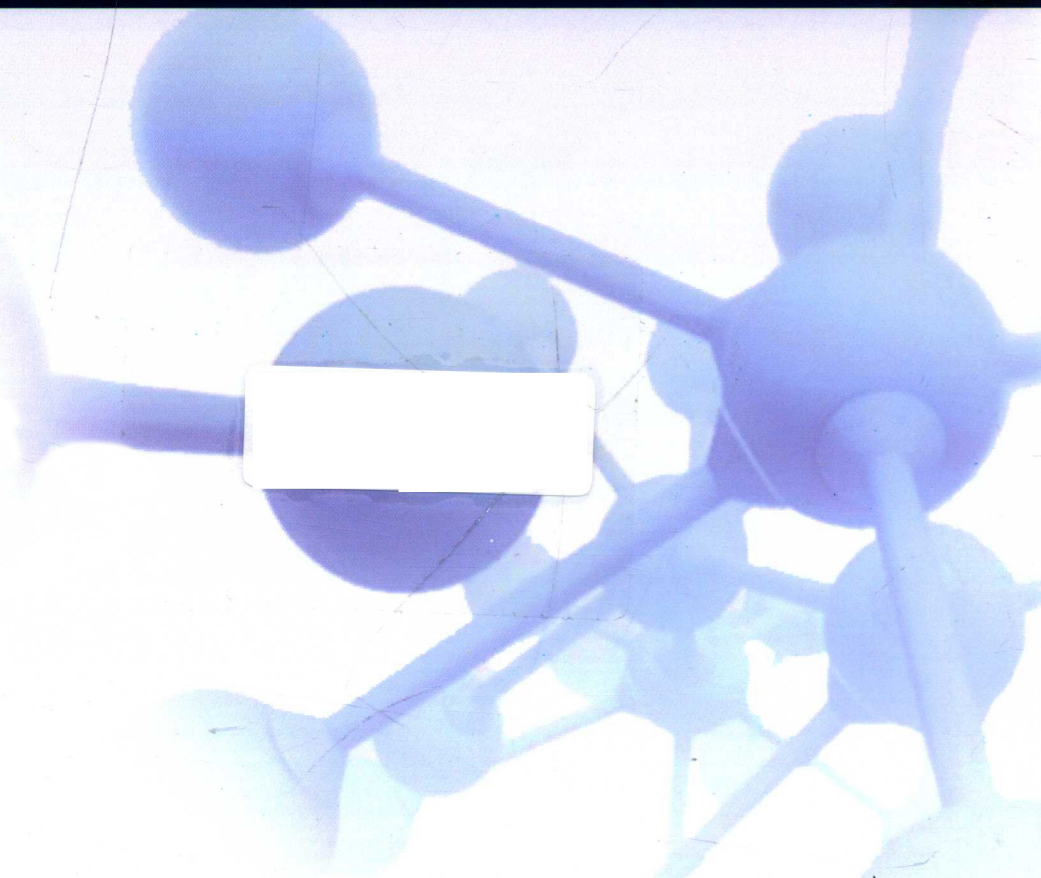


准一维量子体系的输运性质

Zhunyiwei Liangzi Tixi De Shuyun Xingzhi

程芳 著



湖南大学出版社

准一维量子体系的输运性质

程 芳 著

湖南大学出版社

内 容 简 介

本书介绍了与介观物理学最常见的系统——准一维量子线输运有关的一些基本概念和研究成果,文中对一些现象形成的物理机制进行了定性和定量的分析和讨论,得到了一些有意义的新结果。这些内容是理解半导体的物理性质和光电器件制备原理的基础。制造亚微观电子器件和亚微观机械器件等如此微小的电子元件需要量子力学知识,所以这些研究一般涉及理工科中多个学科的知识。

本书可供大学物理系高年级本科生、研究生和从事凝聚态物理研究的科研工作者使用,也可作为微电子、半导体器件专业学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

准一维量子体系的输运性质/程芳著. —长沙:湖南大学出版社,
2013.1

ISBN 978-7-5667-0303-3

I. ①准… II. ①程… III. ①量子力学—输运性质
IV. ①0413.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第016995号

准一维量子体系的输运性质

ZHUNYIWEI LIANGZI TIXI DE SHUYUN XINGZHI

作 者:程 芳 著

责任编辑:卢 宇 黄 旺 责任校对:全 健 责任印制:陈 燕

印 装:长沙瑞和印务有限公司

开 本:787×1092 16开 印张:5.25 字数:122千

版 次:2013年1月第1版 印次:2013年1月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-5667-0303-3/O·86

定 价:20.00元

出 版 人:雷 鸣

出版发行:湖南大学出版社

社 址:湖南·长沙·岳麓山 邮 编:410082

电 话:0731-88822559(发行部),88821315(编辑室),88821006(出版部)

传 真:0731-88649312(发行部),88822264(总编室)

网 址:<http://www.hnupress.com>

电子邮箱:pressluy@hnu.edu.cn

版权所有,盗版必究

湖南大学版图书凡有印装差错,请与发行部联系

前 言

量子线(纳米线)、量子点等介观系统中的电子输运一直是人们关心的问题,它不仅是一个重要的基础物理问题,而且有着潜在的高技术应用背景。量子线、量子点等介观体系是今后纳米量子电路的重要物理器件。本书研究了准一维考虑相互作用量子线体系的输运性质,得到了一些有意义的新结果。

全书共分为八章,安排如下:

第1章为引言,简单介绍自旋电子学和强关联系统的一些背景知识。Luttinger 液体的研究背景、适用体系及研究意义。

第2章简单介绍玻色化技术,哈密顿量,密度算符以及关联函数的玻色化表示。

第3章由两个部分组成。第一部分使用运动方程,研究了与费米液体电子库绝热耦合的单通道干净 Luttinger 量子线的交流输运性质。对于单模量子线,在零程相互作用的极限下,得到直流电导率与电子间的相互作用无关的结论;而交流电导率是一个振幅为 e^2/h 的谐振函数,谐振的周期与相互作用强度、频率和量子线中的测量位置都有关。第二部分研究了含有一个强度随时间变化的点杂质的相互作用量子线的输运性质。使用 Keldysh 技术,利用 Luttinger 液体模型,我们计算并分析了在任意 Luttinger 相互作用强度和任意的杂质位置下系统的背散射电流以及散粒噪声,发现在强相互作用下量子线中强度随时间变化的点杂质的出现使得系统总的电流增大,而且增大的效果与杂质势的频率、源漏极电压的等效频率有关。背散射电流的直流部分随杂质势频率谐振,谐振的周期取决于 Luttinger 相互作用强度,而且谐振并不只是有限长度的效应,这一点与量子线中含静态点杂质的情形不同。

第4章研究了考虑 Rashba 自旋轨道耦合和平面弱磁场共同作用下准一维量子线的输运性质。发现系统的交流电导率是与电子间相互作用强度、Rashba 自旋轨道耦合强度、磁场强度、驱使频率以及量子线中的测量位置有关的谐振函数。电子间相互作用对电导率的影响比自旋轨道耦合对电导率的影响要显著得多,而磁场对电导率的影响与 Rashba 自旋轨道耦合对电导率的影响十分相似。对于不考虑 Rashba 自旋轨道耦合的系统,自旋极化的电导率的比值与电子间相互作用的强度有关,而对于不考虑磁场的系统,自旋极化的电导率的比值与电子间相互作用的强度无关。

第5章研究了双通道纯净无自旋 Luttinger 量子线,在考虑通道间和通道内部的电子相互作用后的输运性质。使用玻色化技术和线性响应理论,发现系统的交流电导率是电子间相互作用强度、两个通道的费米速度的比值、驱使频率以及库中两个不同的测量位置的谐振函数。

第6章从理论上研究了同时考虑 Rashba 自旋轨道耦合效应和 Dresselhaus 自旋轨

道耦合效应的准一维量子线中库仑相互作用对系统基态和输运性质的影响。研究发现,有限长与费米液体库相连的量子线的直流电导的各向异性消失,而交流电导率的各向异性依然存在。交流电导是与电子相互作用强度、Rashba 自旋轨道耦合和 Dresselhaus 自旋轨道耦合强度、驱使频率有关的谐振函数。电荷和自旋集体激发的干涉导致电导的谐振。电子间相互作用以及自旋轨道耦合在量子线和在导线中的不匹配导致了电荷和自旋激发的法布里佩罗(FP)模式。通过量子线的交流电导最终可以获得 Rashba 与 Dresselhaus 自旋轨道耦合的相对强度。这一工作为在现有实验条件下进行两种自旋轨道耦合 R/D 比值实验测量提供了一些理论指导。

第 7 章使用玻色化、重整化群、格林函数的方法从理论上研究了两个或多个含时点接触的存在对拓扑边缘态输运性质的影响,得到泵浦电流随偏压和温度变化的解析表达式,以及依赖于电子间相互作用幂指数变化规律。

第 8 章对本书内容进行了总结和归纳,并对这一研究领域的发展前景作了简要的展望。

目 次

第 1 章 引 言

§ 1.1 介观物理与自旋电子学	(1)
§ 1.2 自旋轨道耦合效应	(4)
§ 1.3 量子多体问题	(6)

第 2 章 玻色化技术

§ 2.1 引 言	(11)
§ 2.2 能谱的线性化	(11)
§ 2.3 费米算符的玻色表示	(12)
§ 2.4 自由电子哈密顿量的玻色化	(15)
§ 2.5 考虑电子相互作用的哈密顿量和作用泛函的玻色表示	(16)
§ 2.6 玻色算符的关联函数	(17)

第 3 章 准一维单通道量子线的交流输运性质

§ 3.1 引 言	(19)
§ 3.2 不含杂质的 Luttinger 量子线	(20)
§ 3.3 单个含时点杂质的 Luttinger 量子线	(22)
§ 3.4 小 结	(28)

第 4 章 磁场下准一维量子线的交流输运性质

§ 4.1 引 言	(29)
§ 4.2 模型与公式	(31)
§ 4.3 交流电导率	(33)
§ 4.4 数值分析与讨论	(37)
§ 4.5 小 结	(40)

第 5 章 准一维双通道量子线的交流输运性质

§ 5.1 引 言	(41)
§ 5.2 系统描述及其哈密顿量	(41)
§ 5.3 交流电导率	(44)

§ 5.4	系统参数对交流电导率的影响	(45)
§ 5.5	小 结	(47)
第 6 章 准一维量子线在自旋轨道耦合作用下的相图和输运性质		
§ 6.1	引 言	(48)
§ 6.2	模型与哈密顿量	(48)
§ 6.3	相 图	(50)
§ 6.4	输运性质	(52)
§ 6.5	小 结	(58)
第 7 章 含两个含时点接触螺旋 Luttinger 液体的输运性质		
§ 7.1	引 言	(59)
§ 7.2	螺旋 Luttinger 液体的哈密顿量	(60)
§ 7.3	含有点接触的系统的重整化方程	(60)
§ 7.4	隧穿电流	(62)
§ 7.5	小 结	(68)
第 8 章 总结与展望		
致 谢		(71)
参考文献		(72)

第 1 章 引 言

§ 1.1 介观物理与自旋电子学

通常我们周围的客观物质可分成两个层次,即宏观层次和微观层次,其物理规律分别用经典物理学和量子物理学来描述。对于宏观体(bulk)材料,其尺寸远远超过了电子的平均自由程(mean free path)和相位相干长度(phase coherent length)。电子在定向运动中要不断受到晶格(声子)、杂质与缺陷、边界、光子以及其他电子的散射,电子的这种输运称为扩散输运(diffusive transport),其规律用欧姆定律描述。随着分子束外延技术的进步及纳米微刻技术的日益完善与改进,人们已经能够制造具有高电子迁移率的亚微米尺度的低维材料与器件。在 mK 的低温下,电子的相位相干长度可达到微米以上,超过了微结构体系的尺度,在这种系统中,电子显示波动的特性,其物理性质完全受量子力学规律所支配。所以人们把尺寸相当于或小于相位相干长度,比原子、分子的尺寸大得多但又不是宏观的体系,称之为介观体系(mesoscopic systems)^[1]。

介观物理学是物理学中一个新的分支学科。介观(mesoscopic)这个词由 Van Kampen 于 1981 年所创,指的是介于微观和宏观之间的尺度。介观物理学所研究的物质尺度和纳米科技的研究尺度有很大重合,所以这一领域的研究常被称为“介观物理和纳米科技”。对于微观粒子,原则上可以对薛定谔方程进行严格的或近似的求解。对于宏观物质的研究,则应用统计力学的方法,考虑大量粒子的平均性质。处于介观尺度的材料,一方面,其含有大量粒子,因而无法用薛定谔方程求解;另一方面,其粒子数又没有多到可以忽略统计涨落的程度。这种涨落称之为介观涨落,是介观材料的一个重要特征。除了试验和技术上的重要应用外,介观尺度在理论上是探索量子混沌现象的重要场所。混沌现象是宏观经典力学中的普遍现象,但在量子世界中,目前还不能观测到低激发态量子系统的混沌现象。介观物理研究的物质处于量子体系的高激发态,其微观性质和对应的宏观力学性质有很大关联。对应的宏观力学系统行为不同的话(可积系统或是混沌系统),材料的微观性质也会不同。这使得介观物理成为研究量子混沌以及量子力学和经典力学过渡关系的重要领域。

介观物理是凝聚态物理学近年来发展起来的一个新的研究热点。它主要是随着 20 世纪七八十年代人们对固体中载流子运动的深入研究,特别是对无序体系中的电子运动规律的研究而迅速发展起来的一个新兴分支学科。在这一领域中,物体的尺寸远远大于原子尺度,但令人惊奇的是它们却具有那些我们之前认为只能存在于微观世界的许多物理现象。因而介观物理涉及量子物理学、统计物理学以及经典物理学的一些基本问题,在

理论上有许多方面亟待深入的研究。

介观物理学与人类的生活密切相关,现在的微处理器及存储器芯片的基本组成单元——晶体管的尺度已经达到了几十个纳米,这正是介观物理学的研究范畴。通过对介观物理体系的研究,一方面可以给出现有器件尺寸减小的下限,此时原来的理论分析方法诸如欧姆定律等均已不再适用;另一方面,新发现的物理现象也为制作新型量子器件及新型材料提供了物理学基础,也许有一天就会成为下一代更大规模集成电路的指导思想。

自 20 世纪 50 年代末以来,半导体制造工业得到了迅猛的发展,半导体器件的尺寸急剧减小,半导体芯片的运算速度和半导体存储器的容量却飞速增加。1965 年全球半导体制造企业的领导者——英特尔(Intel)公司的创始人之一戈登·摩尔(Gordon Moore)发现:集成电路上可容纳的晶体管数目,约每隔 18 个月便会增加一倍,微处理器的性能也将提升一倍,与此同时价格却下降一半(如图 1.1 所示)。也就是说,用 1 美元所能买到的电脑性能,每隔 18 个月就会翻一番。当集成晶体管的尺寸进一步减小时,由量子隧穿效应所引起的漏电流将大到使晶体管再也无法正常工作,磁性存储器中的磁性微颗粒也会因距离过近而使产生的量子干涉效应失效。半导体集成电子器件的发展再一次遇到了瓶颈。与此同时,由于集成度的增加引起的器件热功耗也成为半导体行业发展的拦路虎。于是寻找新材料,并从基础物理上提供理论依据就成了当务之急。

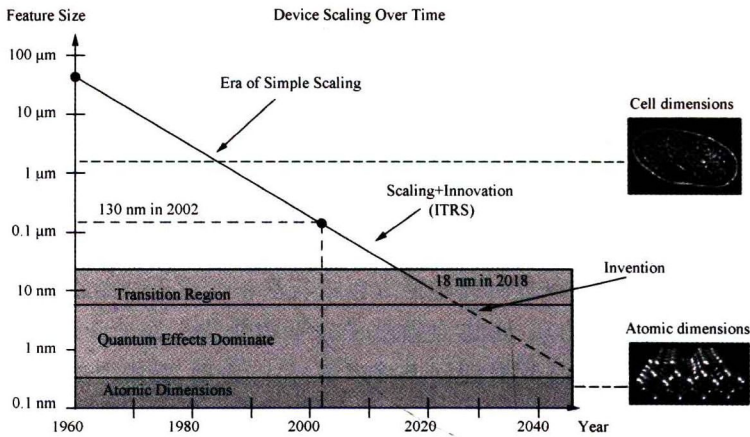


图 1.1 半导体电子器件尺寸逐年减小的趋势示意图

早在 20 世纪 20 年代,狄拉克就研究了电子的内禀自旋,虽然自旋被人们深入研究,但一直都忽略了电子自旋特征在实际中的应用。几乎所有的电子器件只应用了电子电荷特性来进行运算。自旋自由度相对于电荷自由度有以下优点:

(1)特征能量小。对自旋的操作是通过施加有效磁场来进行的,涉及的特征能量为自旋的 Zeeman 能,意味着器件的功耗将远远小于电子学器件。

(2)存储的信息不易被破坏。对于传统电子器件,只要环境能量涨落超过器件工作能量,所存储的信息就会被破坏。而对于自旋器件,由于角动量守恒的约束,自旋状态的改变必须与环境发生角动量才能实现,这使得自旋器件存储的信息不易被破坏。

(3)集成密度大。电荷间的库仑相互作用是长程的,作用范围在 10 nm;而局域自旋

间的相互作用是短程的,作用范围只有 1 nm,因而在保障单个器件间互不干扰的前提下,自旋器件的可集成度大一个数量级。

(4)携带信息量大。自旋是个理想的二能级系统,而电荷是一个标量,因而自旋能携带的信息大于电荷。

(5)相干时间长,相干输运长度长。电子的轨道自由度与环境(电荷,声子,光场)的耦合很强,因而电荷自由度的量子相干性很容易被破坏。相反,自旋与环境的耦合小,因而自旋相干时间远远超过电荷相干时间,自旋相干输运长度已经超过 100 μm 。

计算机芯片的尺寸即将进入纳米尺度。在此尺寸范围内,自旋比电荷更适合用来存储和传输信息。如果能很好地实现半导体自旋的操控,那么也许可以制造更低能耗的自旋器件。

自旋电子学(Spintronics)是利用创新的方法来操纵电子自旋自由度的科学,是一种新兴技术。应用于自旋电子学的材料,需要具有较高的电子极化率,以及较长的电子自旋弛豫时间。许多新材料,例如磁性半导体、半金属等,近年来被广泛地研究,以求能有符合自旋电子元件应用所需要的性质。1980年在固态器件中发现了与电子自旋有关的电子输运现象,开始出现了自旋电子学。1985年约翰逊和西尔斯比观察到,铁磁金属把极化电子注入普通金属;艾伯特·费尔蒂等和彼得·格伦伯格发现巨磁电阻效应。还可追溯到梅泽夫和特德罗的铁磁和超导体隧道实验,以及1970年的祖利尔(Julliere)磁隧道结。利用半导体做磁电子学器件,可追溯到1990年达它(Datta)和达斯(Das)的理论提议自旋场效应二极管。1988年,法国科学家Fert小组在[Fe/Cr]周期性多层膜中,观察到当施加外磁场时,其电阻变化率高达50%,因此称之为巨磁电阻效应(Giant Magnetoresistance, GMR)。在反铁磁耦合的多层膜中,出现巨磁电阻的必要条件就是近邻磁层中的磁矩相对取向在外磁场的作用下可以发生变化,因此需要很高的外磁场才能观察到GMR效应,不适合器件应用。后来,人们设计出一种三明治结构使相邻铁磁层的磁矩不存在(或很小)交换耦合,在较低的外磁场下相邻铁磁层的磁矩从平行排列到反平行排列或从反平行排列到平行排列,从而引起磁电阻的变化,这就是所谓的自旋阀结构(spin valve)。自旋阀结构的出现使得巨磁电阻效应的应用很快变为现实^[2,3,4,5]。1995年,人们以绝缘层 Al_2O_3 代替导体Cr,在Fe/ Al_2O_3 /Fe三明治结构中观察到很大的隧道磁电阻(Tunneling Magnetoresistance, TMR)现象,开辟了自旋电子学的又一个新方向。除了上面提到的磁性多层结构,半导体自旋电子学如磁性半导体、磁性/半导体复合材料、非磁性半导体量子阱和纳米结构中的自旋现象以及半导体的自旋注入的研究在GMR发现后也变得十分活跃,极大地丰富了自旋电子学的内容。可以说,自旋电子学目前正处于发展时期,很多新的现象和应用随着科学技术的发展和人们认识水平的提高将会不断被揭示和发现。

理想自旋电子器件依靠自旋极化和自旋耦合来实现其功能,由于自旋间相互作用能较小,因此功耗较低(约为电子电荷器件的万分之一),运行速度更快。由于自旋间的铁磁或反铁磁相互作用,自旋电子器件可以不用消耗能量来保存数据,无耗散。此外,由于自旋自由度的特征长度约为1 nm,远小于电荷自由度的特征长度10 nm。这样,自旋电子器件可以具有更高的集成密度。

目前半导体自旋电子学已在磁性材料的制备、自旋注入与输运、自旋操纵和探测等方面取得了较大的进展^[6],图 1.2 是自 1994 年以来半导体自旋电子学的关键性实验发现,随着最近自旋的电学探测的实现^[7],半导体自旋电子学所需的必要元素都已经基本实现。半导体自旋电子学的发展必将对未来的信息造成革命性的影响。

要想消除自旋简并,就必须破坏时间反演对称性(如施加外磁场)或空间反演对称性(如施加外电场)。在微电子器件中实现调控电子自旋自由度的方案主要有磁性半导体和自旋轨道耦合效应。磁性半导体面临着提高居里温度的难点;而自旋轨道耦合效应基于电场调控方案,且无须引入磁离子,因而近年来受到广泛的重视和研究。

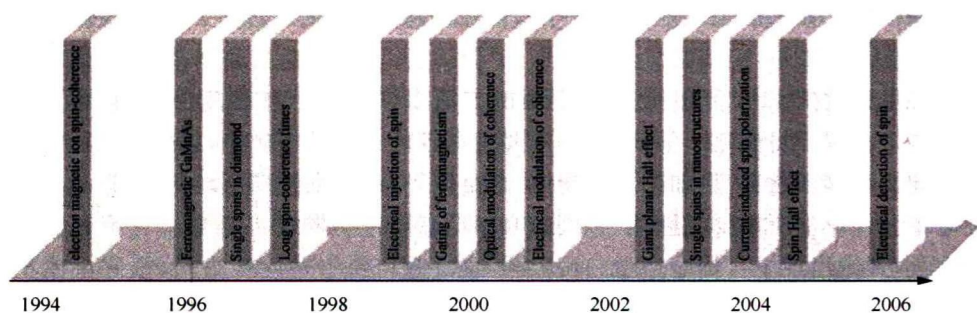


图 1.2 自 1994 年以来半导体自旋电子学实验上的关键性进展年鉴。本图摘自参考文献[6]

§ 1.2 自旋轨道耦合效应

在量子力学中,用来描述电子运动的薛定谔方程只是相对论运动方程的一阶低能近似。严格来讲,对于运动的电子,特别是高速运动的电子,应该使用狄拉克方程来描述,即:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = (\alpha \cdot \pi + \beta m_0 c^2 + V) \Psi \quad (1.1)$$

其中 $\alpha = \begin{bmatrix} 0 & \sigma \\ \sigma & 0 \end{bmatrix}$ (σ 为泡利矩阵), $\beta = \begin{bmatrix} I_{2 \times 2} & 0 \\ 0 & -I_{2 \times 2} \end{bmatrix}$ ($I_{2 \times 2}$ 是 2×2 的单位矩阵), m_0 为真空中自由电子的质量, c 是真空中光速, $\pi = P + eA$ 是磁场下的电子动量, V 是静电势能。狄拉克方程中 $\beta m_0 c^2$ 项表明,正负能带间存在 $2m_0 c^2$ (约为 1 MeV) 的狄拉克能隙, $\alpha \cdot \pi$ 项则把正负能态耦合了起来,且耦合强度正比于电子动量 π 。

当电子运动的速度远小于光速时,狄拉克方程 1.1 中对角项 $\pm m_0 c^2$ 远大于 V 和 $\alpha \cdot \pi$, 因此可以将后者视为一阶小量,并应用 Löwding 准简并微扰论^[8] 对狄拉克方程做正则变换,逐阶消去非对角项,得到电子的低能有效哈密顿量。准确到四阶,我们得到^[9]:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = \left[m_0 c^2 + \frac{(\sigma \cdot \pi)^2}{2m_0} + V + \frac{\hbar}{4m_0^2 c^2} (\nabla V \times \pi) \cdot \sigma + \frac{\hbar^2}{8m_0^3 c^2} \nabla^2 V - \frac{(\sigma \cdot \pi)^4}{8m_0^3 c^2} \right] \Psi \quad (1.2)$$

其中式(1.2)右方中括号内第一项为电子的静止能量;式(1.2)右方中括号内第二项可以展开为 $\pi^2/(2m_0) + \mu_B \sigma \cdot B$, 是电子自旋 Zeeman 能的起源;等式右方中括号内第三项

为静电势能;等式右方中括号内第四项:

$$H_{\text{so}} = \frac{\hbar}{4m_0^2 c^2} (\nabla V \times \pi) \cdot \sigma \quad (1.3)$$

为自旋轨道耦合项。所有材料中的自旋轨道耦合均源于相对论效应(源于正、负能态的耦合),其强度与狄拉克能隙成反比,与电子机械动量及电场强度 $E \equiv (1/e) \nabla V$ 成正比。真空中的自由电子运动速度较慢,电场强度较弱,因而巨大的狄拉克能隙使得真空中电子的自旋轨道耦合非常弱;而在半导体晶体中,离子实际产生强大的周期性势场,作用于电子上的电场强度高达 10^6 kV/cm,它将外层绕离子运动的电子加速到 10^6 m/s,从而得以克服狄拉克能隙,产生强度远大于真空情形的自旋轨道耦合效应。

1.2.1 Rashba 自旋轨道耦合效应

在半导体材料的低维结构中,我们可以通过人工控制的方法来破坏其空间反演对称性(如生长不对称的量子阱或不对称掺杂),此外也可以动态地改变结构中的对称性(如通过门电压技术加偏压)来破坏空间反演对称性。这种由宏观结构的不对称性所导致的自旋劈裂称为结构不对称性劈裂,即 SIA(structure inversion asymmetry),又称为 Rashba 自旋轨道耦合效应^[10]。以不对称方向为 z 轴,当电子沿着该方向受到强烈限制时,我们也可以将电子的波函数分离变量,那么作用在平面内波函数上的 Rashba 自旋轨道耦合效应项写作:

$$H_R = \alpha(k \times \sigma) \cdot e_z \quad (1.4)$$

自从 Rashba 自旋轨道耦合效应提出以来,这几十年间人们从理论和实验上对 Rashba 自旋轨道耦合效应做了大量研究^[11,12,13]。理论方面 Winkler^[14,15,16], Zawadzki 和 Pfeffer^[17,18,19,20,21]作出了较大的贡献。近年来,国际上关于半导体中自旋轨道耦合效应所引起的各种新奇物理现象的研究比较多,并取得了很多重要的进展。自旋霍尔效应就是利用电子的自旋轨道耦合在非磁性半导体中产生自旋流,其中 Rashba 自旋轨道耦合效应对三维电子气本征自旋霍尔效应的产生起了关键的作用。这些研究为未来全电操纵的自旋电子学器件提供了物理基础。

1.2.2 Dresselhaus 自旋轨道耦合效应

在自然界中,闪锌矿和纤锌矿结构如同大部分的复式格子结构,缺少空间反演对称性。因此具有这两种晶体结构的半导体材料的能带会发生自旋劈裂。这种自旋劈裂是由于完整晶体格子的空间反演对称性被破坏所导致的,我们常常称其为体不对称性劈裂(bulk inversion asymmetry)。Dresselhaus 最早注意到了这种闪锌矿晶体中的自旋劈裂,并对它做了系统的研究^[22],因此我们又把这种自旋劈裂效应称之为 Dresselhaus 自旋轨道耦合效应。对于具有闪锌矿结构的材料,它的导带 Dresselhaus 自旋轨道耦合效应的形式可以写为 $H_D^{\text{3d}} = \gamma \kappa \cdot \sigma$,其中 $\kappa = [K_x(K_y^2 - K_z^2), K_y(K_z^2 - K_x^2), K_z(K_x^2 - K_y^2)]$, $K = p/\hbar$ 为三维波矢, p 为电子的三维动量算符, H_D^{3d} 产生的自旋劈裂与 K^3 成正比。对于半导体低维结构,当沿某个方向(比如 $r_{\perp}$ 方向)的限制远强于其他方向(比如 $r_{\parallel}$ 方向,像量子阱等)时,我们可以对电子波函数做分离变量处理,即 $\Psi(r) = \varphi(r_{\parallel})\chi(r_{\perp})$,再将 H_D^{3d} 对 $\chi(r_{\perp})$ 求平均,可以得到平面内波函数 $\varphi(r_{\parallel})$ 上的二维有效 Dresselhaus 自旋轨道耦合效应项。

首先将三维波矢分解为平面内的部分 k 和沿限制方向 n 的部分 $q=qn(K=k+q)$, 然后利用 $\langle \chi(r_{\perp}) | q^{2m+1} | \chi(r_{\perp}) \rangle = 0$ 和 $\langle \chi(r_{\perp}) | q^{2m} | \chi(r_{\perp}) \rangle \neq 0$ 可得:

$$\langle \kappa_x \rangle = k_x(k_y^2 - k_z^2) + \langle q^2 \rangle (n_y^2 - n_z^2) k_x + 2n_x(k_y n_y - k_z n_z) \langle q^2 \rangle \quad (1.5)$$

$$\langle \kappa_y \rangle = k_y(k_z^2 - k_x^2) + \langle q^2 \rangle (n_z^2 - n_x^2) k_y + 2n_y(k_z n_z - k_x n_x) \langle q^2 \rangle \quad (1.6)$$

$$\langle \kappa_z \rangle = k_z(k_x^2 - k_y^2) + \langle q^2 \rangle (n_x^2 - n_y^2) k_z + 2n_z(k_x n_x - k_y n_y) \langle q^2 \rangle \quad (1.7)$$

利用上式可以写出沿任意方向 n 受限制时的二维有效 Dresselhaus 自旋轨道耦合效应的表达式^[23]。三个不同方向上 Dresselhaus 自旋轨道耦合效应哈密顿量分别为:

$$H_b^{[001]} = \beta(k_x \sigma_x - k_y \sigma_y) + \gamma k_x k_y (k_x \sigma_x - k_y \sigma_y)$$

$$H_b^{[110]} = -k_1 \sigma_3 [\beta/2 - \gamma(k_2^2 - k_1^2/2)], \text{ 其中 } \beta = -\gamma \langle q^2 \rangle$$

$$H_b^{[111]} = \frac{1}{2\sqrt{3}}(4\beta + \gamma k^2)(k_1 \sigma_2 - k_2 \sigma_1) + \frac{1}{\sqrt{6}}\gamma(3k_1^2 - k_2^2)k_2 \sigma_3, \text{ 其中 } \beta = -\gamma \langle q^2 \rangle$$

保留到波矢 k 的线性项, 并使用实验室坐标系, 我们将得到:

$$H_b^{[001]} = \beta(k_x \sigma_x - k_y \sigma_y) \quad (1.8)$$

$$H_b^{[110]} = -\frac{1}{2}\beta k_x \sigma_x \quad (1.9)$$

$$H_b^{[111]} = \frac{2}{\sqrt{3}}\beta(k_x \sigma_y - k_y \sigma_x) \quad (1.10)$$

由上式我们可以看出, 二维有效的 Dresselhaus 自旋轨道耦合效应非常敏感地依赖于量子阱的生长方向。

§ 1.3 量子多体问题

20 世纪初叶, 相对论和量子力学的创立, 改变了人类认识物质世界的基本观念, 带来了一场科学的革命。自此以来, 物理学的基础研究在过去的一个世纪主要是沿着两个方向在发展。一是朝着极大方向和极小方向发展, 以粒子物理和天体宇宙学为核心, 探索组成物质的最基本单元和作用力以及主宰宇宙生与灭的基本规律, 并在 20 世纪取得了很大进展。二是将量子力学与统计力学结合起来, 探索大量粒子构成的复杂凝聚体的集体运动行为。这方面的研究以凝聚态和统计物理为代表, 也取得了很大进展, 发现了大量新奇的关联量子现象, 揭示了多体量子世界的多样性和复杂性, 但同时也暴露了我们认识上的局限性, 人们期待着更多更新的物理思想和方法的产生。

量子多体问题有非常丰富的内涵, 与材料学科、化学学科甚至生物学科等有着千丝万缕的联系, 并且是有层次的。几十个粒子的系统与一个粒子的行为就可能很不一样, 而几千几万或更多粒子与几十个粒子的行为可能又不一样, 就像从单个金原子变到金子一样, 其行为并不能由几个粒子的性质简单外推就能得到, 相反的, 在每个层次上都会出现新的物理现象和规律。认识和操控这些现象和规律是微观量子理论研究的重要内容。量子关联现象的研究和探索在材料、化学等学科方面有很强的应用背景, 与这些学科有割舍不断的联系。除此之外, 与其他学科的交叉也在增强。特别是近年来, 随着激光冷却技术的飞速发展, 通过施加光格场实现了对多原子体系的量子调控, 为精确操控多体关联系统提供

了强有力的实验手段,促进了强关联物理与量子光学的结合。此外,强关联理论的研究近年来大量用到了量子计算与量子信息理论中的知识,发现用量子纠缠和信息熵来刻画一个量子相变系统比统计力学方法要丰富得多,因而受到越来越多的关注。

在多体量子世界,粒子之间都是有关联的,而且正是由于这种关联的存在才导致了高温超导、量子霍尔效应、原子的玻色—爱因斯坦凝聚等千奇百怪现象的出现。粒子间的关联主要产生于两种途径:一是粒子之间的交换相互作用,这是一种统计关联效应,在经典系统中不存在,但在量子系统中是不可避免的;二是粒子之间的直接相互作用,例如电子之间的库仑相互作用。

自然界有两种粒子,一种是玻色子,另一种是费米子。和经典粒子不一样,全同的玻色子和费米子是不可区分的,它们有非常不同的统计关联行为。在一定的条件下,仅仅只是考虑这种统计关联效应就能得到很多超常的多体合作现象。一个典型的例子就是玻色子的玻色—爱因斯坦凝聚。在经典系统,如果大量粒子处在同一种状态,仅仅只是同样的东西多次复制而已,与少数几个粒子处在这种状态上没有质的差别。但当大量全同玻色子处于同一种状态时(物理上称之为凝聚),就会出现超流,很多粒子就会进入到零熵状态,产生玻色—爱因斯坦凝聚。这种现象是20世纪初爱因斯坦预言的,但直接的实验验证一直到20世纪末才得以实现。对费米子系统,忽略粒子之间的相互作用,仅仅只是考虑它们的交换关联,也能得到许多意想不到的结果。固体理论中的能带论就是在这种近似下建立起来的,而且取得了巨大的成功,是固体物理发展的一个重要里程碑。它给出了金属、半导体和绝缘体的一个统一描述,奠定了现代金属和半导体工业的物理基础,这方面的研究还在继续,但其基本理论框架在20世纪50年代就已变得很成熟。在此之前,固体材料的导电行为只能通过经典玻尔兹曼理论来研究,根本无法理解为什么金属、半导体和绝缘体的电阻率有几十个数量级的差别。

多体量子关联系统是凝聚态物理研究的核心问题。尽管近年来这方面的研究有了很大的进展,发现了大量新奇的量子现象,但要指出的是,目前已发现这些现象还只是整个关联量子世界的很小一部分,还有大量的现象和系统有待探索 and 发现。即使对于前面介绍的一些典型的多体关联现象,我们的了解也很有限,尤其是对产生这些现象的物理原因以及它们之间的内在联系了解很少,目前还只能是对每种现象做个案处理,分别研究,缺乏统一的理论描述。

强关联问题的复杂性同时也对实验结果和实验技术提出了更高的要求。其一,对样品的质量要求更高。在很多情况下,制备出高质量单晶是实验成功的前提,只有这样,才能排除由于样品的不纯带来的不确定因素。其二,对实验的测试手段也要求更高,除了常规的热力学和输运测量之外,还要求被测试的结果具有空间、时间、能量和动量的分辨能力。因此,具有空间分辨的核磁共振和 m 轻子自旋共振,以及具有能量和动量分辨的中子散射和角分辨光电子谱等实验手段在强关联问题的研究中应用得非常普遍,也受到特别的重视。

介观体系中的多体相互作用一直以来都是介观物理学领域的研究热点,遗憾的是到目前为止,人们对该领域的了解依然十分有限。一方面,人们寄希望于通过对介观体系中多体问题的研究能够认识到特定介观体系结构所具有的属性,以丰富现有的物理学知识,

另一方面,人们还可以通过所希望的特性来设计介观结构,如新型分子器件、特殊功能材料以及量子计算和量子信息处理等。

通常凝聚态中的电子群在忽略电子间相互作用时,是自由电子气体。当有弱的电子间相互作用时,合适的描述是费米液体(Fermi Liquid)。每一个弱耦合电子都好像被除它自己之外的其他所有电子包围,形成低能态集体激发,称为准粒子。准粒子的态与自由电子气体中的电子态很相似,具有一一对应的关系。这种描绘已经能成功地描述二维和三维的系统。对于一维电子系统,或强关联电子系统,费米液体准粒子模型并不适合。当应用多体微扰讨论时,有红外发散,费米液体方法失效。因此,需要发展一种新的理论模型,这就是非费米液体模型来描述准一维系统。Luttinger 液体模型就是非费米液体的一种一维模型。

1.3.1 Luttinger 液体模型及其主要特点

Luttinger 液体(LL)模型是用来描述一维导体中相互作用粒子(费米子或者玻色子)的一个理论模型。无论粒子间相互作用有多强,LL 模型都能进行精确解析求解,是少数几个可精确求解的模型之一。在一维系统中,标准的 LL 模型假设电子间存在着短程相互作用。对量子线体系,当库仑相互作用受到 screening backgate 或者其他金属环境有效屏蔽时,短程相互作用这种假设是合理的。

LL 模型是 Tomonaga^[24] 和 Luttinger^[25] 在 20 世纪五六十年代提出。由于安德森(Anderson)曾认为高温超导体可能是 Luttinger 液体,90 年代中期国际上形成了一个研究热点并开始用该体系研究量子线的输运问题,国内在 90 年代末期也形成过一个小的热潮。LL 模型能直接处理多体问题,是场论在低维凝聚态体系中具体应用的一个成功例子。这个模型有两个基本的假定:①色散关系线性化;②能谱推广到包含负能的情况。LL 理论通常使用玻色化技术^[26,27,28,29] 进行处理和表达,还有一种不同的方法是用 Bethe-ansatz 处理一些特殊的积分模型^[30]。

1.3.2 Luttinger 液体模型适用的物理体系

我们简要列举一下可用 LL 模型描述的几个典型物理体系(如图 1.3)。

(1)人造量子线^[31,32]。

随着实验技术的发展和工艺水平的进步,准一维量子线受到了极大的关注。利用分裂栅技术或 cleaved-edge overgrowth 技术,可以在 GaAs-Al_xGa_{1-x}As 异质结构中人工制造出高纯度的量子通道,其中电子典型的平均自由程为 10 μm 。在如此短程范围内,可以做到没有杂质或者只有很少的杂质存在,这样在实验上就有了能探测量子线输运性质的可能性。我们通常所讲的,研究体系的输运性质,主要是指探究体系的电导率。纳米结构中的电子输运受到很多因素的影响,其中电子间的相互作用对输运性质的影响很大,尤其是在准一维情形。

(2)碳纳米管中的电子系统^[33,34]。

由于碳纳米管在费米能级对于每个自旋方向上有两个传播模式,因此该系统的性质会稍微发生一些变化。

(3)沿一维分子链漂移的电子系统(例如,特定的有机分子晶胞)^[35]。

(4)一维束缚玻色原子气体。

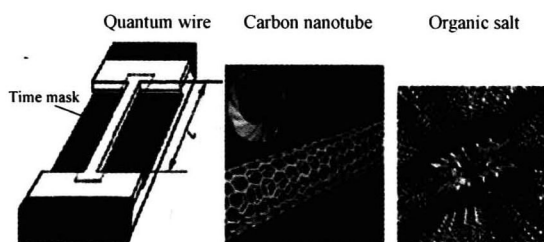


图 1.3 人造量子线、碳纳米管中的电子系统、沿一维分子链漂移的电子系统示意图

许多科学家通过在一个或者两个方向上把原子约束到只有零点振动从而制备了准二维和准一维束缚气体^[36,37,38,39]。这样的气体同真正的二维或者一维气体的区别仅在于前者原子间相互作用与外部束缚势有关。文献[40,41]讨论了将一维的玻色—爱因斯坦凝聚认为是没有相互作用的玻色气体的可行性。相互作用在一维系统中扮演着很重要的角色,稀薄的低维气体其实就是有趣的多体相互作用系统。Monien 等人认为在一定的实验条件下,一个束缚的准一维玻色系统能用 LL 描述^[42],我们已经知道,费米系统包括一维有机金属(organic metals)、量子线、量子霍尔系统的边缘态可用 LL 描述,但这些系统总是与三维系统相连,因此在低温时会出现三维行为的交迭。而束缚的一维玻色气体在合适的实验条件下可用独立的 LL 的哈密顿量描述,是一个单独研究 Luttinger 液体的很好的工具。

(5) 边缘态。

分数量子霍尔效应(fractional Quantum Hall Effect)^[43,44]和自旋霍尔效应^[45]沿边缘态运动的电子系统可用 LL 的哈密顿量描述。边缘态与准一维电子液体主要的差别在于:边缘态的电子系统中所有的电子只能沿一个方向运动;而一维电子液体系统用非手征(nonchiral)Luttinger 液体描述,系统中的电子既可以向左也可以向右运动,如量子线。当不破坏时间反演对称性时,自旋轨道相互作用形成一种与一般拓扑现象不同的拓扑绝缘能带结构,这种状态与整数量子霍尔效应很相似,它被称为量子自旋霍尔效应。如图 1.4 所示。

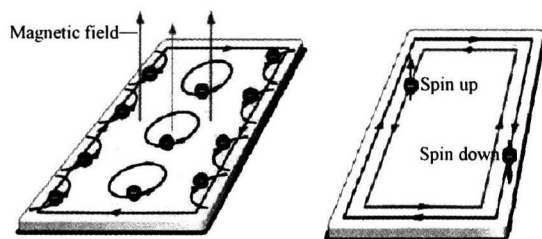


图 1.4 边缘态(左图是量子霍尔体系,右图是量子自旋霍尔体系)

量子自旋霍尔效应(Quantum Spin Hall Effect)是最早被实验证实的二维 Z₂ 类拓扑绝缘体,是半导体中自旋轨道耦合引起的新奇的物理现象。在量子自旋霍尔样品中,由于强自旋轨道耦合,在不需要磁场的情况下,自旋向上的电子和自旋向下的电子可以在系统的边缘态中以相反的方向无耗散地流动。量子自旋霍尔效应最早由 Pennsylvania 大学

的 Kane 和 Mele 在单层石墨烯样品中提出,很快被推广到 HgTe/CdTe 量子阱体系。2007 年,“碲化汞三明治”在温度低于 10 K 的条件下表演了量子自旋霍尔效应。在介观样品中德国的 Laurens Molenkamp 研究组观测到量子化的纵向电阻平台,从而间接证实了量子自旋霍尔效应和拓扑性质。量子自旋霍尔效应同样没有能量损耗,并且不需要强磁场,还可能不需要低温。利用量子自旋霍尔效应有可能研制出新一代的电脑,延长摩尔定律的生命。摩尔定律认为,电脑的关键元器件晶体管会越来越小,同时随着集成度的增大,电脑的计算能力会增加。但是随着晶体管越小越密集,发热问题也就会越突出,因此许多人预言摩尔定律的有效期只能再延续十年左右。如果能在室温下实现量子自旋霍尔效应,将可以催生新的几乎不发热的电脑元器件。据美国《世界日报》报道,权威杂志《科学》(Science)选出 2007 年重大科学突破发现,第一名为“人类基因多样性”;由斯坦福大学物理系华裔教授张首晟领导团队提出的“量子自旋霍尔效应”新概念,则与其他九项科学发现并列第二。此亦为唯一华裔领导的研究计划项目。量子自旋霍尔边界自旋动量锁定,自旋向上的电子向一个方向传播,而自旋向下的电子向另一个方向传播,后来把这种边界状态称作“螺旋形状态”,它们形成一种独特的实质上是普通导体一半自由度的一维导体。在普通导体中,自旋向上和向下的电子沿着同一个方向传播,而且这种传导在微弱无序情形下就极不牢固。但对于量子自旋霍尔边界态,即使在强无序情形下也是很稳定的。