

半导体量子结构中量子力学新效应*

朱邦芬 刘仁保

(清华大学高等研究中心 北京 100084)

摘要 量子力学波函数的相位、相干性与退相干,正成为当前物理学研究的一个热点.半导体材料及其低维量子结构,以其制备工艺的精良和物理研究的透彻而成为最佳研究对象.对于半导体量子结构中载流子相位和关联的实验研究,主要遵循两条路线(1)使系统特征尺度与相干长度可比,研究介观系统与小量子系统输运过程中量子相干效应(2)发展超短脉宽激光器与超快探测技术,研究与相干时间可比的时间尺度内的动力学.文章结合笔者的研究工作,着重介绍半导体及其量子结构中超快光学过程研究,包括电声子散射的量子动力学,直流与 THz 交流电场驱动的半导体超晶格激子态、吸收光谱与四波混频谱,动力学 Fano 共振和多体相互作用中超越平均场近似的重要性.

关键词 相位,半导体量子结构,超快光学过程,量子动力学

NOVEL QUANTUM-MECHANIC EFFECTS IN SEMICONDUCTOR QUANTUM STRUCTURES

ZHU Bang-Fen LIU Ren-Bao

(Center for Advanced Study, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract The phase, coherence and decoherence of quantum states have been a focus of research since the 1980s'. Almost perfect in structure and extensively studied, semiconductor quantum structures are ideal systems for studying such phenomena in modern physics. In mesoscopic physics where the coherence length is comparable with the characteristic length of systems, recent experimental advances in ultrafast laser techniques allow us to study phase coherence and dephasing as well as quantum interference in the ultrafast optical processes of semiconductors. Recent advances in this area will be reviewed with emphasis on the authors' own work, including electron-phonon quantum dynamics, Floquet exciton states in dc-and THz-ac-driven semiconductor superlattices, dynamic Fano resonance, and the treatment of many-particle correlations beyond the mean-field approximation.

Key words phase, semiconductor quantum structures, ultrafast optical process, quantum dynamics

1 引言

近代物理的基石之一是量子力学.多年来凝聚态物理研究,集中在易测量的波函数振幅和量子能级方面,较少注意与波函数的相位直接相关的物理效应.而经典与量子体系最重要的区别在于后者可由一些相对相位确定的态叠加而成.近年来,伴随实验手段的进步,材料制备和样品微细加工工艺的进展,量子力学中相位及其物理效应越来越受到关注.

新型半导体量子结构无疑是研究量子力学相位效应最重要的研究领域之一.

一方面,由于光电子和微电子技术发展的需求,半导体材料制备与样品加工技术是最先进的,而且有多年基础研究的积累,属于被研究得最透彻的系统.随着异质结构概念的提出和以分子束外延为代

表的样品制备技术的发展,这些基于最先进技术制备的“干净”系统,各种参数易于控制,是理想的研究对象,并能充当更复杂凝聚态系统的模板.如今,新型的半导体量子结构层出不穷,覆盖了各个维度和各种尺度:从三维体材料、二维量子阱、一维量子线到零维量子点;从宏观、介观到微观.在一批样品中,电子德布罗意波长与量子限制宽度相当,量子态的相干长度与样品的特征长度比拟.例如,目前表面刻蚀线宽商业化水平为 180nm,预期 2010 年可达 70nm,纵向典型量子限制尺度约为 10nm,而半导体二维电子气费米面上电子的德布罗意波长为 30—80nm;目前低温迁移率最高为 $10^7 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$,相对应的电子平均自由程为 100 μm .

* 国家自然科学基金(批准号:19874061)和国家攀登计划资助项目
2001-01-19 收到

另一方面,实验技术和条件的飞速发展,使得人们已能在实验室获得 10^7 静电单位的外电场、 10^6 Gs ($1\text{Gs} = 10^{-4}\text{T}$)的外磁场、低于 10^{-7}K 的温度和脉冲宽度接近 f_s 的激光束,并能进行基于 STM 技术的单原子分辨和操作.这些实验探针与近乎“完美”的半导体系统结合,使得半导体量子结构正在成为检验量子力学理论和探索量子力学新效应的一个“人造实验室”,促使许多“想象中的实验”变成现实.

与原子分子系统不同,凝聚态物质中存在较强的多体相互作用,如电子-电子库仑作用、电子-声子相互作用,等等.多电子库仑作用导致电子关联和退相干,典型半导体中的电子-极性声子作用使电子的相位相干时间约为 100fs .这些因素既增加了研究困难,又大大丰富了量子力学的研究内容.

2 半导体量子结构中量子力学新效应研究路线

半导体量子结构中量子力学新效应主要是指量子力学波函数相位效应,它包括相位相干性、退相干和关联等.近年来,对于半导体量子结构中载流子相位相干性、退相干和关联的实验研究,概括起来主要遵循以下两条路线:

(1)使系统特征尺度与相干长度可比,研究介观系统与小量子系统输运过程中量子相干效应,如载流子的波动性、非定域性和样品“个性”(包括外部测量设备)对输运的效应,典型例子如 Aharonov-Bohm(AB)效应、普遍电导涨落、弱局域化电子系统中负磁阻效应,等等.例如,图1为一个AB环,环的一臂插入一个量子点.“电子共振隧穿通过半导体量子结构,是相干过程还是顺序过程?”这个问题一直存在争议.精心设计的实验显示,电子经过AB环两臂时的相对相位随外加磁场改变而交替地相消干涉和增强干涉,这表明量子点共振隧穿是相干的^[1].

类似的精妙设计与实验很多,如将扫描探针显微技术(scanned probe microscopes)与量子点接触(quantum point contact)技术相结合,得到相干电子流二维影像^[2];绝热量子电子泵浦^[3],能研究单个磁通量子物理效应的半导体纳米环^[4],等等.鉴于介观物理运输研究开展较早,大家了解较多,我们将着重介绍另一条路线,即研究半导体超快光学过程中的量子相干效应.

(2)发展超短脉冲激光器与超快探测技术,研究与相干时间可比的时间尺度内的光学过程.

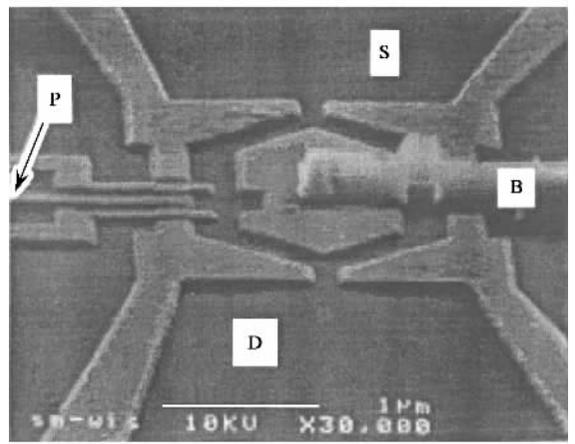


图1 AB环的SEM照片
(量子点插入到AB环的左臂,线条代表金属线, P电极控制量子点电子数目, S表示源极, D代表漏极, B表示空气跨桥栅极^[1])

表1是半导体中典型的时间能量尺度.超短脉冲激光激发半导体大致可分为4个主要弛豫阶段:(1)时间 $< 200\text{fs}$,相干阶段;(2)时间 $< 2\text{ps}$,非热载流子阶段;(3) $1-100\text{ps}$,热载流子阶段;(4)时间 $> 100\text{ps}$,载流子复合阶段^[5].

表1 半导体中一些典型物理过程中的能量-时间尺度

过程	时间尺度	能量尺度
超短脉冲宽度	$> 5\text{fs}$	
半导体禁带宽度	$\sim 2\text{fs}$	$\sim 2\text{eV}$
光学声子频率	$\sim 100\text{fs}$	$\sim 40\text{meV}$
超晶格微带宽度		$\sim 10-100\text{meV}$
载流子-载流子散射	$1\text{fs}-1\text{ps}$	
载流子-光学声子热化	$\geq 1\text{ps}$	
光学-声学声子散射	10ps	
辐射复合	$\geq 1\text{ns}$	
动量弛豫时间	$\sim 100\text{fs}$	$\sim 40\text{meV}$
能量弛豫时间	$\sim 1\text{ps}$	$\sim 4\text{meV}$
相位弛豫时间	$\sim 1\text{ps}$	$\sim 4\text{meV}$
自旋弛豫时间	$> 1\text{ps}$	$< 4\text{meV}$

最近几年飞秒激光器的出现,使人们有可能研究激光与凝聚态物质作用的初始阶段和多体系统演化的量子动力学过程,即上述相干阶段与非热载流子阶段^[5,6].当时间尺度短于各种元激发的产生和湮灭时间时,许多传统观念不再适用.关于准粒子形成、多电子相互作用介电屏蔽的建立、以及电子失去相位相干性等动力学演化过程的许多量子力学多体系统中的基本理论问题至今尚不清楚.

当前用于研究超短脉冲激发半导体的主要实验方法有四波混频与泵浦探针^[5,6].四波混频谱可用于研究量子态的相干性.在超短光脉冲激发下,由于能

量 - 时间不确定关系, 激光谱宽可以覆盖两个或更多的激发态能级, 这样, 激光脉冲可以激发多个态的相干叠加, 不同态具有不同相位, 由此可以形成量子干涉, 产生量子拍. 四波混频谱中的量子拍是研究超快过程相干性的最常用手段. 图 2 是锁相 (phase-lock) 四波混频谱示意图. 如果 $t_{11'} = 0$, 则代表通常四波混频谱. 入射光 q_1 与另一束延迟 $t_{21'}$ 时间的入射光 q_2 激发的载流子相互干涉, 形成动态光栅, q_2 被此光栅衍射, 在 $2q_2 - q_1$ 方向产生四波混频信号. 如果 $t_{11'} \neq 0$, 则两个四波混频谱将相互干涉, 因而最终的频谱随 $t_{11'}$ 变化而被调制.

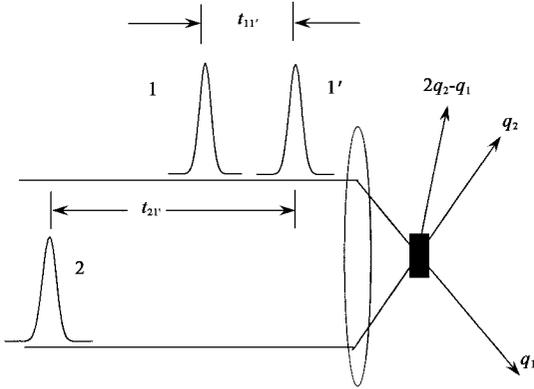


图 2 研究两个四波混频过程的位相相干的锁相四波混频示意图

研究超短脉冲激发半导体的常用的主要理论方法包括^[5,6]:

(1) 半导体布洛赫方程. 类似于原子布洛赫方程, 但光场与电子能级均被电子 - 电子库仑作用重正化. 它包含一组平均场近似下的密度矩阵的运动方程, 其中对角元是电子 (空穴) 占据数, 非对角元是光场引起的带间极化 (polarization), 电子间库仑作用采用无规相近似 (RPA);

(2) 超出 RPA 的密度矩阵方法 (density matrix). 例如计入激子 - 激子关联函数 (四点关联函数) 的运动方程, 而它又与更高阶关联函数有关, 必须在某一高阶关联作退耦或切断近似, 以得到闭合方程组;

(3) 非平衡格林函数方法. 与平衡格林函数方法相比, 其末态不是热平衡态, 所以无时间平移对称性. 该方法允许部分求和到无穷阶.

3 半导体超快光学过程中的量子力学新效应

下面结合我们近来的一些研究工作, 介绍半导

体超快光学过程中量子力学新效应的一些有趣的问题.

3.1 电声子散射的相干性和可逆性^[7,8]

处理电声子散射时通常作如下假定 (1) 单粒子分布可以表征系统微观状态 (忽略密度算符非对角元和多粒子关联) (2) 准粒子之间散射被当作时间局域 (或不需要时间) 与空间定域的事件; (3) 每次散射事件被认为是实过程, 能量守恒 (符合费米黄金规则). 声子散射通常被认为破坏电子的相位相干性.

然而在超快过程中, 当时间尺度与声子振动周期可比时, 上述假定均存在问题. 由于量子力学时间 - 能量测不准原理的限制, 电声子散射不是瞬时事件, 而满足能量守恒的实散射要经过一段时间后才可定义, 因此散射是时间非定域的, 即存在记忆效应. 只要量子跃迁尚未完成, 电子系统仍保持初末态之间的相干性. 最近在实验上用锁相四波混频技术发现 (图 3), 半导体中电子经光学声子散射后仍然具有某种相干性, 并且散射过程在初始阶段是可控制的, 即可以被增强或抑制 (反转)^[7].

最近 Steinbach 等在 ZnSe 的四波混频信号中观测到 $2\omega_{LO}$ 频率调幅拍, 他们认为, 这表明电子发射双声子后仍保持相干性^[8]. Zimmermann 等人的理论研究认为, 这是 FWM 信号的光学干涉, 而质疑双声

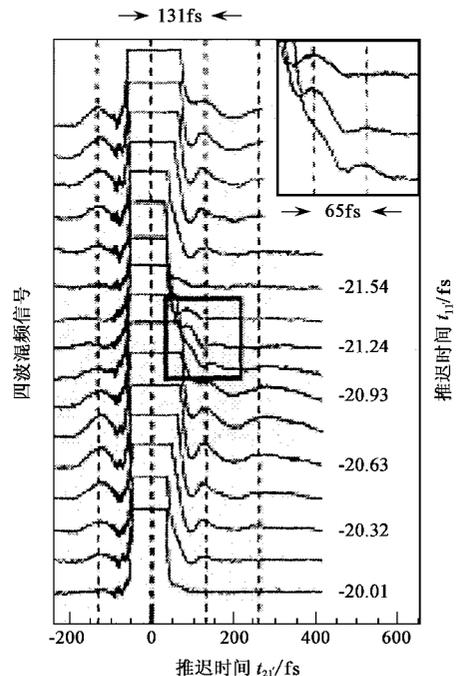


图 3 ZnSe 中时间积分四波混频信号与锁相推迟时间 $t_{11'}$ 的依赖关系

子散射相干性的存在^[9]. 我们的研究明确表明^[10], Zimmermann 等过高估计了多声子过程的贡献, 在 II - VI 族半导体材料中, 电子发射两个光学声子后, 仍具有相干性.

不仅如此, 在瞬态过程中, 在一定条件下, 声子散射还可以诱导电子某种相位相干性. 我们设计一个一维量子线模型, 证明电声子散射可以诱导两个子带之间的相位相干性, 并保持到 ps 时间尺度.

此外, 类似于激光场与电子系统作用形成 Rabi 劈裂, 在 ps 时间尺度, 相干的电声子作用也会在两个电子态之间形成时间域 Rabi 振荡, 而声子实散射破坏了这种相干性, 导致电子能量弛豫.

3.2 动力学量子 Fano 共振

分立能级和与之能量简并的连续态之间发生量子耦合, 组成新的量子态. 分立能级两侧的不同相位分别造成量子跃迁振幅的相干和相消干涉, 由此产生以不对称吸收峰为特征的 Fano 共振现象. Fano 共振现象近年来在若干半导体微结构中被实验观测到.

直流电场驱动半导体超晶格微带中电子在实空间和波矢空间来回相干振荡, 形成布洛赫振荡. 再将 THz 交变场加在这样的系统上, 一般地将导致局域的布洛赫电子的去局域化效应, 此为动力学去局域化^[11]. 当 THz 场强取特定值时, 量子干涉导致动力学局域化. 在 THz 交变场中, 系统哈密顿量随时间变化, 严格说来不存在定态. 布洛赫定理表明, 晶格周期系统中电子具有准动量. 类似地, 时间周期变化系统中电子具有准能量. 如果交流场频率为 ω , 则类比布里渊区, 准能量相差整数倍 $h\omega$ 的态是等价的. 图 4 即为半导体超晶格中准能量激子结构及其随交变

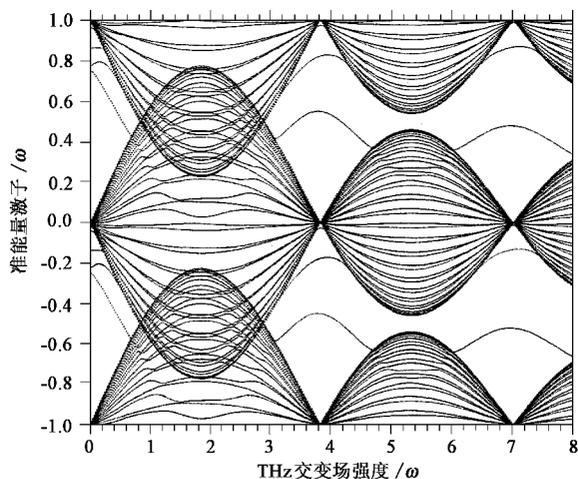


图 4 半导体超晶格中准能量激子结构随交变场强的变化^[11]

场强的变化. 在研究直流和 THz 交变场驱动半导体超晶格电子态、准能量激子态和线性吸收光谱的基础上^[12], 我们从理论上提出, 由于准能量态带宽随 THz 交变场强度变化, 半导体超晶格准能量基态激子可能与其光子边带连续统之间发生动力学 Fano 共振效应^[12]. 这种量子干涉显著增强激子退相干率, 形成一种新的激子退相干机制.

3.3 高阶关联在量子动力学中的效应

凝聚态物理处理库仑作用时, 通常采用 Hartree-Fock 近似或无规相近似. Hartree-Fock 近似属于平均场近似, 超越平均场近似通常认为只是小的修正. 例如, 在被成功地用于许多超快光学过程研究^[5]的半导体布洛赫方程中, 载流子库仑作用就是用 Hartree-Fock 近似处理. 然而, 在时间足够短、载流子浓度足够低时, 量子涨落很重要. Axt 等通过理论与实验比较, 证明在研究超晶格中激子的 THz 发射时, 载流子带内弛豫必须用动态控制截断近似处理^[13]. 我们提出用双色可见光激光器研究半导体超晶格激子的动力学局域化和动力学退局域化效应. 在研究 THz 发射时, 也发现动态控制截断近似与 Hartree-Fock 近似计算结果有显著区别^[14,15] (见图 5).

无规相近似属于一种平均场理论, 忽略了高阶关联作用. 在低载流子密度和时间尺度短于准粒子碰撞时间的情况下, 偏离无规相近似将十分显著. 最近半导体的六波混频实验和理论比较显示, 4 粒子关联, 甚至 6 粒子关联都必须考虑^[16].

总之, 量子论的诞生 100 年彻底改变了世界, 这种变化, 至今尚未完成. 半导体量子结构以它的先

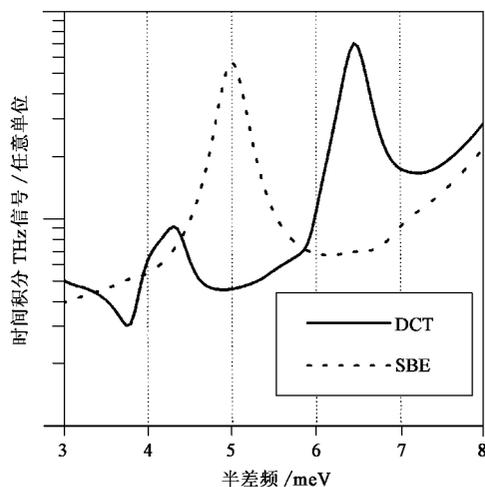


图 5 动态控制截断近似 (DCT) 处理与 Hartree-Fock 近似框架下半导体布洛赫方程 (SBE) 处理的时间积分 THz 发射信号比较^[15]

进、成熟和易于操作,正在成为检验量子力学理论和探索量子力学新效应的一个“人造实验室”,激动人心,十分有趣.凝聚态物质中相位相干性、退相干、多体关联是值得重视的研究方向.当时间尺度短于各种元激发的产生和湮灭时间时,准粒子如何形成、多电子相互作用屏蔽如何建立以及多粒子系统如何失去相位相干性等许多量子力学基本理论问题,值得好好研究.

参 考 文 献

[1] Yacoby A, Heiblum M, Mahalu D *et al.* Phys. Rev. Lett., 1995, 74 : 4047
 [2] Topinka M A *et al.* Science 2000, 289 : 2323
 [3] Switkes M *et al.* Science, 1999, 283 : 1905
 [4] Lorke A, Luyken R J, Govorov A O *et al.* Phys. Rev. Lett., 2000, 84(10) 2223
 [5] Shah J. Ultrafast Spectroscopy of Semiconductors and Semiconductor Nanostructures(2nd Edition). Berlin : Springer-Verlag, 1999

[6] Haug H Jauho A P. Quantum Kinetics in Transport and Optics of Semiconductors. Berlin : Springer-Verlag, 1996
 [7] Wehner M U, Ulm M H, Chemla D S *et al.* Phys. Rev. Lett., 1992, 80 : 1998
 [8] Steinbach D *et al.* Phys. Rev. B, 1999, 60(17) : 12079
 [9] Castella H, Zimmermann R. Phys. Rev. B, 1999, 59(12) : 7801
 [10] Liu R B, Zhu B F. Optical interference or two-phonon beat? submitted to Phys. Rev. B
 [11] Liu R B, Zhu B F, Phys. Rev. B, 1999, 59(8) : 5759
 [12] Liu R B, Zhu B F. J. Phys. Condens. Matter, 2000, 12 : L741
 [13] Axt V M, Bartels G, Stahl A. Phys. Rev. Lett., 1996, 76 : 2543
 [14] 刘仁保. 半导体及其微结构中的超快相干过程的理论研究. 中国科学院半导体研究所博士学位论文, 2000[LIU Ren-Bao. Theoretical study on the ultrafast coherent processes in semiconductors and their microstructures. Ph. D. thesis of Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences(in Chinese)]
 [15] Liu R B, Zhu B F. EuroPhys. Lett., 2000, 50 : 526
 [16] Bolton S R, Neukirch U, Sham L J *et al.* Phys. Rev. Lett., 2000, 85(9) : 2002

(上接第 316 页)

[31] Joos E, Zeh H D. Z. Phys. B., 1985, 59 : 223
 [32] Sun C P, Liu X F *et al.* Phys. Rev. A 2001, 63 : 12111
 [33] Sun C P, Zhou D L *et al.* Eur. Phys. J., 2001, D13 : 145
 [34] Yu Y L, Sun C P. Phys. Rev. A, 1994, A9 : 592; Sun C P, Yu L H. Phys. Rev. A, 1995, 51 : 1845; Sun C P, Gao Y B, Dong H F *et al.* Phys. Rev. E, 1998, 57 : 3900
 [35] 孙昌璞. 科学, 1999(6): 19; 科学发展报告(1997). 北京 : 科学出版社, 1998. 58—59[SUN Chang-Pu. Science, 1996(6): 19; Report of Science(1997). Beijing : Science Press, 1998. 58—59(in Chinese)]
 [36] Friedman J, Patel V *et al.* Nature, 2000, 406 : 23
 [37] van der Wal C, ter Haar A *et al.* Science, 2000, 290 : 773
 [38] Arndt M, Nairz O *et al.* Nature, 1999, 401 : 680.
 [39] Gell-Mann M. The Quark and the Jaguar. New York : W. H. Freeman & Company, 1994

[40] Gell-Mann M, Hartle J B. Phys. Rev. D, 1993, 47 : 3345
 [41] 't Hooft G. Class. Quant. Grav., 1999, 16 : 3263
 [42] 't Hooft G. The Holographic Principle, LANL e-print, 2000, hep-th/0003005
 [43] Sun C P, Liu X F, Yu S X. LANL e-print 2000, hep-th/0006105, to be published in Mod Phys. Lett., 2001
 [44] 孙昌璞. 物理, 2000, 8 : 19; 孙昌璞. 见 : 曾谨言, 裴寿庸编. 量子力学新进展(第一集). 北京 : 北京大学出版社, 2000. 59—13[SUN Chang-Pu. Wuli(Physics), 2000, 8 : 19; SUN Chang-Pu. In ZENG Jin-Yan, PEI Shou-Yong eds. New Progresses in Quantum Mechanics(I). Beijing : Peking University Press, 2000. 59—13(in Chinese)]

2001 年第 6 期《物理》内容预告

研究快讯

亚纳米碳管的稳定性——碳纳米管到底可以小到多小?(彭练矛等);

HT-7 超导托卡马克最新实验进展(李建刚等).

评 述

晶体生长的缺陷机制(王继扬).

知识和进展

强激光天体物理学研究——在强激光实验室中模拟某些天体物理过程(Ⅱ)(夏江帆等);

飞秒物理、飞秒化学和飞秒生物学(马国宏等);
 兰州重离子加速器的状态和发展(王义芳).

物理学和高新技术

回旋加速器的应用(曹养书等).

实验技术

高分辨的弹性反冲探测分析技术(路秀琴等).

讲 座

半导体量子器件物理讲座第三讲 异质结双极晶体管(HBT)(王良臣).