和垂直输运理论研究;介电函数和光跃迁过程等方面的理论研究。着手开展低维电子系统中多体相互作用和亚宏观系统物理研究。

3. 利用激发光谱、荧光光谱、光电导光谱、调制反射光谱、喇曼光谱、远红外磁光光谱和瞬态激发时间分辨光谱等综合手段深入研究半导体超晶格的光学性质,开展光激发热电子的能量弛豫和电-声子相互作用、带间复合发光动力学及荧光效率、电/磁场和压力等外场对光学特性的调制作用、非线性光学效应等重大物理问题的研究,为开发新一代光电器件、光子学器件提供物理依据以及新原理、新模式和新结构。

4. 开展半导体超晶格低维电子系统在低温、强磁场下的基本物理属性、各种横向纵向输运过程、缺陷和深中心行为等方面的研究。注重新型超晶格量子器件的新原理、新模式和新结构的探索 and 开发。着手从事亚宏观结构中量子相干和非定域输运物理和超晶格/超导体边缘学科等方面的研究。

5. 开展超晶格量子阱光电子器件物理研究。研究量子阱激光器、光探测器、光电调制、光电开关和光双稳等器件中的非线性光电效应;外界电场、磁场和压力对光谱的调制作用;发光、受激发射、俘获陷落等过程中的动力学特性及机理;器件结构参数、介面完整性、缺陷、深中心等对发光效率的影响机制以及新型光电子器件原型的开发。

## PROGRESS OF THE SEMICONDUCTOR SUPERLATTICE SCIENCE IN CHINA

Zheng Houzhi

*(National Laboratory for Semiconductor Superlattice and Institute of Semiconductors, Academia Sinica)*

### Abstract

Semiconductor superlattice represents an important and fast developing field of research in modern solid state science. Various low-dimensional semiconductor microstructures, grown by state of art fabrication technology form its subject of research. Research activities cover broadly semiconducting materials, semiconductor physics and devices based on such microstructures.

The present priority project on "Semiconductor Superlattice" was launched as a basic research effort, with a view of promoting the development and exploration of a new generation of devices. While the development and continuous refinement of MBE and MOCVD technologies for preparing various forms of high perfection, lowdimensional, multi-layer microstructures forms a basic part of the project, the main thrust of the project is on basic physical research on new features of various low-dimensional systems and their potentials for new technological developments in electronics, electro-optics and photonics.