可分,有许多共同的研究对象.当然在观点上的差别还是有的,正如著名化学家赫许巴赫(D. Herschbach)所指出的,"典型化学家高于一切的愿望是理解为什么一种物质和其他物质行为不同;而物理学家则通常期望寻找出超出特定物质的规律",正好使双方的研究互相补充.现代生物学早已面目一新,将它的基础建立在分子生物学上.而分子生物学本身就是诞生在卢瑟福的后继者主持的剑桥大学卡文迪什实验室.生物学的面貌显然已大为改观.正如著名生物学家吉尔勃特(S. W. Gilbert)所说的,"传统生物学解决问题的方式是完全实验的.而正在建立的新模式是基于全部基因都将知晓,并以电子技术可操作的方式驻留在数据库中,生物学研究模式的出发点应是理论的.一个科学家将从理论推测出假定,然后回到实验中去,追踪或验证这些假定"[5].看来物理学家在交叉科学方面尚大有可为.

参 考 文 献

[1] 美国物理学评述委员会著,伍长征等译.90年代物理学(共9册,原文于1986年出版,中译本).北京:科学出版社,1992—1994

[2] Bardeen J. Ann. Rev. Mat. Sci. ,1980,10:1

[3] Anderson P W. Science,1972,177:393

[4] Kadanoff L P. From Order to Chaos. World Scientific, Singapore,1993. 399

[5] Gilbert S W. Nature,1991,347:99

我国半导体物理研究进展*

夏建白　黄　昆

(中国科学院半导体研究所　超晶格国家重点实验室　北京　100083)

摘　要　简单地回顾了近年来我国半导体物理研究的进展.它包括三个方面:半导体超晶格、微结构;半导体表面、界面和杂质、缺陷;以及半导体新材料、新结构.这些进展说明,半导体物理研究在当代物理学和高技术的发展中都占有突出的地位,它仍是一门年轻的、富有生命力的学科,预期在将来有更大的发展.

关键词　半导体,超晶格,微结构

RECENT DEVELOPMENTS OF SEMICONDUCTOR PHYSICS

Xia Jianbai　Huang Kun

(National Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing　100083)

Abstract　Recent developments of semiconductor physics in China are briefly reviewed, mainly with in the following three areas: 1. Semiconductor superlattices and microstructure; 2. Surfaces and interfaces, impurities and defects; 3. New materials and structures. We show that semiconductor research plays an outstanding role in the development of physics and advanced technology. It is still a vigorously growing subject, with even more important future advances to be expected.

Key words　semiconductor, superlattice, microstructure

半个世纪以来,半导体的研究在当代物理学和高技术的发展中都占有突出的地位.这是因为半导体不仅具有极其丰富的物理内涵,而且其性能可以置于不断发展的精密工艺控制之下.传统的晶体管、集成电路以及很多其他半导

* 国家攀登计划资助项目

1999-04-09收到初稿,1999-05-14修回

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

体电子元件都是明显的例证. 半导体超晶格和微结构则是近年来开拓的新领域,它在一个新的水平上体现了以上半导体的特点,这个领域的开拓正有力地推进半导体研究和新一代高技术的发展.

除了半导体超晶格和微结构以外,表面、界面和杂质、缺陷是半导体物理的两个传统研究领域,研究历史较长. 这两个领域都是和半导体材料、器件性能的改善有密切的联系,因此预期今后将继续发展下去. 表面、界面方面最突出的进展是扫描隧道电镜的发明,它的应用已远远超出了表面和界面本身的范围.

半导体材料是半导体物理研究的基础,半导体新材料、新结构的研制成功大大促进了半导体物理研究. 生长半导体超晶格材料的分子束外延等技术是超晶格领域能够形成并不断发展的基础. 最近,多孔硅、C_{60}、GaN 等每一种材料的发现或研制成功都开辟了一个新的研究方向,丰富了半导体物理的内容,同时又预示着广阔的应用前景.

回顾建国以来(自 50 年代开始)我国半导体物理的发展,一个最突出的事实就是直到十一届三中全会,我们自己的工作一直进展较小. 而经过最近 20 年的发展,在半导体物理的各个方面都有了自己的研究队伍,做出了丰富的创造性成果. 值此国庆 50 周年之际,我们想就以上三个方面简单地回顾一下近年来我国半导体物理研究的进展.

1 半导体超晶格、微结构

在文献[1]中,已经介绍了"七五"国家自然科学基金重大项目"半导体超晶格微结构"在这方面所取得的进展. 近年来,在原来超晶格、量子阱研究的基础上进行深入研究,同时向更低维结构,如量子线、量子点的方向发展,在这两方面又都取得了一系列的成果.

(1) 超晶格静压光谱研究. 它迅速、准确地确定了超晶格中导带最低能级的特性,并得到常压下不易得到的与 X 谷有关的信息. 研究了 GaAs/AlAs 短周期超晶格、AlGaAs/GaAs 应变量子阱和 Ⅲ-Ⅴ族化合物超晶格的静压光谱,由各发光峰随压强变化的情形,明确地指认了各带底的对称特性.

(2) 量子阱和超晶格的拉曼散射和共振拉曼散射研究. 对 GaAs/AlAs 超短周期超晶格的拉曼散射研究发现,对 1 个单层超晶格,拉曼谱主要是由混晶化引起的;而对 4 个单层超晶格,声子模限制效应则是主要的. 在 CdSe/ZnTe 超晶格中观察到了局域微观界面模,相应的理论计算指出,前人只考虑质量效应是不全面的;还观察到了微观界面模的多声子拉曼散射[2],并用缺陷局域模非谐衰减机制解释了它与体纵光学声子模拉曼散射的差别. 研究了量子阱中共振拉曼散射的 Fano 效应[3],观察到在共振条件下 LO 声子拉曼散射的不对称线型,及其随激发波长改变而产生的 Fano 线型的"反转".

(3) 超晶格微带特性的光谱研究. 利用光电流谱研究了 GaAs/AlGaAs 短周期超晶格中的 Wannier - Stark 效应,发现 0h 激子峰随电场增强而展宽,这是由于 Wannier - Stark 局域化使界面的涨落对电子态的散射增加,从而使激子峰展宽. 发现并证实了在 GaAs/AlAs 超晶格中 Γ - X 共振也能引起高场畴的存在,证实了理论的预言: Γ - X 共振相对地比 Γ - Γ 共振要强.

(4) 用泵 - 探束技术研究了 Ⅱ-Ⅵ族化合物多量子阱的非线性光学性质[4]. 根据激子饱和吸收特性,得出了激子态的相空间填充为主要非线性机理的结论. 研究了激子增强吸收以及由两个自然解理面形成的简单 F - P 腔产生的光双稳特性,分析了光双稳的起因.

(5) 量子线、量子点光学性质研究. 研究了 InAs 亚单层结构激子发光的二维特性,发现 InAs 结构虽然形貌上具有量子点特征,但其光学性质具有二维特性,激子线的宽度是由界面起伏引起的非均匀展宽. 还研究了其中的载流子弛豫和热激活过程,发现量子点之间的耦合有助于载流子的弛豫,解除或部分解除了"声子瓶颈效应",使总的发光强度增加.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(6) 量子霍尔效应局域态和扩展态之间的相变临界行为研究. 提出了测量朗道能级中电子有效扩散系数的新方法和理论原理. 当费米能级由朗道能级中心趋于边缘时,测得的扩散系数急剧下降,正确地反映了带尾态的局域化行为.

(7) 超晶格、微结构的理论研究. 提出了量子阱中光学声子模理论,澄清了国际上沿用 20 余年平板模式的不完善处,被国际上称为黄朱模型. 将黄朱模型推广至一维和零维量子结构,得到了一维量子线和零维量子点的光学声子模式与静电势. 提出了超晶格中声学声子拉曼散射的微观理论,解决了实验与宏观对称性分析相矛盾的困惑. 提出了一个关于量子霍尔效应条件下二维电子气光谱的模型,定性地解释了实验上观察到的发光随磁场变化的强度调制等现象.

(8) 对超晶格的纵向输运过程,以一个弛豫时间模型证明了当载流子填满微带宽度时,纵向电导率达到极大. 由此证明温度升高逐渐耗尽微带宽度内的载流子数目,从而解释了超晶格电导率与温度成反比关系的原因. 提出了超晶格微带输运的平衡方程理论,国际上称为雷 - 丁方程,它成功地解释了峰值速度及临界电场对微带宽度的依赖性. 用这方程研究了一系列超晶格在强场、瞬态强场和交变场下的纵向输运问题[5],并将这些研究推广到了一维量子线.

(9) 在 LMTO 能带自洽计算的基础上,提出了确定应变异质界面能带排列的平均键能理论[6]. 用这理论确定了各种 Ⅲ- Ⅴ族化合物和 Si/ Ge 应变超晶格的价带能量不连续值 (带阶) ,与超原胞赝势计算结果及实验值相符. 提出了一个量子球空穴态张量模型,考虑了重、轻空穴之间的混合效应,指出空穴态应是一个轨道量子数 L 与 $L+2$ 态的混合态,得到了正确的光跃迁选择定则. 利用这一模型研究了各种半导体纳米晶体的电子结构和光跃迁性质.

(10) 提出了一个一维介观系统的量子波导理论. 该理论给出一维介观系统中波函数的两个基本方程,成为研究各种复杂一维介观系统量子波导特性的基础. 应用传输矩阵和波函数匹配方法,系统地研究了非对称耦合量子阱型的电子波导中,电子传输模式与量子阱中的电子结构对外加横向电场、磁场以及腔壁几何形状等的依赖关系[7]. 应用非平衡格林函数方法研究了量子点及其他纳米结构的低温量子输运,其中包括耦合双量子阱的相干输运、有强电子关联的耦合双量子点的低温输运[8]、有磁场存在时的共振隧穿和库仑阻塞等.

2 半导体表面、界面和杂质、缺陷

(1) Ge 表面结构的研究. 利用高真空 STM 系统,系统地研究了高指数 Ge 表面的稳定性、原子结构和动态过程,得到了全部稳定的高指数 Ge 表面[9]. 还提出了它们的原子结构模型,估算出它们的表面自由能密度,测定了 (111) 表面原子扩散和 (113) 亚表面自间隙原子迁移的激活能,总结出高指数 Ge 表面小面化的规律等.

(2) 发展了光热电离方法和强磁场下的光热电离方法,使超纯硅浅杂质检测灵敏度提高了 4 —5 个数量级. 利用磁场下的光热电离方法,从实验上证明了强相互作用杂化电子态波函数是组元波函数线性叠加的基本假设[10].

(3) 锑化物/ 砷化物超晶格的研制和物理特性研究. 研究了 AlGaAsSb 中施主掺杂与内应力的关系[11],发现了掺 Te - AlGaAsSb 的 N 型掺杂能带与 Al 组分成 W 形关系,从理论和实验上解决了 N 型 AlGaAsSb 材料掺杂浓度受限的原因,为红外激光器的研制成功提供了理论依据.

(4) 超晶格、量子阱材料中的共振缺陷态的研究. 利用超晶格中微带位置比体材料的导带底高的特性,成功地观测到了原来在体材料中观测不到的共振缺陷态. 这种方法对于研究共振缺陷态具有普遍意义.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3 半导体新材料、新结构

探索了用分子束外延生长量子线、量子点的多种方法,其中包括自组织生长 InAs、SiGe 量子点,垂直于衬底方向生长 SiGe 量子线[12]等.通过 RHEED 图样在 SiGe 层生长时的变化,观察在表面形成一个应力场网的过程,从而为垂直量子线的生长提供了一个直接证据.用低温生长方法研制成功半绝缘 AlGaAs/GaAs 多量子阱光折变材料[13],电折射率达到 1.5%,在平行场配置下,两波耦合增益系数高于 3000cm^{-1},输出衍射效率为 0.84%.

在 RTP/VLP-CVD 设备上,利用 GeSi 应变异质外延技术、反应离子刻蚀技术和自限热氧化技术,研制成以 SiO_2/Si 异质界面作为量子限制作用的纳米尺寸硅量子线[14].利用等离子体增强化学气相淀积技术(PECVD)和激光晶化技术相结合,制备出由纳米晶粒组成的 Si:H/SiN_x:H多量子阱结构[15],并且在室温下观察到由 Si 纳米晶粒产生的可见光致发光和电致发光.

多孔硅的研究.首次实现了多孔硅的蓝光发射,发现了多孔硅的红外上转换现象,以及用实验和理论计算证实了多孔硅的尺寸量子化导致的发光峰位钉扎[16]等.进行了各种多孔硅样品在各种条件下的荧光、吸收谱实验,在这基础上提出了一个多孔硅发光机制的模型[17].这一模型认为:量子限制效应和表面发光中心是两个必不可少的条件,根据多孔硅的制备条件,发光中心可以是表面吸附物或者 SiO_2 包层中的缺陷、杂质.

关于半导体新材料、新结构,不能不提到纳米碳管、GaN 纳米线等七种纳米功能材料的研制成功,它标志着我国在纳米材料的研制方面取得了突破性的进展.它们大都是半导体微结构材料,有关的物理工作有待开展.由于这些成果已经在各种报刊和杂志上广为宣传,这里就不再重复了.

在这期间,我国还出版了一些半导体物理方面的专著,如《半导体物理学》[18],《半导体超晶格物理》,《人工物性剪裁》,《固体能带理论》[19]等.这些专著一方面全面论述了该领域的理论基础,对于我国相关专业的科技人员了解学科的全貌,在前沿的水平上把握其理论基础很有现实意义.另一方面,它们又是反映中国学者研究水平的、很有学术价值的著作.

以上介绍的内容并不能反映我国广大研究工作者在半导体物理领域所取得的全部成果.但就介绍的内容来看,它们都富有创新性,在国际上产生了较大的影响,具有重要的学术意义.另一方面,这些成果又都直接或间接推动了我国高新技术的发展,如我国独立自主地研制成功量子阱激光器、量子阱红外探测器、高电子迁移率晶体管等.与此同时,一批年轻学者正在茁壮成长,并已取得出色的成果,一支稳定的、老中青结合的、高水平的研究队伍正在形成,一些具有良好基础和优秀研究队伍的研究基地(重点实验室)在我国的半导体物理研究中正在发挥着越来越大的作用,如:中国科学院半导体研究所超晶格国家重点实验室、北京大学介观物理国家重点实验室、中国科学院物理研究所表面物理国家重点实验室、复旦大学应用表面物理国家重点实验室、南京大学固体微结构物理国家重点实验室和中国科学院长春物理研究所激发态物理开放实验室等.

这些成果的取得是与党和国家对基础研究的关心和重视,攀登计划、国家自然科学基金委员会以及中国科学院、各部委领导的支持分不开的,也是广大科研工作者艰苦努力的结果.正如本文开头所说的,半导体的研究在当代物理学和高技术的发展中都占有突出的地位,它仍是一门年轻的、富有生命力的学科.今后预期半导体物理将在以下几个方面深入发展:半导体微结构、团簇的制备和物理性质研究,介观系统的输运、单电子现象研究和单电子晶体管的研制,半导体微腔和光子晶体物理研究以及传统的各领域在现有基础上的继续深入的研究等.同时半导体物理的研究将和半导体新材料、新结构及新器件的研制更紧密地联系在一起,它

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

将对 21 世纪高新技术革命和我国的现代化建设起重要的促进作用. 在今后的发展中希望能得到国家更大的支持.

参 考 文 献

[1] 黄昆. 物理, 1991, 20: 321—331

[2] Zhang S L, Yang C L, Hou Y T *et al*. Phys. Rev., 1995, B52: 1477—1480

[3] Jin K J, Pan S H, Yang G Z. Phys. Rev., 1994, B50: 8584—8588

[4] Shen D Z, Fan X W, Fan G H *et al*. J. Lumin., 1991, 48 &49: 299—302

[5] Lei X L. Phys. Rev., 1995, B51: 5184—5191

[6] Ke S H, Wang R Z, Huang M C. Phys. Rev., 1994, B49: 10495—10501

[7] Gu B Y, Huo C R, Gan Z Z *et al*. Phys. Rev., 1992, B46: 13274—13288

[8] Niu C, Liu L J, Lin T H. Phys. Rev., 1995, B51: 5130—5137

[9] Gai Z, Zhao R G, Yang W S. Phys. Rev., 1998, B57: R6795—R6798

[10] Shen S C, Zhu J B, Mu Y M *et al*. Phys. Rev., 1994, B49: 5300—5305

[11] Li A Z, Wang J X, Zheng Y L *et al*. J. Crystal Growth, 1993, 127: 566—569

[12] Zhou J M, Guo L W, Cui Q *et al*. Appl. Phys. Lett., 1996, 68: 628—630

[13] Feng W, Zheng Z G, Huang Q *et al*. J Appl. Phys., 1996, 79: 7404—7406

[14] Liu J L, Shi Y, Zheng Y D *et al*. Appl. Phys. Lett., 1996, 68: 352—354

[15] Chen K J, Huang X F, Xu J *et al*. Appl. Phys. Lett., 1992, 61: 2069—2071

[16] Wang X, Huang D M, Ye L *et al*. Phys. Rev. Lett., 1993, 71: 1265—1267

[17] Qin G G, Jia Y Q. Solid State Commun., 1993, 86: 559—563

[18] 李名复. 半导体物理学. 北京: 科学出版社, 1991.

[19] 谢希德, 陆栋. 固体能带理论. 上海: 复旦大学出版社, 1998.

(注: 由于参考文献条数的限制, 本文中有关中国科学院半导体研究所的论文和著作不再引用.)

晶界弛豫研究 50 年 *

葛庭燧

(中国科学院固体物理研究所 内耗与固体缺陷开放研究实验室 合肥 230031)

摘 要 文章综述了我国科学工作者 50 年来关于晶界弛豫研究的早期开拓和近期发展. 前者包括扭摆内耗仪的发明、晶界内耗峰的发现和无序原子群晶界模型的提出. 后者包括澄清了关于晶界内耗峰来源的争论, 揭示了晶界弛豫具有一个临界温度, 从而提出了一个适合于各种温度的综合的晶界模型. 一个最重要的进展是关于竹节晶界内耗峰的发现与其机理的阐明, 从而揭示了晶界附近的位错亚结构能够影响晶界本身的性质和结构. 这对于研究多晶金属的力学性质提供了一个广阔的途径. 另外, 晶界与邻域位错的非线性交互作用的发现, 为奠定非线性滞弹性这门新学科提供了实验基础.

关键词 晶界弛豫, 早期开拓和近期进展, 临界温度, 综合晶界模型, 竹节晶界内耗峰, 非线性滞弹性

FIFTY-YEAR STUDY OF GRAIN BOUNDARY RELAXATION

Ge Tingsui (T. S. Kê)

(Laboratory of Internal Friction and Defects in Solids, Institute of Solid State Physics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract This article gives an overview of the early development and recent progress of the study

* 国家自然科学基金资助项目

1999-04-08 收到

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net