

半导体超晶格、微结构的研究

王 启 明

(半导体研究所所长)

—

60 年代后期,美国 Bell 实验室和 IBM 公司的华裔学者卓以和、张立纲首先提出,利用在超高真空中 ($10^{-9} \sim 10^{-11}$ 托) 分子运动的喷射效应 (自由程可达 100 厘米以上) 来进行分子尺度超薄层材料外延生长,即今天人们称之为分子束外延或 MBE (Molecular Beam Epitaxial) 技术。MBE 技术的成功,使得在各种基底材料上任意地生长出厚度为原子(或分子)尺度量级的不同元素或化合物超薄层材料成为可能,从而使半导体材料生长工程进入了微观加工阶段,它将导致半导体学科的研究发展出现“质”的飞跃。

70 年代初,在 IBM 公司工作的诺贝尔奖金获得者江琦与合作者华裔学者朱兆祥从理论上首次提出了超晶格的概念。所谓超晶格就是利用上述微观加工技术连续交替生长原子尺度的两种材料 A 和 B,形成 ABABAB……的夹层周期结构,于是在原有固体材料晶格周期性上又加上了一个新的周期性,其周期为天然晶格周期的几倍或几十倍。A、B 组份的两种(或两种以上)原子层厚度异构材料是超晶格材料的基础,称为微结构材料。

分子束外延的出现和超晶格概念的提出,距今虽然只有 15 年左右的历史,但已进入了非常重要的发展时期,正在揭开第三代半导体物理、材料和器件发展的新篇章,在工业发达的国家如美、日、英、法、西德等,几乎所有与半导体有关的公司和大学的实验室都在竞相进行这方面的研究发展工作,即使是在第三世界国家如印度、巴西,也有了一定的规模。

微结构材料研究的范围已经非常广泛,各种超晶格材料不下数十种。70 年代后期,人们又发展了一种用化学方法生长超晶格微结构的技术,即金属有机物气相沉积技术 (MO-CVD 技术),它将可能以更低的成本进行人造材料的批量生长。

可以认为,目前最为普遍、较为成熟的是 GaAs/AlGaAs 和 InGaAsP/InP 异质结构的生长。

超晶格、微结构的研究已经不再是纯属材料科学和基础物理的研究范围了。建立在超晶格(量子阱)和微结构基础上的许多新颖器件的研究工作日新月异。目前最大的成就可认为是在高效率、低功耗光电子器件和超高速电子器件方面。可以预见在非线性光学器件和光电子集成技术方面将出现突破。无疑它将促使新一代光通信和计算技术飞跃发展。由于二元人造超晶格微结构的出现,当今半导体学科的发展路线发生了质的变化,从以往传统的比较独立的材料科学、物理基础、分立器件、集成技术等分支领域进入了一个高度融合的新时期,这也将促进半导体科学人材素质的飞跃。

二

超晶格微结构的根本特征就是材料层很“薄”，薄到只有原子线度的量级，且人工可以随意控制。天然晶体中电子的宏观运动是三维的，当势阱很薄之后，电子将被局限在阱或面的二维平面上运动。若是二维超晶格，则被局限在一维线方向上运动，这种低维的电子运动是天然晶体中未曾有过的，因而必然带来许多新奇的人构特性。

如上所述，在超晶格微结构材料中，电子在另一个(或两个)方向上的运动受到限制，其限制尺度达到了电子德布罗意波波长或电子自由程的量级，因此在这方向上电子运动将呈现“波”和“热”的特性，微观运动的量子力学规律将突出地表现出来，人们称它为量子尺寸效应。用两种禁带宽度不同的材料组成的这种超晶格中每个单元周期的结构称为量子阱。超晶格结构就是一系列人工控制势垒高度和宽度的量子阱组成的人构材料。

早期江琦和朱兆祥提出超晶格的概念是寄希望于利用子布里渊区边界处的负微分电导 Bloch 振荡效应实现大功率微波振荡，但是这个效应必须要在高电场下才能得到强化，由于功耗太大而未能获得成功。70 年代中期 Bell 实验室 Dingle 等人在超晶格中观察到量子阱间电子的隧道共振现象，以及光吸收谱中的量子尺寸效应，从而导致了超晶格量子阱结构被用于发展光电子器件的开端。1979 年 Illinois 大学的 N.Holonyak 第一个成功地用光泵浦的方法在 AlGaAs/GaAs 量子阱结构材料中观察到受激光发射，其锐发射谱线的可调谐特性引起了人们的强烈兴趣，从而真正揭开了研究超晶格量子阱新一代光电子器件的序幕。迄今为止，超晶格量子阱材料的最引人注目的应用成就正是发生在这一高技术前沿领域。超晶格、量子阱光电子器件就其性能的优化和品种的扩大，诸如低阈值单频可调谐激光器，高效率、高速相位调制器，低功耗高速光双稳开关器件等，都已获得重大突破。无疑它将大大促进信息光电子学的飞跃发展。

为什么超晶格量子阱人构材料有如此诱人的魅力？下面对其主要的人构物性作简要介绍。

1. 电子的占据状态呈低密度台阶状分布

这是不同于天然材料的最基本的一项人构物性。前面谈到，一维量子阱中的电子沿阱壁方向的运动状态是量子化的，而在阱截面中的运动仍属天然晶体的准连续状态。因此电子在量子阱导带中的能量分布就构成了以量子化分立能量值为起点的子能带。子能带中的状态只包含了阱截面的二维运动状态，当然就比天然晶体中三维状态密度要小。恰好每个子能带电子状态密度又相等，从而形成了台阶形的状态密度分布。量子阱中电子-空穴的复合是在这些子能带中进行的。国外报道用这种量子阱材料做成的激光器，其阈值电流可低至几个毫安，并且在高达 500 千赫/秒以上的注入电流范围内一直可保持单频特性。显然，量子阱材料对于实现激光器的低功耗、可见光频段、高速度、可调谐、和单频化有很大的促进作用。

2. 激子在室温下的行为及强化了的光学非线性效应。

半导体受大于禁带能量的外部光子激发时，低能量的电子受激跃迁至高能量的导带，形成非平衡态光生载流子，它参与导电过程，称为光电导。如果激发光子的能量略低于禁带能量，那么受激跃迁的电子虽未能进入导带但却可处于禁带中特定的受激束缚态上，人们将这种处于激发态的电子-空穴对称为“激子”。激子有一定的活动半径，如果相邻激子的波函数发生交

选,它可以以一定几率在晶体内部移动,称为自由激子,这是一种“浅”激子,反之即为束缚激子,它是一种“深”激子。

激子的存在先是由理论研究预言,后来在极低温度下(4°K),才从光谱实验中得到证实。天然的 GaAs 材料基本上是各向同性的,激子的运动半径约为 280 埃,激子波交迭较明显,离化能因而较小,约 4.2 毫电子伏特,室温下几乎所有的激子都被离化了,难以观察到激子的特征行为。

超晶格量子阱中,激子沿阱壁方向的运动受到空间尺寸的限制,电子、空穴被迫更趋近于各自原有的运动轨道,沿阱壁方向激子波交迭很少,交迭只发生在阱截面上,这种激子称为低维激子(二维或一维)。低维激子的波函数呈不对称状态,随着阱宽变窄,不对称性加剧。显而易见,低维激子的束缚能显著增大,且依赖于阱宽的大小。例如当阱宽为 100 埃时,离化能为 16 毫电子伏特,已有报道人们在室温下观察到激子的存在,这为新一代激子光器件提供了非常重要的材料和物理基础。

当入射光子能量与激子能量相匹配时,会出现强化的激子共振吸收,表现出反常高的吸收系数,低维激子态密度比天然材料中激子态密度小,因而激子共振吸收呈现非常强的可饱和非线性效应,自由激子的离化时间常数仅为 1 皮秒 10^{-12} 秒量级,因此超晶格激子器件将会是一种超高速光器件。

激子光器件的最引人注目的重大成就是低功耗、超高速光双稳开关的突破,这只是最近三年内发生的事, AlGaAs/GaAs 超晶格光双稳开关的开关能量低达 10^{-12} 焦耳,速度小于皮秒。同时人们还正在发展一种以激子可饱和吸收为基础的 Q 开关锁模超高速(皮秒)激光器。

3. 电子-空穴碰撞离化率的人控增强

强电场下电子、空穴在半导体晶体中运动,不断与晶格发生碰撞,那些能量大于禁带能量的电子(或空穴)就可能从晶体原子中撞出新的电子-空穴对。这个过程是我们熟知的碰撞离化过程。半导体雪崩光电器件的发展就是建立在这一物理基础上,人们已成功地发展了一种有内部增益的雪崩光电探测器件,简称为 APD,它是高速、大容量光通信中必不可少的一种重要的光探测器件。由于晶体内部对电子、空穴的束缚力不同,因而电子、空穴的碰撞离化能力依材料而异,一般情况下电子的离化率比空穴的大。一个低噪声的优质 APD 正需要两种离化率有尽可能大的差异。硅材料正好满足这种要求,二者相差达 100 倍,所以目前硅雪崩光电二极管(Si-APD)被认为是短波长(0.85 微米)大容量光通信中最理想的灵敏检测器件。不幸的是对 1.3 微米和 1.55 微米的长波段(在这两个波长段光通信有更为优异的性能),人们找不到一种有如此差异的理想的制作 APD 的材料。

超晶格结构由人控周期的两种不同半导体材料组成,两种材料不仅禁带宽度不同,电子的亲势(导带电子脱离晶体的能量)也不同,形成周期排列的一系列势阱(或势垒)。一般情况下电子、空穴的亲势有很大差异,因而在超晶格场中电子、空穴的势阱深度可以相差悬殊。在外加电场驱动下的电子、空穴将沿着跨越势阱的相反方向运动,阱壁上的电子、空穴跨越阱区的瞬间处于“热态”,热电子(或空穴)的离化能力将显著提高,由于二者阱深的差异,两种载流子的平均离化率将被人为地显著拉开差异,这就为人们发展新一代雪崩器件提供了极为重要的材料和物理基础。

4. 能带剪裁工程

一切半导体器件几乎都是建立在内部电子-空穴对的激发和输运的基础上。而空间输运过程则发生在由半导体能带图构成的内部势垒空间中。势能空间图形几乎是由材料及掺杂情况所完全确定,它并不完全能达到优化设计的需求。MBE 和 MO-CVD 技术提供了人为控制势垒图形的可能性,例如人们通过控制组份,设计了一种漏斗状的(三角形或抛物线型)量子阱,它将大大提高注入载流子的收集效率。同时它还增强导波光的限制特性,使激光器效率大为提高,阈值电流密度也惊人地降至 70 安/厘米。这种激光器在毫安电流下即能工作,是发展光电子集成的一项有实际价值的突破。

前面谈到的超晶格 APD 有一个问题并未得到解决,即在高电场下被拉陡的超晶格周期势场,在交界处将出现尖峰阻塞势垒,使相当一部份电子滞留在阱中,不能继续参与碰撞离化过程,不但使器件量子效率降低,同时也使响应速度变慢。为此人们设计一种锯齿状超晶格结构,在高的外加电场下,势场呈阶梯状图形,从而克服了上述不足。这种结构的 APD 已被人们重视,国外实验室正在加紧研制中。

可以认为这是一种根据器件优化设计的需要改变能带图形而获得的成就,称之为能带剪接工程,显然,能带剪接工程产生的功效将是难以估量的。

通过以上对超晶格量子阱的主要人物性的了解,我们就不难理解其魅力之所在了。

三

本世纪中信息光电子学发展的最重大成就是众所周知的光纤通信工程的诞生。这也许是一种巧合,光纤通信的研究也开始于 70 年代初期。当时在英国标准电讯实验室工作的华人学者高锟博士首先将光纤的损耗降至每公里 20 分贝,使得光导纤维通信的可能性变为现实。但是光通信工程的突破性进展是由当时在美国 Bell 实验室工作的日本学者林严雄和 Pauish 博士取得的。他们发展了半导体双异质结构 AlGaAs/GaAs 激光器,首先实现了室温下连续工作。时至今日,其工作寿命已从几分钟提高至可推算为百万小时的惊人水平。经短短 15 年的努力,光纤通信已进入工程实用阶段,最为代表性的成就是美、英、法合作正在铺设的一条代号为 TAT-8 横越大西洋的光海缆通信干线,以及由美日合作正在铺设的一条代号为夏威夷-4 的横越太平洋的光海缆通信干线,它们的容量均为 560 兆比特/秒,相当于同时开通 8000 路编码电话,预计 1988 年完成。我国政府很重视光纤通信的发展,不少光纤通信工程已经建成或正在建设中,最有代表性的工程项目是正在组织铺设的“宁一汉一渝”干线。

高度信息化社会的发展要求未来的光通信具有更大的容量(如 10 千兆比特/秒)和更长的中继距离(可达 500 公里以上),同时要求系统高度稳定可靠。为达此目的就必须逐渐抛弃目前的脉码调制(PCM)通信道式,借鉴超外差接收的方式,采用调相相干通信制式,这种超大容量通信干线将与计算机联接组成智能化的光通信网络。

超大容量相干光通信对载波光源和本地光源提出极高的要求。它必须是一个单稳频、窄线宽、单偏振的优质激光器。作为本地光源还必须具备可调谐特性,响应时间必须达到接近皮秒量级,利用目前的结构材料器件是不可能达到此要求的。超晶格量子阱激光器及其高效率相位调制器的出现被认为是应运而生的产物。量子阱激光器除了前面谈到的单频发射,高速响应和低阈值电流特性外,还具有很小的温度系数,保证了激光器的频率稳定度,因而是目前

可以找到的理想载波光源。

超晶格量子阱中的激子能级在磁场中将发生 Landau 分裂, 发射频率出现向短波方向移动的现象, 其峰值能量移动的增值正比于磁场强度的平方值, 因此人们完全可以研制一种“冷”调谐激光器, 它可以保证光外差对频率高度稳定的要求。由此可见, 多功能量子阱激光器的出现对未来新一代光通信的发展, 无疑将做出很大贡献。

电子计算机发展到今天, 其运算速度可达 10 亿次, 但还满足不了“拟人”的智能化需要。一台“拟人”的智能计算机可能要求运算速度达 1000 亿次。目前建立在大规模集成电路基础上的超高速计算机由于“瓶颈”堵塞效应和通信“互连”延迟, 以及串行运算方式的限制, 运算速度的提高受到限制。当然人们正在从光电混合集成的角度来研究提高的途径。但另外一条全新的途径也正在探索中, 这就是全光逻辑运算技术的研究开发。发展这项技术的关键器件就是超高速低功耗的光双稳开关, 于是超晶格光双稳开关的出现恰似雪中送炭。基于超晶格光器件的光逻辑运算具有皮秒的速度, 同时可以互不干扰地并行处理信息, 结合高密度激光存储技术, 其惊人的超高速, 超大容量的潜力是人们梦寐以求的。

四

当今工业发达的国家如美国、日本和西欧共同体诸国非常重视半导体超晶格、微结构的研究和开发。据了解有些器件研究成果已被应用在军事工程和空间工程上。日本和西欧共同体为了保持与美国竞争实力, 采取了联合研究的方式。日本政府在 1980 年发起由 13 家大公司组成光技术联合研究所, 就是为发展这种超晶格、微结构材料和器件技术而建立的, 目前已提前完成预定任务, 正着手于 1987 年春在筑波建立第二个相类似的研究实体, 主攻目标就是为新一代超大容量光通信奠定研究基础。西欧国家早已注意到开发光技术的重要性。法国是最早发展分子束外延技术的国家之一。Varian 公司的 MBE 生长系统在国际上享有盛誉。设立在英国瓦特-爱丁堡大学的光双稳联合研究实验室是颇有成就的研究实体, 他们预言将在 1990 年做出全光运行的计算机模型样机。可以认为, 建立在超晶格、微结构基础上的新一代半导体光电子学技术的开发将是美、日、西欧技术竞争的焦点。

我国的分子束外延技术是在 70 年代中期着手建设的。中国科学院半导体所、物理所与沈阳科仪厂及院外兄弟单位合作, 经共同努力建立了国产第一批 MBE 生长设备, 目前已利用这项设备生长了 AlGaAs/GaAs 多种超晶格材料。对超晶格光学物理特性的研究工作已有相当积累并已初步研制出量子阱激光器, 现已着手研制超晶格光双稳开关。国际物理学界著名学者、中国科学院半导体所名誉所长黄昆教授很早就洞察超晶格、微结构研究潜在的巨大生命力, 近年来把自己的全部精力倾注到为发展我国第三代半导体技术科学奠定基础的工作中。在有关方面支持下, 我们正在筹建国家级超晶格、微结构开放实验室, 以吸引和集中国内优秀人才, 同时选派优秀的中青年骨干出国深造, 为这方面研究准备后继力量。清华大学、中科院半导体所、吉林大学共同主持筹建的“光电子器件集成技术”国家重点实验室也是着眼于超晶格量子阱光电子器件的研究和应用的长远目标。

超晶格概念的提出只有 15 年。从这个新兴研究领域已取得的进展和成就看, 无疑将对未来信息化社会的发展产生深远影响。不失时机地抓紧展开我国半导体超晶格、微结构的研究、开发, 无疑是在科技上赶超世界先进水平的一个非常重要的方面。