

半导体低维结构及应用

王 良

信息产业是国民经济最主要的支柱之一,驱动信息产业高速发展的两个动力分别是它的器件制造和软件开发,而信息产业中最具有新原理、新功能的器件制造又完全依赖于半导体物理的研究与发展,各个发达国家和地区无不在半导体物理研究领域投入大量人力和物力,以满足社会发展、人们生活和国防安全的需求。随着人类社会对信息量需求的不断增加,微电子技术正向它的“极限”挑战,基于低维材料量子力学效应的纳米电子学、光电子学、量子计算和量子通信等正受到广泛的重视,低维材料已成为当前材料学研究的热点之一。

1969年江崎和朱兆祥提出了半导体超晶格的概念,他们设想如果用两种晶格匹配很好的半导体材料A和B交替生长,就可以得到人工长周期的半导体晶格结构,周期长度小于载流子德布罗意波长,称为半导体超晶格。半导体超晶格及量子阱概念的提出,开创了人工设计、制备低维量子结构材料研究的新领域。所谓低维量子结构材料,通常是指除三维体材料之外的二维超晶格、量子阱材料,一维量子线和零维量子点材料。二维超晶格、量子阱材料是指载流子在两个方向(如在 x, y 平面内)上可以自由运动,而在另外一个方向(z)则受到约束,即材料在这个方向的特征尺寸可与电子的德布罗意波长相比拟或更小。在量子线材料中,载流子仅在一个方向可以自由运动,而在另外两个方向则受到约束;在量子点中,载流子在三个维度上都受到势垒约束而不能自由运动。

超晶格结构是由两种或两种以上不同性质的薄膜,按一定的迭代顺序交替生长而形成的多层结构晶体。由半导体物理可知,当两种禁带宽度不同的半导体相接而形成异质结结构,必然会存在能带失调问题,这种失调原则上包括三种情况:一种半导体的禁带内包含另一种半导体的禁带;两种半导体的禁带相互错开;两种半导体的禁带没有相同的能级,分别如图1(a)、(b)、(c)所示的由 $Al_xGa_{1-x}As$ 和GaAs组成的异质结、由 $Ga_{1-x}In_xAs$ 和 $GaAs_{1-x}Sb_x$ 组成的异质结、InAs和GaSb组成的异质结。

两种半导体A和B组成异质结,在异质结A的

一侧再接上一层B,则组成一个B-A-B型的三层结构。如果中间的A层厚度小到量子尺度,并且其禁带宽度小于另一种半导体的禁带宽度。则A层对于载流子来说如同一口阱,处在其中的载流子无论向A层两侧的任一侧运动而离开A层区进入B层区,都必须越过一个势垒,在这样的体系下,A层区厚度为量子尺度,故称为量子阱。在此体系中,载流子的运动在平行于阱壁的二维方向上不受势垒的限制,可认为是自由的,在垂直于阱壁上受势垒的限制,载流子在此方向上的运动表现为量子受限行为。

如果将量子阱平面加以限制使其尺寸也缩小到量子尺度,则势阱成为线状,载流子在其中只能在一个方向上自由运动,而在与之垂直的另两个方向上都受到势垒的限制,这样的体系称为量子线。

如果再将量子线的尺度缩小至量子尺度,则成为一个量子点。量子点是准零维体系,载流子在其中的任何一个方向上都不能自由运动,表现更多量子受限行为。

作为技术应用的量子异质结结构必须满足如下条件:横向尺寸必须在10 nm以下,这样才有量子限制效应;尺寸分布要均匀,使得由尺寸不均匀产生的光谱线非均匀加宽达到最小;两种材料的界面必须整齐、无缺陷,否则将产生大量无辐射的复合中心;量子异质结在结构和化学上应是稳定的。目前,二维半导体量子阱材料有SiGe/Ge、GaAlAs/GaAs、InGaAsP/InP等,其制备的主要技术有分子束外延、化学气相沉积、LB膜和自组装等技术。量子线材料主要有GaAs、GaN、GaAlAs、ZnO、碳纳米管等,制作方法有选择外延法、在有V形槽的衬底上外延生长法和微倾斜的衬底上外延生长法。量子点的主要材料有Si、InAs、InGaN、InGaAs等,量子点的生长广泛采用自组织方法。

半导体低维结构由于量子限制效应而表现出许

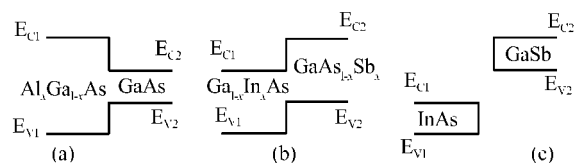


图1 各种异质结可能的能带失调关系示意图

多优良的光电特性,量子化效应的程度取决于电子受限制的程度。量子点和量子线的电子态密度分别呈现一系列孤立的尖峰形状和线形状,所以量子点和量子线比量子阱更容易达到激光作用所必须的粒子数反转,故更适合制作激光器,量子点材料还可以用于制作单电子晶体管和光存储器等。利用量子线控制杂质散射的原理,可制成量子线沟道场效应晶体管(FET)等。

自从集成电路问世以来,微电子技术发展迅猛,电路尺寸不断缩小,最小线宽已达亚微米以至纳米量级,器件设计人员突破经典物理学的限制,把量子力学运用到半导体器件上来。量子力学指出,一旦电子运动的空间被限制在接近电子本身的德布罗意波长时,电子波动性将成为其主要特征,从而使器件呈现出量子效应。利用低维体系的特殊性可以设计一系列量子效应器件。

低维半导体器件是指利用半导体所具有的各种量子化效应设计和制作的新一代电子器件,也称量子效应器件,是微电子学发展到纳米电子学阶段的必然结果。量子效应可以分为四种类型:即在电子的量子力学波长(约10 nm)同等尺寸的超薄层中会形成电子的驻波,只允许特定波长或特定波矢的电子态存在,电子的固有能量呈离散状态的量子尺寸效应;电子与超晶格的某一势垒相碰撞时,若势垒较厚则电子不能穿越,当势垒厚度减小到电子的量子力学波长大小,电子才能穿越该势垒的量子隧穿效应;电子在半导体超晶格中传输时,从多重势垒反射回来的电子波相互干涉,或相互增强,或相互减弱,电子的透射率强烈地依赖于干涉波的相位差的量子干涉效应;在量子点结构中,由于三维封闭作用,使得电子能级的值在各个方向上都是量子化的,每个能级上都可以积累一定数目的电子,如果两个量子点之间距离很近以致能产生量子效应,则在电场作用下的电子,可以在相邻量子点的量子能级间跃迁,基于这种物理现象的量子能级效应。

利用各种量子化效应可以构想出各种新的量子功能器件。如利用量子线中电子的高迁移率制备高速逻辑器件,利用超微细结构中的隧穿效应制作多值逻辑器件。利用量子点结构可积累或转送电子的原理构想大容量存储器或并行运算处理器,利用相干电子波的干涉、衍射和反射现象设计多值逻辑器件、高速开关器件及传感器件等。以下具体介绍利

用量子点制作的单电子晶体管。

单电子晶体管根据库仑阻塞效应制作而成。如果一个电子进入了一个小的孤立区域,这个区域的静电势能就会升高,若一个量子点的充电能 $q^2/(2C)$ 比热运动的能 $k_0 T$ 大(其中 C 表示量子点的总电容,即势垒和栅极的电容之和, k_0 表示玻尔兹曼常数, T 表示标准温度),则电子就不能进入量子点,这种现象称为库仑阻塞现象。给一个系统施加电压 V 时,电子获得的能量为 Vq ,此能量值比量子点的充电能更大时,电子便能隧穿进入量子点。利用这个原理,可以使用各种材料制备具有不同特点的单电子存储器。

图2 普通晶体管和单电子晶体管示意图
左图为普通晶体管,右图为单电子晶体管

单电子晶体管由源极、漏极、量子点及用来控制量子点中电子数目的栅极组成,量子点与源极和漏极有弱耦合作用。工作的基本条件为单电子晶体管隧穿势垒的隧穿电阻足够大(远大于 h/q^2 ,约26千欧)和量子点的电容足够小,即 $q^2/(2C)$ 的值远大于 $k_0 T$,以保证电子在量子点上停留的时间较长,以阻塞下个电子的通过。当量子点的有效直径小于10 nm,电容达到1 μF 时,单电子效应在室温下可以实现,单电子晶体管可以在室温下工作。通过控制栅的偏压调节量子点中的静电势能,当其静电势能和源极、漏极的费米能级一致时,源极电子可以逐个相关地进入量子点到达漏极,此时量子点中的电子数在 N 和 $N - 1$ 之间涨落,进一步调节量子点的静电势能,当处于库仑阻塞状态时,源极、漏极没有电流,此时晶体管处于关闭状态。图2为普通的晶体管和单电子晶体管的示意图。如果固定源极、漏极间的电压,单电子晶体管的源漏电流将随栅偏压的变化而振荡,称为库仑震荡,是单电子晶体管的基本特性之一。当量子点中的电子数较大或量子点中的能级效应可以忽略时,电流震荡表现为周期性的库仑震荡。

半导体低维结构的能带人工可剪裁性、量子尺寸效应、共振隧穿效应,使之发展成为介观物理现象的新学科领域。半导体低维结构又和电子、光电子等高新技术产业有密切联系,这个领域内已经发现的新现象和新效应,都被广泛用于开发具有新原理、

近红外光谱分析及发展前景

陈丽菊 刘 巍

近红外光 (near infrared, NIR) 是介于可见光 (VLS) 和中红外光 (MIR) 之间的电磁波, 美国材料检测协会 (ASTM) 将波长 780 ~ 2526 nm 的光谱区定义为近红外光谱区。近红外光谱主要应用两种技术获得: 透射光谱技术和反射光谱技术。透射光谱波长一般在 780 ~ 1100 nm 范围内; 反射光谱波长在 1100 ~ 2526 nm 范围内。近红外光谱区 (NIR) 是由赫歇尔 (Herschel) 在 1800 年发现的。卡尔·诺里斯 (Karl Norris) 等人首先用近红外光谱区测定谷物中的水分、蛋白质。但是由于分子在该谱区倍频和合频吸收弱, 且谱带重叠严重, 难以分析和鉴定, 以致 NIR 分析技术的研究曾一度陷入低谷, 甚至处于停滞。20 世纪 80 年代, 随着计算机技术、仪器硬件的迅速发展, 以及化学计量学方法在解决光谱信息提取和消除背景干扰方面取得的良好效果, 使得近红外分析技术不仅用于农产品、食品和生物科学, 而且还应用到石油化工、烟草、纺织、环保等行业。

近红外光谱分析的原理

近红外光谱是由于分子振动能级的跃迁 (同时伴随转动能级跃迁) 而产生的。近红外分析技术是依据被检测样品中某一化学成分对近红外光谱区的吸收特性而进行定量检测的一种方法。它记录的是分子中单个化学键的基频振动的倍频和合频信息, 它的光谱是在 700 ~ 2500 nm 范围内分子的吸收辐射。这个事实与常规的中红外光谱定义一样, 吸收辐射导致原子之间的共价键发生膨胀、伸展和振动。中红外吸收光谱中包括有 C-H 键、C-C 键以及分子官能团的吸收带。然而在 NIR 测量中显示的是综合波带与谐波带, 它是 R-H 分子团 (R 是 O、C、N 和 S) 产生的吸收频率谐波, 并常常受含氢基团 X-H (C-H、N-H、O-H) 的倍频和合频的重叠主导, 所以在近红外光谱范围内, 测量的主要是含氢基团 X-H 振动的倍频和合频吸收。使用 NIR 技术

是因为它与样品相互作用时输出的能量效率比中红外光更为实用。NIR 的辐射源 (仪器上的灯) 要比用在中红外的能量高得多, 而且它的检测器也具有更高检测效率。这些因素意味着 NIR 仪器的信噪比值远高于中红外仪器。较高的信噪比意味着样品的观测时间可比中红外仪器短得多。近红外辐射对于样品的穿透性也较高, 因此样品的前处理常较中红外简单。近红外光谱根据其检测对象的不同分成近红外透射光谱 (NIT) 和近红外反射光谱 (NIR) 两种。NIT 是根据透射光与入射光强的比例关系来获得在近红外区的吸收光谱。NIR 根据反射光与入射光强的比例获得在近红外光谱区的吸收光谱。近红外分析技术是综合多学科 (光谱学、化学计量学和计算机等) 知识的现代分析技术, 使用包括 NIR 分析仪、化学计量学光谱软件和被测物质的各种性质或浓度分析模型成套近红外分析技术等。经过对这种模型的校正, 就可以根据被测样品的近红外光谱, 快速计算出各种数据。建立被测样品成分的模型时, 主要用到的校正方法有多元线性回归法 (MLR)、主成分分析法 (PCA)、偏最小二乘法 (PLS)、人工神经网络法 (ANN)。

近红外光谱分析方法的特点

近红外光谱分析方法有下列特点。

可采用光学方法进行。鉴于近红外具有较大的散射效应和较强的穿透性, 近红外光谱的分析方法比较独特, 可根据样品物态和透光能力的强弱采用透射、漫反射和散射等多种测谱技术进行物质检测。

近红外光子的能量比可见光低, 不会对人体造成伤害, 而且整个分析过程不会对环境造成任何污染, 属于绿色分析技术。

近红外分析技术可在数分钟内完成多项参数的测定, 分析速度可提高上百倍, 分析成本可降低数十倍。用于传输近红外辐射光的光纤可长达 200 m,

新结构的固态电子和光电子器件。半导体低维结构已成为推动整个半导体科学技术迅猛发展的主要动力。低维材料不同于自然界中的物质, 具有各种量子效应和独特的光、电、声、力、化学和生物性能, 在

未来的各种功能器件的应用中将发挥重要作用, 并随理论和技术的发展得到更加广泛的应用。

(上海市东华大学理学院应用物理系 200051)