

半导体超晶格

程文芹

半导体,大家都很熟悉了,而半导体超晶格则是个新生事物,要对它做个简单介绍还得从半导体的导电性说起。我们都知道,物质是由原子组成,原子的中心是原子核,周围有电子绕核运动。对于孤立的原子(即当原子间的距离很大,原子之间的相互作用可以忽略不计时),其电子的能量只能取一些分立的值,即量子化的能级。当原子间的距离减小形成晶格时,最外层电子,即决定元素化合价的价电子,已经不再只属于某一个原子,而为整个晶体所共有,其原来的能级扩展为能带。对于绝缘体和半导体,价电子能带——即价带中的能级数与晶体的价电子数目刚好相等,在价带与更高的激发态能带之间有一段没有允许能级间隙,称为禁带。在低温下,价电子都处在价带中,由于电子数状态数相等,在外电场作用下,总的状态不改变,因此不导电。如果温度升高,总有一些电子被激发,越过禁带跳到激发态能带,这里有大量空的能级而只有少数电子,在外电场作用下,这些电子的状态就会发生改变,形成电流。我们把这些电子称为导电电子,把这个价带上面的能带叫做导带。当一个电子从价带跳到导带之后就在价带留下一个空的能级,价带不是全满了,在有外加电场时,价电子借助于空的能级也可以改变状态产生电流,这空的状态就叫空穴。如果禁带很宽,常温下电子-空穴对很少,这种材料就是绝缘体。若禁带不太宽,在常温下就能产生一定数量的电子-空穴对的,就是半导体。

上面所说的是没有杂质没有缺陷的理想晶体。如果有缺陷或杂质,在禁带中就可能存在杂质能级或缺陷能级。有两类杂质特别重要,一类是其电子能级在导带底附近,在常温下这些电子就可受热激发进入导带成为导电电子,这种杂质称为施主;另一类是在价带顶附近形成空位能级的杂质叫受主,在常温下价电子即可被激发到这些能级上,在价带形成空穴载流子。我们把含施主杂质,导电电子多于空穴的半导体称为N

型的;反之,受主浓度大于施主,空穴多于电子的就是

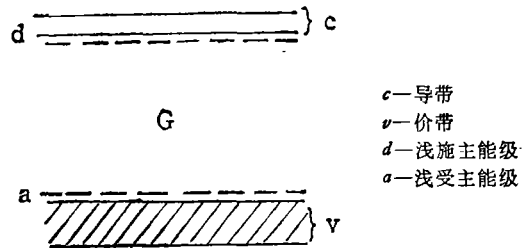


图1 半导体能带位置示意图

P型的。浅施主和浅受主杂质对应用极为重要。我们常用的收音机、电视机中的晶体管里的半导体器件中都有意地被掺入这些杂质。图1表示半导体的能带、浅杂质能级的相对位置。导带电子和价带空穴靠库仑相互作用维系在一起。这样的电子-空穴对被称为激

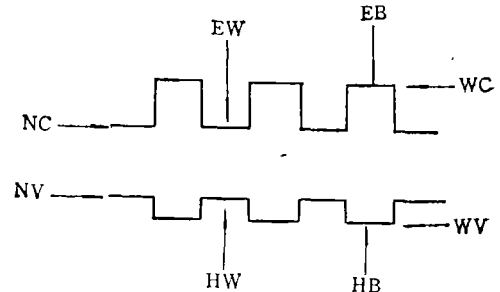


图2 超晶体(量子阱)材料能带示意图

NC—窄带材料的导带底 NV—窄带材料的价带顶
EW—电子势阱 HW—空穴势阱 EB—电子势垒
HB—空穴势垒 WC—宽带材料的导带底 WV—
宽带材料的价带顶

子。空穴比电子重得多,所以它们的相对运动类似于氢原子中电子相对核(质子)的运动。电子相对空穴有个统计半径。尺寸远大于激子半径的半导体材料被称

为体材料。我们通常说的半导体就是体材料。

半导体超晶格

若在半导体单晶衬底上交替地生长两种禁带宽度不同的半导体材料，而且每种材料的厚度都小于激子的半径，这种材料被称为半导体超晶格。每层的厚度一般为几十埃到几百埃。其能带相对位置示于图2。

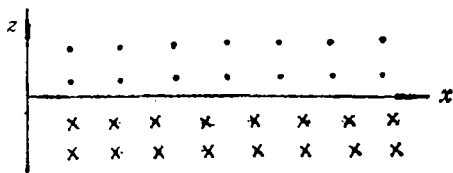


图 3

顾名思义，超晶格是比实际晶体的晶格(一般几个埃)大的人造晶格。如果势垒足够宽，相邻势阱中的载流子(电子或空穴)的相互作用可以忽略，那么这种超晶格习惯上被称做量子阱。只有一个量子阱的材料被称为单量子阱材料，包含两个或两个以上的被称做多量子阱材料。阱中电子(空穴)在垂直两种材料界面的方向(z 方向)的运动受到材料尺寸的限制。从量子力学的观点，电子(空穴)在 z 方向的运动是量子化的，而在 xy 平面的运动是连续的。

应变超晶格

近年来对应变超晶格的研究相当活跃。什么是应变超晶格呢？根据前边的叙述我们知道超晶格是由两种材料组成的。如果两种材料的晶格常数很接近，我们说晶格是匹配的。如果两种材料的晶格常数差别较大，那么晶格常数是匹配的，由图3可以看出晶格不

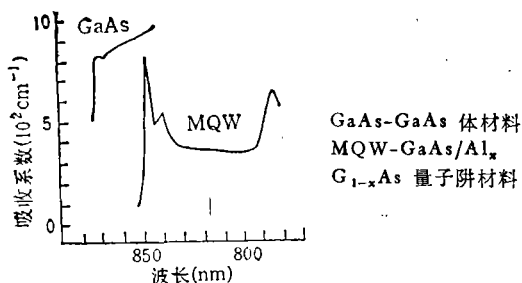


图4 GaAs 体材料和 GaAs-Al_xGa_{1-x}As 量子阱材料的吸收谱。

匹配的材料生长在一块时的情况。图中“·”表示一种晶格，“x”表示另一种晶格。如果把这两种材料长在一起，如果晶格常数差别不是太大，那么由于材料的弹性，有可能在 x 方向对齐。这时“·”材料在 x 方向受到压缩力，而“x”材料则受到拉伸力。层数(在 z 方向)越多压缩力和拉伸力就越大。当这些力超过晶体所允许的弹力时就产生位错。但如果层足够薄可不产生位错。这种用晶格常数差别较大的材料生长的超晶格(在

无位错的限度内)叫应变超晶格。应变超晶格可以大大扩大半导体材料的范围。半导体超晶格的一个重要特点是激子结合能比体材料的高得多。体材料的激子结合能低在室温下容易离解，不稳定。而量子阱材料的激子在室温下稳定。图4给出体材料和量子阱材料的激子吸收谱。由图可以看出体材料的激子吸收峰不明显，而量子阱材料的很明显，很锐，量子阱材料的这一特性在非线性光学上有很多应用。

生长超晶格材料的方法在不断地发展。归纳起来有两大类。一类是有机金属蒸汽化学沉积法，另一类是分子束外延。前者设备简单，价格便宜，且在生长超晶格上取得了相当的成功。后者设备较复杂，价格昂贵，但生长厚度的控制最准(单原子层)，是生长超晶格材料的一种好方法。我国已经制造了三代分子束外延设备，(正在制造第四代设备)。而且已经用国产分子束外延设备生长出高质量的超晶格材料。

超晶格材料的应用

红外探测器。所用材料是-In_{0.33}Ga_{0.67}As-In_{0.33}

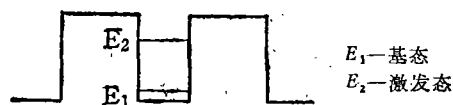


图5 带内跃迁示意图

Al_{0.67}As 量子阱材料。In_{0.33}Ga_{0.67}As 是阱，In_{0.33}Al_{0.67}As 是垒。如图5所示。阱中 E_1 为基态， E_2 为激发态。 E_2 与 E_1 的能量差相应于 $4.4\mu\text{m}$ (微米)的波长。电子在无光照时处在 E_1 能态。当波长为 $4.4\mu\text{m}$ 的光入射在探测器时电子吸收光能而跃迁到 E_2 能态。

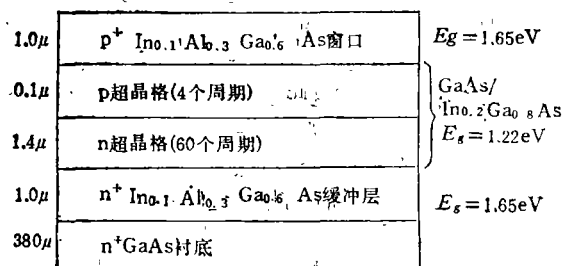


图6 超晶格发光器和探测器层结构示意图

因而成为波长为 $4.4\mu\text{m}$ 的光探测器。由 E_1 到 E_2 的跃迁振子强度为0.44。量子效率相当高。这一器件利用的是带内跃迁。也就是利用了导带势阱中的两个能级。

波长在 $1.1-1.3\mu\text{m}$ 的发光器和探测器在光通讯上很重要(光导纤维的窗口在这个范围)。有人已经用超晶格制成了波长在这一范围的发光器和探测器。材料各层的参数在图6中给出。用超晶格的目的在于调整势阱层和势垒层的厚度得到所需要的波长。

(下转第21页)

准后才能使用,可测量 10^{-10} 托的低真空。

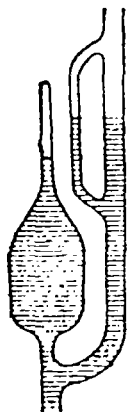


图5 麦克劳真空规

二十世纪以来,由于真空技术的广泛应用,各种类型的测量仪器(真空规)相继问世。其中有:1910年克努曾的辐射计,1913年朗缪尔的振荡石英计,1916年布克莱(Buckley)的热阴极电离规和1937年的冷阴极电离规。电离规根据电子三极管的原理制成,可以用于测量 10^{-3} — 10^{-7} 托的真空度,基本上满足了三十年代电子工业的需要。然而,再前进一步却遇到了难以逾越的困难。三十年代已经有人发现,电离规的测量值有一极限。从表面吸收实验得到足够的证据,证明真空系统的真空度可能已达到 10^{-10} 托(10^{-10} 托以下的压强称超高真空),电离规的指示却仍然停留在 10^{-8} 托的量级。显然,电离规有一本底电流。于是许多人开始致力于改进电离规的设计。

贝阿德(Bayard)和阿尔帕特(Alpert)在1950年作出了突破,提出一种别出心裁的设计。可将测量范围延伸到 10^{-11} 托。一下子就使真空量测进入了超高真空的领域。人们把经过这样改进的电离管称为

B-A 规,以表彰贝阿德和阿尔帕特的功绩。现在这种电离管已经成了超高真空段中应用最广泛的一种量规。

真空技术的这段历史可以给我们哪些启示呢?也许读者首先得到的印象是:物理学和技术是紧密相关的。物理学发展的不同阶段是与技术水平互相适应的。物理学越是向深度和广度扩展,对技术的要求也就越高。它促使人们研究和改进技术、开发新技术,这些人中间就有许多物理学家。他们工作在技术领域,研究技术中的物理问题,对技术的发展作出了贡献,从而推动整个科学技术向前迈进。这样的例子是很多的,真空是一例;加速器也是一例;激光更是对现代社会有巨大影响的又一例……人们正在拭目以待低温超导工程,这个领域也必将对整个科学技术以致于人类社会产生巨大的反馈。

同时,技术的发展也要受到自然科学,特别是物理学发展水平的制约。技术必须有理论的指导,必须有实验研究作为其中间环节,两者的相互制约决定了物理学家、特别是实验物理学家和工程师与技师之间的协作和配合的必要性。有许多科学先辈本人往往就一身而二任。不少有远见的工程技术人员很重视理论和实验研究。只有这样,才有助于新技术的开发和完善,而实验作为贯穿基础研究、应用研究、开发研究和生产四者之间的一根红线,更有其不可抹煞的作用。

(上接第 18 页)

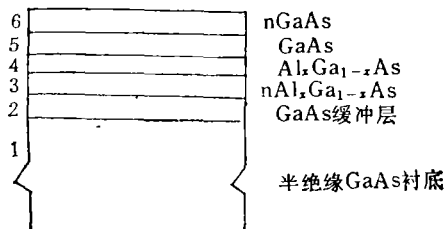


图7 HEMT 材料示意图

同样有人用改变超晶格的参数可以改变禁带宽度的原理用 GaAs/ $Al_xGa_{1-x}As$ 量子阱(阱宽 13 \AA — 55 \AA)材料做成了频率在 707 nm — 837 nm 范围的激光器。

非线性光学器件 我们知道在电子学中有电非门和双稳态电路等非线性器件(单元)。同样在光学中也有类似的器件。在这些器件中都利用了超晶格材料具有明显、尖锐的激子吸收峰这一特性。有关它们的详细介绍已超出本文的范围。

高电子迁移率晶体管。近些年来人们已经用所谓二维电子气材料做成了 HEMT,为简明起见将用于做 HEMT 的材料结构用图 7 加以说明。生长 GaAs

缓冲层是为了使以后生长的晶体质量更好。 n 型 $Al_xGa_{1-x}As$ 中的电子由于第五层 GaAs 的带宽比 $Al_xGa_{1-x}As$ 的低而呆在 GaAs 中。生长不掺杂的第四层 $Al_xGa_{1-x}As$ 是为了减小第三层中电离的离子对第五层中的电子散射从而提高第五层中电子的迁移率。第六层,即最上一层,是为了做源、栅和漏电极的。第五层是有源层。用栅极电压控制有源层的有效沟道的宽度,从而控制由源到漏的电流。有源层电子迁移率越高,高电子迁移率晶体管工作速度就越快。而有源层中电子迁移率取决于 GaAs 的晶体质量,厚度,第 4 层不掺杂 $Al_xGa_{1-x}As$ 层的厚度以及第三层 n 型掺杂 $Al_xGa_{1-x}As$ 的掺杂浓度和厚度等参数。这种高电子迁移率晶体管的工作速度和跨导都不错。但在低漏电流下的增益容易退化。夹断特性也不太好。有人做了改进,其中一个单量子阱起了很大作用。

超晶格对基础研究和应用都很重要,所以世界上不少有名望的固体物理学家正从事这方面的研究工作。美国的贝尔实验室和 IBM 实验室都在积极地在在这方面进行材料、器件和应用基础的研究。现在创办了专门的国际性期刊“超晶体和微结构”。我国也为超晶格的研究设立了专门科研基金和年会。在材料制备器件制备和基础研究方面取得了不少成绩。