

半导体纳米材料和物理*

夏 建 白[†]

(中国科学院半导体研究所 北京 100083)

摘 要 半导体纳米材料是纳米材料的一个重要组成部分,纳米结构的电子和光子器件将成为下一代微电子和光电子器件的核心.文章介绍了半导体纳米材料研究的新进展,包括四个方面:半导体自组织生长量子点,纳米晶体,微腔光子晶体和纳米结构中的自旋电子学.本世纪开始的半导体纳米材料的研究是上世纪半导体超晶格量子阱研究的延续,同时又开辟了一些新的领域,如:单电子的电子学、单光子的光子学、微腔和光子晶体、稀磁半导体和自旋电子的相干输运等,这些研究将为研制在新原理基础上的新器件和实现量子计算、量子通信打下基础.

关键词 量子点,纳米晶体,微腔,光子晶体

Semiconductor nanometer material and physics

XIA Jian-Bai[†]

(Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract Nanometer semiconductors are an important class of nanometer materials. Electronic and photonic componets of nanometer scale will become the core of micro-electronic and photo-electronic devices of the next generation. The newest advances in semiconductor nanometer material research are reviewed, covering four parts: self-assembled growth of quantum dots, nanometer crystals, microcavity and photonic crystals, and spin electronics. The research on semiconductor nanometer materials that began in this century is the continuation of research on semiconductor superlattices and quantum wells in the last century, while at the same time it has opened up new fields such as single electron electronics, single photon photonics, microcavity and photonic crystals, diluted magnetic semiconductors, and coherent transport of spin electrons. These studies will lay the foundation for developing and fabricating new devices based on new principles, and for realizing quantum computation and communication.

Key words quantum dot, nanometer crystal, microcavity, photonic crystal

1 研究意义

半导体纳米材料是纳米材料的一个重要组成部分,它与电子学、光电子学以及通信技术、计算机技术密切相关.纳米结构的电子和光子器件将成为下一代微电子和光电子器件的核心,在21世纪引起一场新的技术革命.2000年2月美国发布的《国家纳米技术倡议》在“纳米电子学和计算机技术”一节中提到:“纳米结构将孕育一场信息技术硬件的革命,

类似于30年前那一场微电子革命,半导体电子学取代了真空管电子学.在即将来临的这一场纳米电子学革命中,超微晶体管和记忆芯片将几百万倍地改善计算机的速度和效率.一个针尖大小的海量存储器将存储几个 Terabits(10^{12} bit)的信息量,并减小功耗几千倍.通信系统的带宽将增加100倍,它将大大减少商务旅行和来往.同时发展可折叠的平面显示

* 2003-02-17 收到初稿,2003-05-08 修回

[†] E-mail: xiajb@red.semi.ac.cn

器,它比现在的显示器亮 100 倍.将生物和非生物器件集成到一个相互作用系统中,将产生新一代的传感器、处理器和纳米器件。”

从科学意义上说,半导体纳米材料的尺寸在 1—100nm 之间,具有三维的空间限制,因此是一个研究电子与光子的量子限制、单电子、单光子效应的非常吸引人的和有趣的对象.它包含了丰富的物理内涵,如:单电子的电子学、单光子的光子学、微腔和光子晶体、稀磁半导体和自旋电子的相干输运等.对它的研究要求多种学科的交叉,如固体物理、分子物理、化学、量子光学、超快光谱、材料科学和结构分析等.半导体纳米材料的研究也促进了现代实验技术的发展,如 STM、AFM、近场显微光谱、时间分辨光谱、泵-探束光谱、简并和非简并四波混频、低温强磁场下的输运测量、精密刻蚀工艺等.

2 半导体纳米材料和物理研究的新进展

2.1 半导体自组织生长量子点

自组织生长量子点就是利用两种材料晶格常数不匹配的特点,采用传统的分子束外延(MBE)或金属有机气相外延(MOVPE)方法,在一种材料的衬底上生长另一种材料的量子点.它的优点是生长的量子点大小均匀、密度高、发光效率高.由于量子点位于另一种材料中,因此没有表面缺陷的问题,大大减小了非辐射跃迁的几率.自组织量子点在即将到来的单粒子电子学和光子学的新领域中将起关键的作用.

在 GaAs 衬底上自组织生长 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 量子点,改变生长条件,能得到各种形状、大小、排列的量子点^[1,2].用分子束外延在掺 Si 的 GaAs(100)衬底上生长 InAs 岛,并在 530℃ 和 1×10^{-5} Torr 的压力下退火 40s,以减小岛的大小分布.岛的形状像截顶的金字塔,基底宽 30—40nm,高 4—8nm.然后在相同温度下用 20—75Å 的 GaAs 层覆盖 InAs 岛.岛突然变为量子环,外直径增大为 60—140nm,高度减小为 2nm,中间孔的直径约为 20nm.如果在成核以前在衬底上先制作一个图形台面,则在 GaAs 衬底上能形成 InAs 岛规则排列的二维晶格.

量子点是三维限制的,类似于一个人造原子.在一个原子中,由于电子轨道的填充,出现了电子数为 2, 8, 28, ... 的周期性,也就是元素周期表.在自组织量子点中,也存在类似的周期性.但它在垂直方向的尺度比水平方向的小得多,基本上是二维限制的,因此电子填充的周期性为 2, 6, 12, ... 将包含量子点

层结构的两边放上平行板电极,构成了一个电容谱仪.测量电容值随外加偏压的变化,就可以研究电子能级与填充电子数的关系.图 1 是测得的电容与外加偏压的关系^[3].填充第 1 个电子以后,由于库仑相互作用能量,使得 2 个电子态的能量升高了 20meV.填充第 3 个电子则要求更大的能量 50meV.所以在电容谱上,第 2 峰和第 3 峰之间有一个空隙.

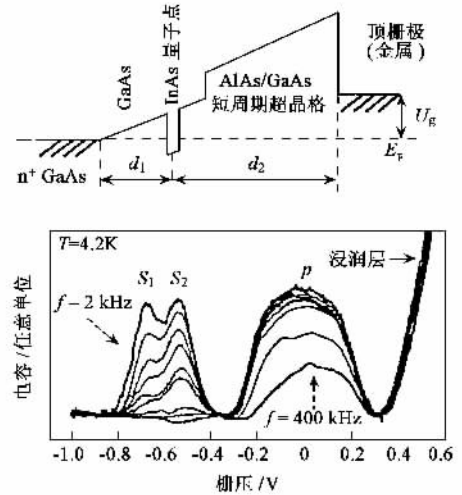


图 1 (a)样品导带边的示意图, $d_1 = 40\text{nm}$, $d_2 = 400\text{nm}$ (b)在不同频率 2.3—400kHz 下记录的 $C-V$ 曲线,背景电容已经减去

量子环是一种新型的量子点,具有独特的电子态性质.电子能级不仅与量子环的几何形状有关,而且与穿过环的磁通量有关.图 2 是电子态能量与穿过环的磁通量 ϕ/ϕ_0 的关系, $\phi_0 = hc/e$ 是一个磁量子数.电容谱实验测量到了基态能量随磁通的变化^[4],在磁场等于 8T 处,电子态能量有一个转折,相当于电子能级由 $L=0$ 的态向 $L=-1$ 的态过渡.

量子点存储器^[5].在 2 层量子点之间用很薄的 AlAs 层分开,允许电子在两层之间快速传输(约 0.5ps).写的过程是:由光子产生的激子在外加偏压下分解成电子和空穴对,分别存储在 InAs 量子点和应力感应的 GaAs 量子点中.读出过程是:加一个反向偏压,将空穴从 GaAs 量子点赶回到 InAs 量子点,与电子复合,产生一个光子,由光子探测器纪录.电荷存储时间高达 10s,比量子点中激子的寿命 5ns 长得多.在过去几年中,用显微荧光谱来实现光学读写一个单量子点已成为常事.如果在量子点的排序和定位上能得到改进的话,则有望实现单量子点的信息存储,开辟超高密度存储器的可能性.

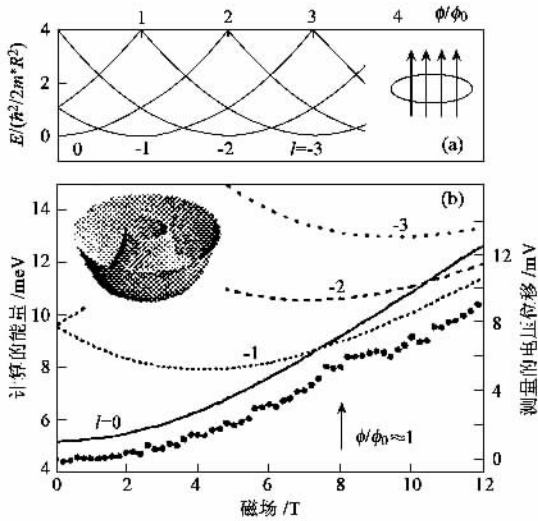


图2 (a)一个理想一维环的能级作为穿过环的磁通的函数 (b)一个内部为抛物势的线弯成环以后,计算的能级作为磁场的函数 [图中的点是测量的最低电容极大对应的栅压位移(右边坐标)]

2.2 纳米晶体

纳米晶体是用化学方法生长的具有晶体结构的半导体量子点.与自组织生长方法相比,化学方法制备成本低得多.主要是利用液相化学反应,用这种方法已经制取各种尺寸的纳米晶体,它们的发光波长可以在很宽的范围内调节.利用选择沉淀的方法,在胶体中加一种非溶剂,使较大尺寸的粒子沉淀,从而达到尺寸选择的目的. II - VI族直接带隙半导体的纳米晶体发光很强,可以用作发光器件,例如:大面积的显示屏,或者医学诊断用的生物探针.此外,纳米晶体由于它们的三维量子限制效应,因而具有较强的非线性光学性质,将可能在快速光调制、光开关、相共扼、光波导和光存储器件中得到应用.

有两种液相化学反应方法制备半导体纳米晶体:在不含水的溶液中,用 TOP/TOPO 包覆纳米晶体,并在水溶液中用硫醇类(thiols)作为稳定剂.过去研究得较多的是 CdSe, CdTe, CdS 等纳米晶体,它们的发光波长在较短波长范围,纳米晶体的质量有很大提高.特别是用两种材料组成的纳米晶体,一种大带隙材料包覆在另一种小带隙材料的外面,增加了量子限制,减小了表面缺陷,大大提高了发光效率.如 ZnS 包覆的 CdSe 纳米晶体^[6],溶液的发光量子效率超过 50%.在生长过程中,控制纳米晶体的直径,发射光的峰值波长能在 470nm 至 630nm 之间连续可调.纳米晶体的尺寸分布小于 6%,荧光峰的半宽度(FWHM)小于 30nm.

光通信感兴趣的是近红外波长 1.3 和 1.55 μm,

一种在这个波段内有强发光的材料将是宽带光学放大器的基础. HgTe 体材料是零禁带的,由于量子限制效应,它的纳米晶体应该是窄禁带的.用水溶液的方法已经制备出 HgTe 纳米晶体^[7].它的荧光峰覆盖了 800—1400nm 的光谱区,极大波长在 1050nm.它具有非常高的量子产额,约为 50%.

除了球状的纳米晶体以外,还制成了椭球状的 CdSe 纳米晶体^[8].它的横向直径为 4.2nm,长度分别为 11, 20 和 40nm.由于是椭球形状,将它们定向排列后,能发出线偏振光.

半导体纳米晶体具有高的发光效率,并且波长可调,作为发光器件具有广阔的应用前景. CdTe 纳米晶体/polyaniline 组合膜以及密排 CdTe 纳米晶体膜已经用于制造发光二极管^[9],其中用 ITO 作阳极, Mg/Ag 作阴极,开启电压为 2.5V.发光波长可以通过改变纳米晶体的大小来调节.

关于高效发光二极管(LED)问题:目前纳米晶体 LED 的发光效率还远低于有机发光二极管的效率,这是由于以前的纳米晶体 LED 利用纳米晶体的多层薄膜,尽管单个纳米晶体的发光效率很高,但纳米晶体多层之间的电导很低,造成了注入电荷的不平衡,使得这些早期的 LED 发光效率不超过 0.1cd · A⁻¹.此外纳米晶体多层之间的针孔状缺陷使得器件的性能变坏.因此采用纳米晶体的单层作为发光层,并与有机发光二极管结合,使得发光效率比以前最好的纳米晶体发光二极管提高了 25 倍 (1.6cd · A⁻¹, 2000cd · m⁻²)^[10].它的结构和电荧光谱见图 3,其中一层用 ZnS 包覆的 CdSe 纳米晶体均匀地夹在提供电子输运和空穴输运的有机层之间,使得电子和空穴直接运动到量子点上,进行复合,具有高的发光效率.纳米晶体的荧光峰波长为 562nm,外量子效率超过了 η = 0.4%.改变纳米晶体的尺寸,可以调节发光的波长.

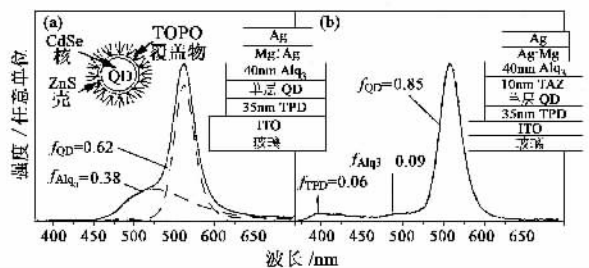


图3 两个量子点 LED 的电荧光谱和结构 [虚线是光谱分解成量子点(QD)和 Alq₃分量,插图是量子点核壳结构的示意图]

2.3 微腔和光子晶体

当纳米结构的尺寸与光的波长相当时,形成光的微腔.在微腔中光只能以一定的模式存在.由两种不同介电常数材料组成的一维、二维或三维空间周期结构,如果它的周期与光的波长相当,则光在其中的传播与在自由空间中不同.形成光子能带和禁带,频率在禁带中的光不能传播,处于光子能带中的光子态密度与自由空间中有很大差别.在微腔和光子晶体中,激子与腔光子模的相互作用增强,产生了一系列新的物理现象,如极化子、拉比振荡、无阈值激光等,具有重要的应用前景.

分布反馈激光器(DBR)是最简单的微腔,由交替排列的具有不同折射率的半导体材料层组成,层的厚度为波长的 $1/4$.由几十层AlAs/GaAs组成的反射镜,反射率可达到99%.微腔产生的量子点自发辐射的选模和增强效应称为Purcell效应.当微腔的侧向尺寸减小到微米量级时,已经观察到由侧向限制引起的光学模的位移和分裂^[11].由GaAs/AlAs DBR组成的微腔柱激光器^[12],发光中心是InAs自组织量子点.柱直径为 $1\mu\text{m}$,品质因子 $Q=5000$,寿命从1ns减小为0.25ns,自发辐射率增加了5倍.

微盘激光器(microdisk laser)是贝尔实验室的Slusher R E等人研制出来的,直径为几微米,厚度只有100nm.由于半导体和周围空气的折射率相差很大,光在其中全反射,形成“回音壁”模,具有很大的 Q 值.微盘激光器的阈值电流只有 $100\mu\text{A}$.量子通信需要单光子发射器件,因为量子密码(cryptography)要求单个光子之间有强的量子关联,形成所谓的纠缠态.利用量子点的圆盘微腔,可使几乎100%的激发脉冲产生单光子的发射,因而是一个理想的单光子源.在一个含InAs量子点的GaAs圆盘微腔中,已经观察到具有量子关联的单光子发射^[13].圆盘微腔直径 $5\mu\text{m}$,厚200nm,产生高 Q 值的回音壁模.图4是一系列激光脉冲激发下的光子关联函数.由图4(b)在 $\tau=0$ 时没有与激光脉冲对应的峰,这说明 $\tau=0$ 时检测到了第1个光子以后,发现第2个光子的概率为零,证明了这是一个理想的单光子束流,重复频率为82MHz.这中间微盘腔起了一个重要的作用.当量子点的基本激子线与腔模共振时,Purcell效应缩短了辐射复合时间6倍,并改善了收集的效率.预计这种光源在量子密码中是一个关键部件,并且使得只用线性光学元件就能进行量子计算.

球形微腔中的量子点:将CdSe量子点放入

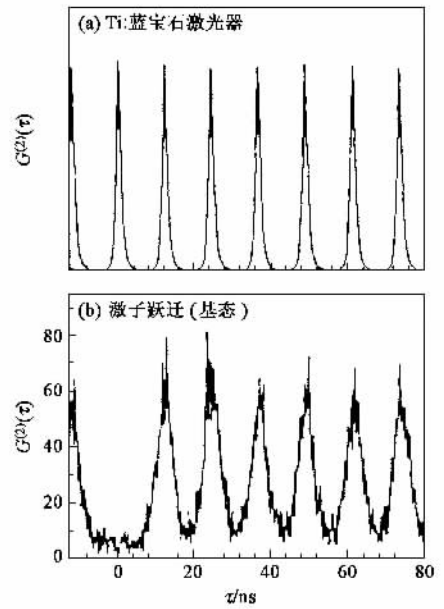


图4 测量的关联函数 $G^{(2)}(\tau)$

(a)锁模Ti:蓝宝石激光器(FWHM=250fs) (b)一个单量子点在脉冲激发条件下(82MHz)的激子基态发射

polyMMA有机玻璃小球中,由于小球与周围空气折射率的差别,小球形成了一个微腔,又称光子点.在CdSe的荧光谱上,已经观察到由微腔中的回音壁模(whispering gallery modes)产生的尖锐的周期结构^[14].在包含 $\text{CdSe}_x\text{S}_{1-x}$ 量子点的玻璃球腔中,也观察到了回音壁模产生的PL谱线的周期结构^[15].

单根量子线组成的电驱动激光器:将CdS晶体量子线作为法布里-珀罗光学微腔,把它组装在p-Si绝缘衬底上,再用电子束刻蚀和蒸发 Al_2O_3 ,Ti和Au,在量子线的上下两面引入正负电极,组成电驱动激光器^[16].当注入电流增加到 $200\mu\text{A}$ 时,发射光的强度迅速增加.在低注入电流下,发射谱有一个宽的峰,半宽度(FWHM)约为18nm.当注入电流大于阈值电流 $200\mu\text{A}$ 时,发射谱迅速变为一系列非常尖的峰,主要发射线位于509.6nm处.这些发射峰平均间距为1.8nm,与纳米线长度的法布里-珀罗腔模相符.在低温(8K)下发射谱变成了一个单模,这是激射的特征.

光子晶体主要有三方面的应用:完全的介电反射镜,用于反射光;共振腔,用于俘获光;波导,用于传输光.利用二维光子晶体已经制成表面发射的激光器^[17].光子晶体是由InP上的空气孔组成的六角结构,它和InGaAsP/InP多量子阱有源层的晶片通过一种晶片熔接技术相集成,见图5(a).将发射光的频率设计在光子带隙处[图5(b)],将引起分布

反馈效应,产生激光.其激光光谱有2个尖锐的峰,波长相差 $\Delta\lambda = 28\text{\AA}$ [对应于光子带隙两边的波长差(图5(b)的A和B点)].这是由于在光子带边处,光子的群速度($d\omega/dk$)为零,限制了光在 k 方向的传播.室温下阈值电流密度为 3.2kA/cm^2 .由于空间的对称性,还观察到6个等价方向上($X-\Gamma$)激光的发射.

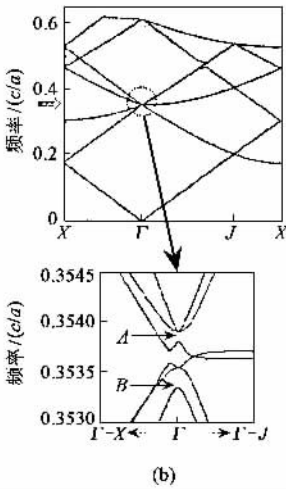
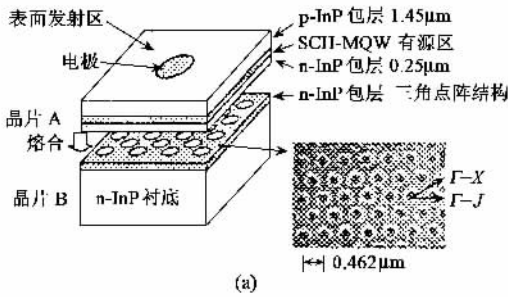


图5 (a)与二维三角格子光子晶体集成的表面发射激光器示意图(右图是三角格子的SEM图,晶格常数是 $0.462\mu\text{m}$)(b)光子能带图(下图是 Γ 点附近光子能带的放大,激光振荡发生在 Γ 点的两个带边)

利用二维光子晶体和垂直方向上的微腔制成了激光器^[18].将InGaAsP量子阱有源层放在一个InP薄波导层中,设计波导层的厚度(320nm),使其在垂直方向只存在一个类TE模.波导层通过晶片熔接技术与AlAs层相接.用电子束刻蚀形成六角孔排列结构,再通过湿氧化将AlAs转变为低折射率的 Al_2O_3 .当光泵功率达到 23.2mW 时出现激射.

2.4 纳米结构中的自旋电子学

自旋电子学是研究利用固体中电子的自旋而不是电荷来传递信息.由载流子的自旋和磁性杂质的相互作用产生了一系列的与自旋有关的效应,将它们与标准的微电子技术结合起来,为新一代的量子器件提供了极好的机会.自旋器件有两类:一类是由

铁磁材料组成,如:自旋阀、磁隧道结、巨磁阻(GMR)隔离器、磁阻随机存储器(MRAM)等,其中有些已经是商品.第二类是稀磁半导体,它具有一系列新的物理性质,如电子态的塞曼分裂、自旋极化电子注入和输运、自旋操作等,目前还在基础研究阶段.由于在半导体中自旋相干弛豫时间相对于电荷弛豫是很长的,在室温下达到了ns量级,自旋相干扩散长度达到了 100nm ,预计利用自旋传递信息在量子计算中会有广泛的应用.

过去20年主要集中在掺Mn的II-VI族半导体合金上,如:HgMnTe、ZnMnSe等.发现了许多新的物理现象,如CdMnTe中的巨Faraday旋转, p -HgMnTe中的非常大的负磁阻,以及在多层结构中由不同自旋电子空间分离产生的“自旋超晶格”.虽然这些现象预示着许多以自旋为基础的器件应用,但是它们都受到了低居里温度的限制,以及其中Mn-Mn离子的相互作用是反铁磁的.当温度接近于室温时,磁化强度就迅速减小.

在近年来出现的掺Mn的III-V族稀磁半导体中,Mn-Mn离子的相互作用是铁磁的,并且具有相对高的居里温度($\sim 100\text{K}$),因此具有重大的基础和应用研究意义. $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ ($x = 0.051$)在 50K 以下的磁化曲线是磁滞回线^[19],证明了是铁磁性,其居里温度为 50K .此外,还发现居里温度与空穴浓度成正比,这是由于通过Mn离子之间的铁磁RKKY耦合.

稀磁半导体的一个主要参量是 $p-d$ 交换积分,它决定了电子或空穴能级在磁场下巨大的塞曼分裂,以及由此产生的特异的输运和光电性质.交换积分在II-VI族稀磁半导体中已经比较确定,但是在III-V族稀磁半导体中还是一个问题,因为不同作者从不同实验中得出的值相差很大.这是因为在铁磁的稀磁半导体中,其局域范围和宏观范围内的磁化强度是不同的.

从自旋极化输运和带阶(band-offset)可调的角度,由稀磁半导体组成的超晶格或异质结是非常吸引人的.InAs/GaMnSb超晶格的能带示意图见图6.InAs/GaSb是第II类超晶格,GaSb的价带顶高于InAs的导带底,所以在InAs中靠近界面处有自由电子,而在GaSb中靠近界面处有自由空穴.图6(b)是在外磁场下GaMnSb中由于塞曼分裂导致的导带和价带能级的分裂,对于价带自旋向上的能级较低.因此在平衡时,GaMnSb价带中自旋向下的电子流向InAs的导带能级,而在GaMnSb价带中留下自旋向下的空穴.

因此通过外加一个小磁场,可以使结构变为导电或者绝缘的,并且在层中产生具有一定自旋极化的电子或空穴。

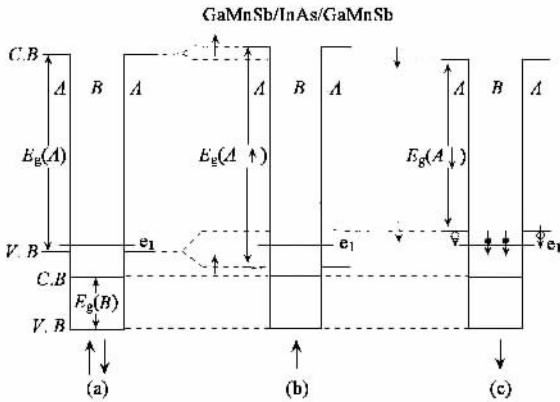


图 6 InAs(B)/GaMnSb(A)超晶格的能带图
(a)无外磁场 (b)和(c)分别为磁场下的自旋向上态和向下态

自旋极化电子注入通常是利用磁场下半磁半导体的巨塞曼分裂效应达到。由于电子或者空穴能级在磁场下有较大的分裂,自旋向下的电子占据导带能级的基态(n^- 型),或者自旋向下的空穴占据价带能级的基态(p^- 型)。通过外加电场就能将具有一定自旋取向的电子(空穴)从稀磁半导体中引出来,这些电子(空穴)就成为自旋极化电子(空穴)。下面是几个实现自旋极化电子注入的实验。

图 7 是自旋极化发光二极管的能带示意图^[20]。在外加偏压下,自旋极化电子从 n 型半磁半导体 BeMgZnSe 中引出,注入到 GaAs 发光区中。空穴从 p -GaAs 区中引出,自旋是无规的。测量荧光的偏振度就可以得到注入电子的自旋极化度 $P = (J_{\uparrow} - J_{\downarrow}) / (J_{\uparrow} + J_{\downarrow})$ 。图 7(b)是器件截面图,到达 GaAs 有源区的电子的自旋极化率 P 达到了 90%。

也可以引入自旋极化的空穴^[21]。空穴通过磁场 1000 Oe 下的 GaMnAs 半磁半导体注入 InGaAs 有源区。通过测量电致发光的偏振度,得到偏振度为 10%。实验是在低于 Mn 的居里温度 40K 下进行的。还有用共振隧穿让电子通过含有 Mn 离子的 ZnMnSe 势阱,得到了自旋极化电子^[22]。隧穿电流中电子的自旋极化度达到 40%—80%。

以上几种方法都要求在低温和磁场下工作,不利于器件应用。有人在室温下尝试直接由铁磁材料向半导体注入自旋极化电子^[23],由于 Fe 层与 GaAs 层的界面对自旋的反转 (spin-flip) 效应,自旋极化注入的效率是低的,极化度为 2%。

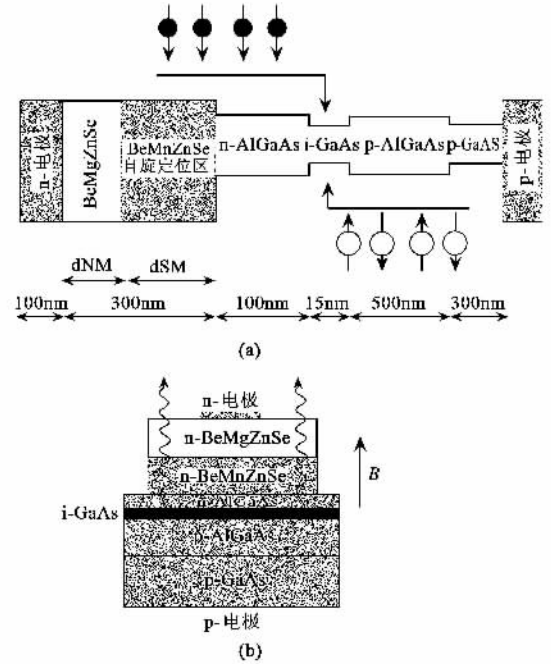


图 7 (a)自旋极化发光二极管能带示意图,自旋极化电子从左边注入到 GaAs 有源层,非极化的空穴从右边注入 (b)器件的截面图,显示了磁场和光发射的方向

3 结论

在 20 世纪半导体超晶格、量子阱研究的基础上,半导体纳米材料、物理和器件向更深更广的方向发展。如在自组织量子点方面,有库仑阻塞效应、单电子的电子学、单光子的光子学等;在半导体纳米晶体方面,有从红外、近红外一直到紫外波段的发光纳米晶体,与有机发光二极管相结合的高效、发光、非线性光学性质等;在微腔和光子晶体方面,有极化子、拉比振荡、无阈值激光等;稀磁半导体和自旋电子的相干输运等。这些材料和现象的研究将为研制在新原理基础上的新器件和实现量子计算、量子通信打下基础。

参 考 文 献

[1] Petroff P M *et al.* Physics Today ,2001(5) : 46
 [2] Garcia J M *et al.* Appl. Phys. Lett. ,1997 ,71 :2014
 [3] Luyken R J *et al.* Appl. Phys. Lett. ,1999 ,74 :2486
 [4] Lorke A *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2000 ,84 :2223
 [5] Lundstrom T *et al.* Science ,1999 ,286 :2312
 [6] Hines M A *et al.* J. Phys. Chem. ,1996 ,100 :468
 [7] Rogach A L *et al.* Adv. Mater. ,1999 ,11 :552
 [8] Hu J T *et al.* Science ,2001 ,292 :2060
 [9] Rogach A L. Optical Properties of Semiconductor Nanostructures. Eds :Sadowski M L *et al.* Kluwer Academic Publishers , 2000. 379

- [10] Coe S *et al.* Nature ,2003 ,420 :800
 [11] Reithmaier J P *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1997 ,78 :378
 [12] Gerard J M *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1998 ,81 :1110
 [13] Michler P *et al.* Science ,2000 ,290 :2282
 [14] Artemyev M V *et al.* Appl. Phys. Lett. ,2000 ,76 :1353
 [15] Jia R *et al.* Appl. Phys. Lett. ,2001 ,79 ,153
 [16] Duan X F *et al.* Nature ,2003 ,421 :241
 [17] Imada M *et al.* Appl. Phys. Lett. ,1999 ,75 :316
 [18] Hwang J K *et al.* Appl. Phys. Lett. ,2000 ,76 :2982
 [19] Oiwa A *et al.* Physica B ,1998 ,249—251 :775
 [20] Fiederling R *et al.* Nature ,1999 ,402 :787
 [21] Ohno Y *et al.* Nature ,1999 ,402 :790
 [22] Gruber Th *et al.* Appl. Phys. Lett. ,2001 ,78 ,1101
 [23] Zhu H J *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2001 ,87 :016601-1

· 物理新闻与动态 ·

同种电荷能相互吸引吗？ (The attraction of like Charges)

许多生物大分子(如 DNA 等)常常会出现一些违反物理学中基本规律的现象,例如它们虽然具有相同符号的电荷,但却能相互吸引并在水中聚集成团,称为丛生现象. 科学家们认为这种丛生现象的产生一定是由于某些溶于水中的离子或带电小分子抵消了大分子的电荷所形成的,但却不能破解其中的机理与细节.

最近美国 Illinois 大学的生物物理学家 G. Wong 和他的同事们对这个问题开展了研究,他们对同种电荷相互吸引进行了一些简单的实验后发现,想使同种电荷发生相互吸引必需要在离子大小的范围内才有可能.

在许多年以前,生化学家们早就发现要使带电的大分子,一般称为高聚物电解质,在水中发生蜷曲,水溶液中存在的离子会起非常关键的作用. 与高聚物电解质具有相反符号电荷的离子会抵消高聚物内部的相排斥作用,当然离子的电荷大小是与高聚物电解质的性质有关,有些要求三价离子,有些要求二价离子,而单价离子通常是不参与这类作用的. 另外离子的大小也是很关键的因素. 显然对高聚物电解质与离子间相互作用的了解将极有益于我们对许多疾病病毒和不健康蛋白质分子的认识与处理,例如胞囊状组织的纤维化、污染杂质的处理以及在生物大分子中麻醉剂的延时释放等.

G. Wong 研究组的工作是利用一种称为双胺的小分子,它的形状类似于一个哑铃. 但在一定的作用下可以将其拉长. 它的分子结构是在其两端分别是两个载有正电荷的 NH_3 离子并连接着四个碳原子. 在不同的尺寸下对它进行测试,发现当它的大小约为 0.29nm 时就会使高聚物电解质分子相互交叉产生丛生现象. 因此 0.29nm 是一个重要的尺度标准,称为 λ 长度. 如果我们把丛生表面看成是一个带电的薄片,那么当超过这个尺度时,外部的电荷将会被水中的离子所屏蔽. 如果把双胺哑铃分子的长度拉伸到大于 λ 长度时,这时双胺分子的作用类似于一个单价离子. 科学家们对上述实验的解释是:当双胺分子的长度是 0.29nm 时,它一端的电荷将中和病毒表面斑点的负电荷,而其另一端的正电荷将会吸引附近的病毒与它结合. 如果双胺分子拉得太长时,这时只有一端处于病毒斑点的有效范围内,所以 λ 长度实际上是确定了离子作用范围的大小. 对于许多高聚物电解质可以计算出它们斑点的大小, G. Wong 研究组曾对三个生物大分子进行了计算,正确地预测出了它们在二价离子存在的情况下,可以形成大分子丛生结构. 他们的实验得到了科学界的肯定,进一步的工作是要建立高聚物电解质的行为在各种条件下的详细模型.

(云中客 摘自 Physical Review Letters ,11 July 2003)