

半导体超晶格量子阱研究

徐仲英 孔梅影

自从1969年美国IBM公司的江崎(L. Esaki)和朱兆祥提出超晶格概念以来,半导体超晶格量子阱的研究已成为半导体领域自40年代末单晶和晶体管问世以来所发生的最重大事件。这个研究领域之所以倍受重视,除了因为有明显的技术应用前景之外,还因为在物理上它提供了一个极好的、能在实验上观测量子尺寸效应的理想模型。

所谓半导体超晶格、量子阱结构,通常是指两种不同的半导体单晶薄膜周期性地交替叠合在一起而形成的多层结构。所以这个领域的兴起,首先应当归功于薄层生长技术的发展。目前,先进的晶体生长工艺已完全有可能生长出原子尺度的半导体薄层。这样,人们可以在原子尺度上人工地设计和改变材料的结构参数,由此改变材料的电子能带和波函数,做出各式各样全新的人工材料。所以有人称它为波函数工程或能带工程。

这种超薄层结构给材料性质带来了质的变化,电子和空穴的运动被限制在薄层中,这就使运动的性质发生了根本的变化。在微观世界里,电子和空穴服从量子规律,电子运动基本上变为平面运动。这样一来,当光穿过薄层时,光吸收的规律就和厚层时完全相反。在薄层的情况下,层越薄,光的吸收不但不减少,反而增加了。从这个例子可以看出三维运动变为二维运动时所发生的质的变化。现在还有人在进一步研究一维运动,那就是说在两个方向上的运动都被限制在量子

尺寸上,只剩下一条线上的宏观运动。总之,这方面的工作在物理上是前沿阵地之一,开拓了基础研究的新领域,并预示了实际应用上的重要性。

超晶格量子阱的概念和物理模型

一般来说,半导体超晶格是由依次相间的两种薄层组成的周期性结构。两种薄层可以具有不同的组分(它们之间形成异质结),也可以具有相同组分而掺杂

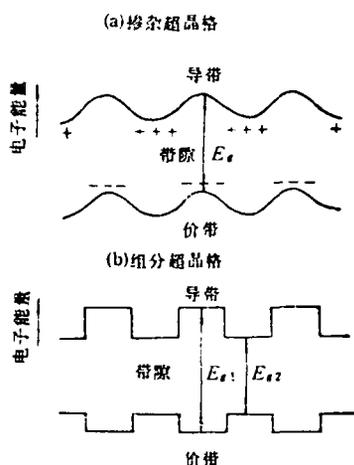


图1 超晶格的周期性变化势场
(上)掺杂超晶格,由n型和P型薄层交替构成;
(下)组分超晶格,由不同组分的薄层构成。

1987—1988年间出任美国物理学会主席。他对射线武器的研究作出了自己的评价,强调了物理学会对制定国家政策提供技术咨询的重要性,并对物理学面临的几个难题(如文献情报剧增、学术成果的发表)提出了自己的看法。

E·古德温《试管中的聚变:美能源部专家小组对犹他大学的发现泼冷水》12月号

1989年3月23日,美国犹他大学的庞斯和英格兰南安普顿大学的弗莱施曼宣布他们实现了室温核聚变,在世界范围引起轰动。人们纷纷仿效他们的实验。美国能源大臣霍金斯指定罗彻斯特大学的化学家和物理学家约翰·休仁加和哈佛大学物理教授拉姆齐为主席组成了一个专门小组。该小组成员出席了5月在圣菲举行的冷聚变会议,访问了六个实验室,于1989年

11月2日提出了一份64页的报告。报告指出:美国各大学、国家实验室和工业实验室为冷聚变研究共花费了数千万美元。有一些实验支持犹他大学的结论,通常有间歇周期的过量热产生。但大多数实验否定犹他大学的结果。发现过量热产生的实验未能发现足够数量的聚变产物,比如氦和氘。有些实验发现了过量的氘,但没有发现次级核粒子或其它的次级核粒子,因而排除了D+D反应为氦的来源的可能性。该小组认为,迄今得到的实验结果不能提出令人信服的证据,使人们认为可以从冷聚变现象中产生有用的能源。另外,该小组还总结说,迄今的报告也未能提出令人信服的证据,使人们能将实验中测得的反常的热与核过程联系起来。

[秦宝 编译]

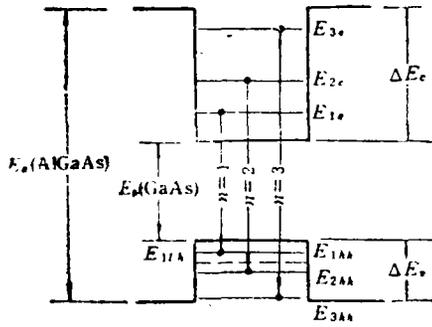


图2 GaAs-AlGaAs 量子阱有限深方势阱和光跃迁示意图

类型不同(因而形成多重 P-n 结);前者称为组分超晶格,后者称为掺杂超晶格。超晶格中包含了量子阱,习惯上称各周期之间相互独立(波函数不相互贯穿)的结构为量子阱。两种超晶格的周期性变化势场如图 1 所示。由于这种势场的变化发生在与晶格常数可以相比的范围之内,显然会对能带结构发生影响。通常晶格的厚度为几十个原子层(可以更小),其尺度已经可以和电子的有效德布罗意波长(约 200 Å)相比拟。当超晶格的周期小于电子运动的平均自由程时,粒子在该方向的运动就会出现“量子尺寸效应”,即电子运动出现量子化特征,能量取不连续的分立值。目前研究得最多的是砷化镓(GaAs)和铝砷化镓(Al_xGa_{1-x}As, x 表示 Al 的组分)交替生长的超晶格量子阱结构。GaAs 的禁带宽度小,Al_xGa_{1-x}As 的禁带宽度大,电子和空穴在 AlGaAs 中要比在 GaAs 中的能量高,所以要掉到 GaAs 中,就像掉进一口井里,因此对电子空穴来说, GaAs 为量子阱的势阱区,而 AlGaAs 则为势垒区。图 2 为 GaAs/AlGaAs 量子阱势阱示意图。阱中的载流子在垂直薄层方向的运动受到限制,可近似地用量子力学中一维方势阱中的粒子运动来处理,即前面所说的粒子运动量子化,阱中存在一系列分立束缚态(又称子能级)。势阱越窄,势垒越高,阱中子能级位置离势阱底部越远。从这点出发,还可以推得超晶格量子阱中的态密度分布具有台阶状的特点,而不是体材料那样抛物线分布。上述模型原则上反映了量子阱的电子状态,并使这些材料具有一系列独特的光学和电学性质。例如电子、空穴子能级之间的光跃迁(图 2 中用 n=1, n=2 等表示)吸收光谱呈台阶状等等。

半导体超晶格的生长方法

用传统的半导体气相和液相外延生长技术,一般只能制备约 0.1—0.2 微米厚的薄层,很难用来生长超晶格结构。能在原子尺度上控制外延层厚度的材料生长方法主要有分子束外延和金属有机化合物气相沉积法,近年来又发展了化学束外延法。

分子束外延 所谓分子束是指在超高真空系统中向一定方向运动的中性分子和原子的射束。分子束外延设备复杂,价格昂贵,系统一般要保持在 10⁻¹⁰—10⁻¹¹ 托的超高真空中。通过加热或蒸发使不同元素的分子束从喷射炉中按一定比例喷出,与加热状态的衬底表面反应,于是在衬底晶向上便生长出晶体薄层,适当选择衬底和各喷射炉的温度,以及控制喷射炉口的快门开关时间,在衬底上就可以生长出具有一定结构的超晶格来。分子束外延生长速率一般很慢(例每小时 1—2 微米)并常用微机精确控制。在先进的分子束外延系统中还装有多种实时分析测量仪器,如高能反射电子衍射仪、四级质谱仪等。

金属有机化合物气相沉积 主要用于 III、V 族和 II、VI 族化合物半导体的生长,这是一种利用化学反应从汽相进行晶体生长的方法。采用的原材料是金属有机化合物(如三甲基镓、三甲基铝等)和砷烷、磷烷等。这些源化合物在汽相混合,并在 650—750℃ 下热解,从而在衬底上沉积。合金的组份和掺杂水平由各种气相源的相对压力来控制,可用质量流量计配合各种精密的阀门加以调节。

化学束外延 化学束外延方法是近几年来新发展起来的,它结合了前面两种技术的优点,其生长系统与分子束外延生长系统基本相同,但组份元素的源则采用气体源。与分子束外延方法相比,这种方法可以生长的化合物种类较多,并能消除分子束外延材料中常出现的椭圆形缺陷。此外,系统中使用的气体源可通过管道供给,因而使分子束外延系统因换源而破坏真空系统的问题得到了解决。

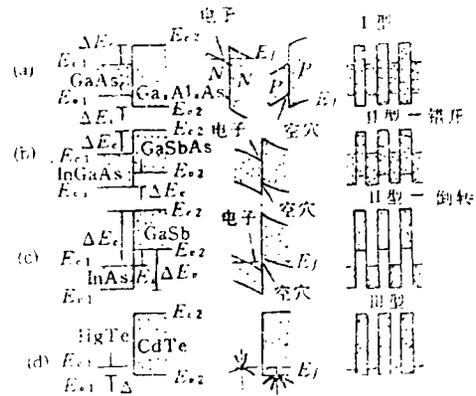


图3 四种典型的组分超晶格异质结的能带结构(左)、能带弯曲和载流子限制(中)以及相应超晶格或量子阱的能带图(右)。

超晶格量子阱实验研究进展

超晶格量子阱实验研究方面已经取得了引人瞩目的进展。首先,组分超晶格作为异质结的特殊问题引

起广泛重视。在传统的 GaAs/AlGaAs 结构之外,又派生出诸如 InAs/GaSb, InGaAs/GaSbAs, HgTe/CdTe 等各种新的结构。这些结构的能带图明显不同,主要表现在异质结界面处带边能量的相互关系上。根据能带不连续性的特征,已知的异质结界面可以分成四种类型,如图 3 所示。

在异质结材料生长方面,一个重要的进展是应变层超晶格的出现。上面提到的 GaAs/AlGaAs 异质结,由于势阱、势垒两种材料具有几乎相同的晶格常数,因此界面不会出现应变和位错。而在应变超晶格中,构成异质结的两种材料具有不同的晶格常数,当薄层厚度小于出现失配位错的临界厚度时,薄层内将产生均匀应力,而不出现位错,从而保证了材料具有良好的光学、电学性能。这时超晶格的电子结构不仅取决于量子尺寸效应,同时还取决于薄层中的应力大小和方向。在这种应变超晶格结构中,各层组分、厚度和层数都可以在相当宽的范围内变化,从而改变了材料的能带结构。因此可以说为制作性质各不相同的半导体材料提供了无限的可能性。

在对超晶格的实验观测方面,光学技术受到了很大的重视。光吸收、光电流、光致发光、喇曼散射、远红外磁光吸收和回旋共振等各种光学测量手段都被应用于超晶格研究。光吸收技术可以观测到量子阱中束缚态的明显结构,导带中束缚的电子与价带中束缚的空穴间的复合表现为若干不同的激子结构,从而为研究超晶格量子阱的电子态和能带结构提供了直观的佐证。光电流测量所得曲线也反映出子能级或能带的存在,这些能级或能带即相应于曲线上的若干峰值。利用光致发光技术很容易观察到 $n=1$ 的电子及空穴能带间的跃迁。在高激发下,由于载流子填充效应,已观察到 $n=2,3$ 的光致发光。同时光致发光研究表明,量子阱中类杂质基态的束缚能是量子阱宽度和杂质位置两者的函数。当量子阱材料外加电场时,有可能改变量子化能级的位置,实现对激子发光波长的调制。利用微微秒和毫微微秒激光光谱技术可以测得量子阱中热电子的能量弛豫过程,这是研究超快速光电器件的物理基础。

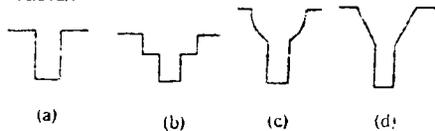


图4 几种典型的量子阱势阱结构

喇曼散射是固体物理学中研究晶格振动和杂质、缺陷的重要手段。在超晶格研究中,用喇曼散射实验可进一步证实电子和空穴态密度的量子化分布以及电子能级形成造成的“布里渊区的折叠”。“布里渊区折叠”令人鼓舞的结果之一就是可以使间接带材料转变为直接带材料。用喇曼散射还详细研究了超晶格量子

阱中的声子谱,提出了声子量子阱的概念。

超晶格量子阱的应用前景和发展趋势

超晶格材料在光电技术中具有广阔的应用前景,目前人们已制备出了一些高性能的器件,因此深受人们的重视。

超晶格量子阱材料最重要的应用之一是制造多量子阱激光器,它是把有源区做成量子阱或超晶格的异质结半导体激光器。由于量子阱结构对载流子具有良好的限制作用并形成二维台阶状态密度,因此与普通异质结激光器相比有许多突出的优点。如它的阈值电流低,单纵模性能稳定、谱线宽度窄、温度特性好,有良好的高频调制特性并易得到短波发射,因而很适合于现代化光通信技术的需要。

目前在量子阱激光器实用化研究中,重点是提高量子阱结构中的载流子收集效率,提高发光效率和降低阈值。为此,除不断提高材料质量之外,器件研究工作亦不断提出新的量子阱结构。图 4 表示四种目前常用的结构,其中(a)为早期采用的结构,限制层和势垒层具有相同的高度。(b)为分别限制结构,限制层和势垒层采用不同的高度(通过取不同 x 值的 $Al_xGa_{1-x}As$ 来实现),这里大阱起载流子储槽和光波导作用。(c)为渐变指数分别限制结构,旨在用漏斗形的限制层增强载流子的收集作用。(d)为梯形结构。目前已经研制成功阈值电流密度 $< 50 A/cm^2$ 的量子阱激光器。

超晶格在光电器件方面的另一重要应用是制造光学双稳态器件,这类光学非线性元件有可能成为全光逻辑计算机的关键元件。光学双稳器件的发展目标是小型化(微米数量级)、快速(皮秒数量级,1皮秒= 10^{-12} 秒),低功耗(微瓦数量级)并在室温条件下工作。超晶格光双稳元件主要是利用量子阱中激子的非线性饱和吸收特性。当入射光子能量稍低于量子阱的激子吸收能量时,少量的吸收所产生的载流子可以改变激子共振态的吸收率和偏振度,从而使材料的折射率可随入射光强度进行调谐。新出现的被称为自电光效应器件的超晶格光学开关元件已被证明是一种可在很低光功率下工作的双稳元件。

此外超晶格结构中耗尽区内异质界面上导带与价带能量跃值的差异,使得电子与空穴有效离化系数比加大,为研制低噪声的雪崩光电器件提供了物理基础。除了光电器件的应用之外,半导体超晶格在电子学方面的一项重要应用是制造高速场效应器件,这是利用超晶格可制成调制掺杂结构的原理而实现的。在这种结构中,势垒区由宽能隙的掺杂材料构成(例如掺 Si 施主的 AlGaAs),势阱区由窄能隙的未掺杂“纯”材料构成(例如 GaAs)。势阱中的运输电子和提供电子的杂质原子 Si 在空间上是分离的,因而电子输运迂

(下转第14页)

量小于 0.2MeV; 只有变形核才有转动能级。按照量子力学, 围绕对称轴的转动是观测不到的, 对一长椭球形的核来说, 只有围绕其短轴的转动, 而没有围绕其长轴(对称轴)的转动。一个球形核的所有轴都是对称轴, 因而探测不到球形核的转动。此外, 转动能是和转动惯量的倒数与角动量平方的乘积成正比的, 核的形状固定时, 转动惯量不变, 随着角动量的增加, 相邻转动能级之间的间隔越来越大。如果核的形状发生了变化, 转动惯量也要发生相应的改变, 因而导致转动能级分布情况的变化。这样一些规律也是研究奇异核形状的基础。在向奇异核开拓时, 人们很自然会想到这样一些问题: 稳定核附近的幻数及其所决定的核性质, 在远离稳定线区域是否仍旧成立? 是否有新的幻数出现? 是否有新变形区出现? 等等。具体来讲, 例如, 由 50 个质子和 50 个中子组成的 ^{100}Sn 或 50 个质子和 82 个中子组成的 ^{132}Sn 是否如预计的那样是硬球形核?

实验上已发现, 某些核居然可以具有一种以上的形状。汞的同位素是个很好的例子。它有 80 个质子, 比球形幻数少二个, 预计是近球形核, 低激发态能级间隔较宽。对于 $^{180-184}\text{Hg}$ 的研究证实了这一预计。但对于 ^{196}Hg 、 ^{198}Hg 和 ^{200}Hg , 在低能级处它们的形状有所变化, 在较高的能级处, 每一种核又表现出两种完全不同的形状, 这反映在它们的能级分布上, 每种核同时存在着两组能级: 一组是建立在球形基态上的间隔较宽的能级; 另一组是开始间隔很小, 然后越来越大的能级——标志着硬的变形核的转动与振动。有时近球形那一组能级中的某一能级在能量上十分接近变形组中的一个能级(参见图 3)。这些观测结果表明, 不同形状的状态可以在核中同时存在。这就是在 50 年代曾经预言而在 70 年代发现的形状共存现象。现在已经知道, 形状共存是普遍地分布在周期表内的许多元素所具有的现象。这种现象在球形核与变形核这两种曾被认为截然不同类型的核之间建立了联系, 这对于发展对核物质的统一描述是很有意义的。

在远离 β 稳定线区域检验球形壳模型的过程中, 另一个惊人的发现是质子数和中子数都接近幻数 40 的核(如 36 个质子与 38 个中子组成的 ^{74}Kr 、36 个质子与 40 个中子组成的 ^{76}Kr 和 38 个质子与 62 个中子组成的 ^{100}Sr) 具有非常大的变形。核的变形程度通常用一个参数 β 来描写, 它大致等于核的长轴与短轴长

(上接第 21 页)

移率大大提高。上述结构通常称为二维电子气结构, 基于这一物理过程, 科学家已研制成功超高速电子迁移率晶体管或称调制掺杂场效应晶体管。

半导体超晶格量子阱的研究是一个崭新而富有成果的领域。从基础到应用, 它所开辟的领域之广、之深、之新都是惊人的。著名物理学家黄昆教授称半导体超晶格量子阱研究是目前半导体领域中最大、最有

度之差被这两个轴的平均长度除。近球形核的 β 值很小; 典型变形核的 β 值在 0.2 到 0.25 范围内, 而上述的几种核基态的 β 值在 0.35—0.4 范围内, 因而又称为超变形核。超变形核的另一个判据是它们第一激发态的能量, 这个能量越低, 形变越大。实际上, 为了在不同质量的核素间进行比较, 常要用标度化的第一激发态能量。对于原子序数在 90 左右的铀系变形核, 标度化的第一激发态能量在 43keV 到 45keV 之间。在发现超变形核之前, 已知的最低的标度化第一激发态值为 42.8keV (^{240}Pu 的第一激发态)。而超变形核 ^{100}Sr 的标度化第一激发态的能量值为 30keV, 而 ^{74}Kr 为 28keV。超变形原子核的发现有力地支持了摩勒和尼克斯在 1981 年所做的理论预言。他们根据计算指出, 中子数与质子数在 38 附近的核属于自然界中最强变形的核。哈密尔顿曾指出, 中子数 60 是一个变形幻数, 这一点为 ^{100}Sr (38 个质子, 62 个中子) 所证实。此外, 理论还预言了中子数与质子数为 35 的核位于具有扁变形的超变形区域的中心, 因此, ^{71}Br (35 个质子, 36 个中子) 是非常重要的研究对象。

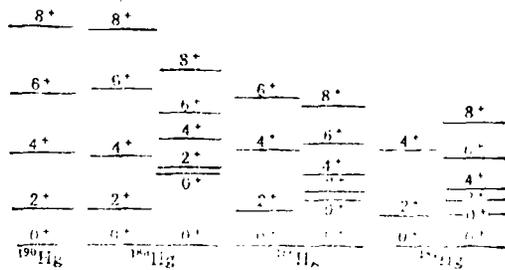


图 3 汞同位素的低激发态能级图

以上我们介绍了奇异核研究中的两个重要方面——奇异的放射性衰变方式和奇异的核形状。应指出的是我们仅涉及了奇异核基态或低激发态的情况; 当原子核处于高激发或高角动量状态时, 普通的核也会表现出许多奇异的性质, 这方面的讨论超出了本文的范围。目前对奇异核的研究方兴未艾, 特别是近年来, 人们开始用中高能重离子束通过弹核碎裂的反应机制来合成新的奇异核素, 并通过对核素分离产生所谓次级的奇异核束流, 用来研究奇异核所引起的反应及奇异核本身的性质, 甚至开展某些应用研究。可以预期, 在奇异核研究的领域中会有更惊人的发现在等待我们。

前途, 内容最丰富的一个生长点。在我国, 自行设计和研制的分子束外延和金属有机化合物汽相沉积设备已投入使用, 用国产分子束外延设备生长的材料已制成了高迁移率晶体管及室温连续干的多量子阱激光器, 并在超晶格量子阱基础物理研究上取得了可喜的成果。这种应用和理论工作的平行开展, 必将大大推进这一新兴领域的蓬勃发展。