

介观物理

Physics of Mesoscopic Systems

阎守胜

(北京大学物理系,教授 北京 100871)

介观体系的物理或简称介观物理,是凝聚态物理中近年来的研究热点。它是伴随着人们对固体中载流子运动的认识的深入,特别是70年代末和80年代初对无序体系电子输运性质的研究迅速发展起来的。所谓无序,这里是指固体存在着杂质等静态缺陷,破坏了晶格的平移对称性。介观物理的兴起,同时也得益于80年代初以来固体器件微型化及微加工技术的高度发展。

一、两种散射,弱局域电性

固体量子理论的一个历史性的成功是对正常金属中电导的了解。电阻来源于导致晶格周期性缺陷的那些因素对电子的散射。这些因素可以归结为杂质(广义说是杂质和各种晶体缺陷)和声子(晶格振动)两大类。电子和声子的散射是非弹性散射,它使电子的能量有所改变。随着温度的降低,晶格振动减弱,声子数越来越少,非弹性散射的平均自由程加长,相应地,电声子散射产生的电阻减小。电子和杂质的散射是弹性散射,使电子从一个动量态过渡到另一个动量态。这部分散射的平均自由程不随温度改变。因而在低温下,金属的电阻趋向于常数——剩余电阻。电子是量子客体,应该用波函数来描述它的状态,波函数有振幅和相位,遵从波的叠加原理。虽然电子受到的散射是波的散射,应考虑散射波之间的干涉,但是由于杂质分布和散射的无规则性,这种效应一般可略去不计。这类似于池塘中的雨点,每个雨点都以它为中心产生一向外扩展的波,但由于雨点何时落下以及落在何处均为无序,因而这些波之间的叠加不产生什么规则性的结果。这样,在固体物理中,考虑外加电场、磁场的影响时,一般将电子看作经典粒子,理解为一个具有确定的动量和位置的粒子——“波包”。

80年代初,对金属薄膜弱局域电性(Weak localization)的研究,使人们对上述两种散射的差别有了新的更为深刻的认识。人们认识到,弹性散

射,如杂质散射,尽管散射过程很复杂,但散射前后载流子波函数的相位还是有确定的关系可循,即保留了相位的记忆。非弹性散射则不同,能量是和波函数的相位相联系的,结果使相位产生无规则的变化。

设某一电子开始处在0位置,经多次弹性散射回到原位,几率为 $|W|^2$ 。显然是相同的。但顺序相反的路径回到原位的几率也是 $|W|^2$ 。按经典的计算方法,总的回到原位的几率是 $2|W|^2$ 。考虑波函数保持着相位记忆,如出发时波函数的相位是 ϕ ,每次碰撞均有所改变,顺时针方向走向原位的相位是 $\phi + \Delta\phi_1 + \Delta\phi_2 + \cdots + \Delta\phi_n = \phi + \Delta\phi$;反时针方向走,回到原位的相位为 $\phi + \Delta\phi_n + \Delta\phi_{n-1} + \cdots + \Delta\phi_1$,结果也是 $\phi + \Delta\phi$ 。因此,按量子力学波函数叠加的方式计算,回到原位的几率,由于波函数的相干,是 $4|W|^2$,比经典算法大一倍。这意味着电子更愿意呆在原来位置上,可动性更差,这就是弱局域电性名称的由来。这种量子力学的修正,使得电阻增大。仔细的计算表明,对薄的金属膜,温度下降时,电阻按 $\ln T$ 规律反常地增加。垂直膜面加磁场时,由于磁场引起的相位的改变,对顺时针走向和反时针走向符号恰好相反,因此,多半会破坏波函数的相干性,相当于又增加了电子的可动性,从而产生负磁阻(使电阻减小)。

弱局域电性的实验证实,人们对两种散射(弹性的和非弹性的)重要差别的认识是正确的。

二、介观体系的特征尺度

载流子经过多次(可大到 10^4 次)弹性散射,并保持着相位的记忆,常称为波函数相位具有长程相干性。此处“相干”一词是一种习惯的说法,不太严格。通常我们讲一个在自由空间传播的波,沿传播方向相位是相干的。这里是指如有两个载流子,状态相同,并走相同的、因弹性散射而变得曲折的路径,只要经历的弹性散射相同,没有受到非弹性散

射,它们的波函数的相位就始终是相同的。这样,载流子的非弹性散射平均自由程就定义了一个有物理意义的尺度,可以称为相位相干长度 L_ϕ 。当材料的尺度与此相当时,物理性质上会出现一系列标志相位相干性的量子特性。这种尺度的体系现在称为介观体系,表示处于宏观体系与微观体系的中介的意思。

介观体系有许多特殊的表现。其一是普适的电导涨落(universal conductance fluctuation)。前面已讲过,对宏观尺度的样品,载流子散射波之间的干涉可以忽略。当样品尺度小到 L_ϕ 左右时,这种干涉表现为电导的起伏涨落,不能忽略。例如,对宏观尺度的样品,通电流 I ,测量样品上的电压降 V ,按 $G=I/V$ 计算其电导时,电流 I 从0逐渐增大,在一定范围内(以样品不发热为度)得到的 G 是常数。而对介观尺度的样品,得到的 G 非周期地涨落,表面看似无序,但却十分重复固定,且随样品而异,每个样品好象有它自己的涨落“指纹”。1985年,Alshuler, Lee 和 Stone 等人通过计算更是得到出乎意料的结果:涨落的数量级为 e^2/h ,其中 e 为电子电荷, h 为普朗克常数, e^2/h 相当于 $(25k\Omega)^{-1}$ 。结果具有普适性,意思是涨落的大小与样品的维度、几何形状、长度(只要 $\leq L_\phi$)和平均电阻(即杂质的数量)无关或关系不大。

普适电导涨落反映了介观体系和我们熟悉的宏观体系本质上的差别。宏观体系的特点是具有自平均性(self-averaging)。可以把宏观物体看成是由很多体积相同的小块组成,小块间是统计独立的,整个宏观物体表现出来的是众多小块平均的结果。如果减小宏观物体的尺寸,只要还足够大,测量的物理量,如电导率,和系统平均值的差别就很小。通俗地讲,宏观体系的物理性质表现出一种“共性”。但对介观尺度的样品,却找不到类似于宏观体系电导率的物理量来描述它们的导电性,每个样品有它自己的“指纹”,自平均性消失,样品极富“个性”。

三、新的物理现象

十多年来,对介观体系的研究,发现了很多新的常常是意想不到的物理现象。

除去上面提到的普适电导涨落外,还有正常金属中的 Aharonov-Bohm 效应及正常金属介观环中的持续电流。正常金属环,由于总有杂质、缺陷或表面的不平整性存在,有剩余电阻,一般认为闭合电流将很快衰减。但当环的尺度小到和 L_ϕ 可比时,由于波函数的相位相干性,持续电流可以存在。这种现象 1990 年首次被 Levy 等人的实验所证实。由于持续电流很小,他们用了 10^7 个 μm 尺度的铜环。

1991 年 Chandrasekhar 等人在单个金环上也证实了持续电流的存在。最近,法国的小组(Mailly 等人)又在半导体异质结二维电子气的环上观察到了持续电流。Aharonov-Bohm 效应也是发生在介观尺度环上载流子波函数的相位相干现象。从环上某一点出发,顺时针和逆时针走的两条路径在相遇处干涉,其强度随环中通过的磁通量周期振荡。在无规则分布的杂质存在的条件下,能否观察到这种振荡效应,是争论了 20 多年的物理问题。大多数物理学家认为不行,少数人认为可以。1985 年 Webb 等人在 μm 尺度的金环上观察到了这种振荡。

当体系尺度小到接近弹性散射的平均自由程时,进入弹道输运区,此时限制电流的主要是载流子和样品边界的散射。这方面的实验工作主要是在 AlGaAs/GaAs 异质结界面处高迁移率的二维电子中进行。低温下弹性散射平均自由程可超过 $10\mu m$ 。一般在横向对电子的运动再加限制,使电子主要在一个方向上运动,成为准一维体系。这一领域中,最重要的物理现象是量子点接触的电导量子化。量子点接触是长度和宽度近似相等的一维体系。1988 年 Van Wees 等人发现其电导是以 $2e^2/h$ 为单位量子化的,颇出乎人们意料之外。在准一维体系中还有电子束的准直效应、聚焦、负的弯曲电阻、霍尔效应的淬灭等物理现象出现。

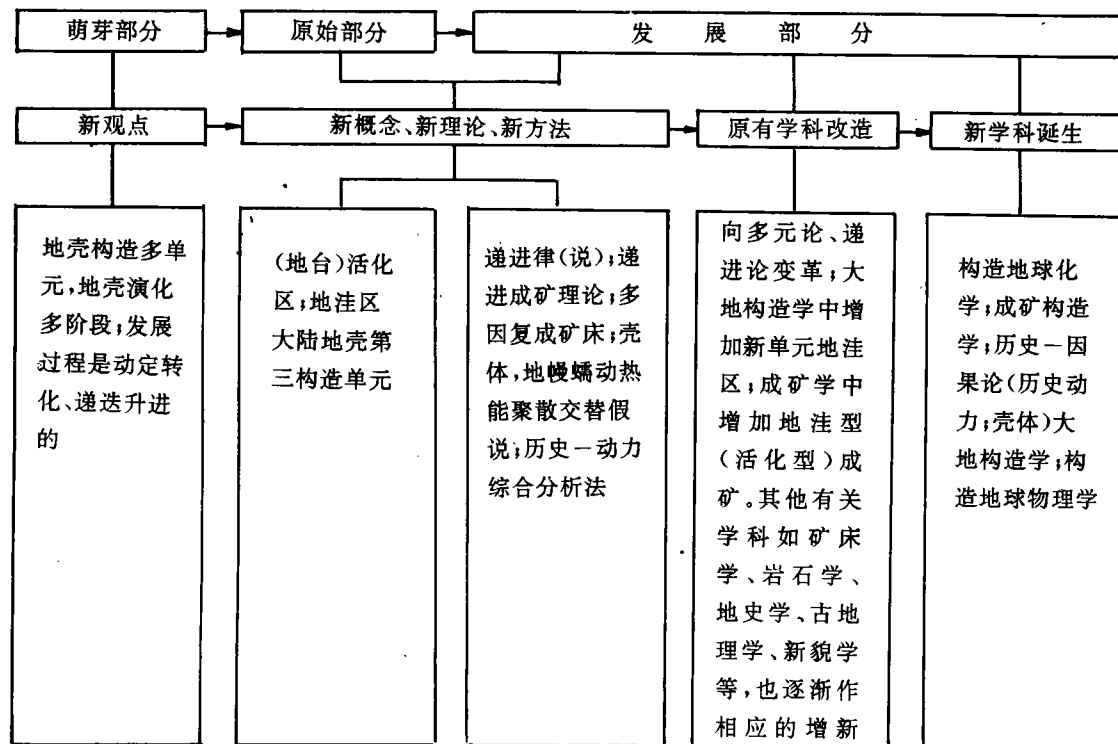
对于足够小的系统,载流子间库仑相互作用产生的量子关联作用将变得很重要,它的经典图象是所谓的库仑阻塞效应。人们在此基础上发展了一些对单电子运动进行控制的电路和器件,如旋转门器件,使电子像进出旅馆的旋转门那样,一个一个地通过。这一领域现在称为单电子电子学。

四、基础研究和应用方面的意义

体系尺度小到一定程度,失去宏观体系特有的自平均性,这并不难想象。80 年代初开始的研究工作所揭示出来的新的出人意料的结果是,这个特征尺度令人吃惊地长。人们原以为是几个晶格间距,或至多是弹性散射平均自由程的尺度,在正常金属中约 10 纳米。现在发现,介观体系的尺度是非弹性散射平均自由程的大小,在金属中可到微米的量级,随着温度的下降还会增加。

这样,介观体系一方面类似我们熟悉的微观世界,表现出量子力学的特性;另一方面,就尺度而言它几乎又是宏观的。按目前的微加工技术,人们可以制作各种形式的这类样品,而且可以进行电阻、磁阻、霍尔系数等常规的测量,这就好像我们可以在原子、分子的电子轨道上接上电流表、电压表进行观察。毫无疑问这些研究对加深人们对物质世界

(下转第 42 页)



适应市场经济体制和现代科学发展的要求,通过发展学科以推进科学发展。为此,必须使研究所真正成为一个集团化、合作化,科研活动效率高、竞争力强,能有组织地发展其优势的共同学术思想,齐心协力,朝着共同的目标努力的整体。换言之,要真正成为适应现代科学发展要求的科研学派。特别是就一些地区差异性强的学科,例如地球科学,由于我国有得天独厚的地质条件,不少地质现象具有典型性,其中有些又具有广泛可对比性,正宜发挥

这种天赋优越条件的作用,充分利用自身优势,针对国际前沿课题,既从全球观点出发,又密切联系本国实际,在扬弃前人理论的基础上,创造自己的新理论,建立有特色的新学派,以适应我国资源环境特点,解决我国生产实际问题,促进有关学科的发展。这比追随模仿已有理论,似更为上策。研究所如此,研究中心也如此。

(责任编辑 冷远猷)

(上接第 25 页)

的认识有十分重大的意义。这一尺度大到实验可及,也使它成为理论物理学家和实验物理学家共同感兴趣的领域。这是物理学任何一个领域得到很好发展的必要条件。从应用的角度看,介观物理的研究一方面可以给出现有器件尺寸减小的下限,也即尺寸减小到何种程度原有的理论分析方法(如欧姆定律等)将不再适用。另一方面,新发现的现象为制作新型量子器件提供了丰富的思想,也许会成为下一代尺度更小的集成电路的基础。

介观物理涉及量子力学、统计物理和宏观物理

的一些基本问题,很多方面有待深入研究,如载流子之间相互作用的影响;载流子和光波、声波、自旋波等的相互作用;介观尺度系统的磁性、光学性质、热学性质等。理论上要进一步发展对介观体系的处理方法。制备介观尺度系统的工艺技术也涉及到一系列凝固态物理和化学问题。在我国,介观物理的研究已列入国家基础研究的攀登计划,并得到国家自然科学基金会的资助,在实验研究和理论探索方面均已做出可喜的成果,相信我国物理学家一定能在这一领域做出自己的贡献。

(责任编辑 孙立明)