

半导体物理学发展简况

黄 昆

(中国科学院半导体研究所半导体超晶格国家重点实验室, 北京 100083)

根据今年在北京召开的第 21 届国际半导体物理会议上的总结性发言, 对当今半导体物理学的发展作了简要的介绍. 给出了对近五次半导体物理国际会议上论文的分类 (体材料性质、表面与界面、异质结和超晶格、小量子系统、杂质和缺陷及一般问题) 统计结果. 指出由均匀材料的研究向微结构材料研究转移, 代表近年主要的发展趋势. 对微结构材料研究, 具体列举了在超周期性质和空间限制效应上的研究进展, 并强调了对物理学前沿发展的重要推动作用.

Abstract

On the basis of the concluding speech delivered at the 21st International Conference on Physics of Semiconductors held this year in Beijing, the development of semiconductor physics is briefly surveyed. The distribution of the papers presented at the International Conferences on Physics of Semiconductors in recent years over six main categories (bulk properties, surfaces and interfaces, heterostructures and superlattices, small quantum structures and general problems) is presented. It is indicated that a shift of research on uniform materials to that on micro structured materials represents the main trend of recent developments. In this connection, recent progress of superperiodicity and spatial confinement effects are cited, and its important impact on basic physics development is emphasized.

对这个报告需要作一点说明. 中国物理学会常务理事会通知我, 要我在半导体物理方面作一个大会 (中国物理学会 60 周年纪念会暨 1992 年凝聚态物理学会) 报告. 我觉得很为难, 因为大会报告内容应当是很有分量的, 我实在没有条件作这样的报告. 后来我想到, 今年 (1992 年) 8 月刚在北京召开了第 21 届国际半导体物理会议, 据我所知, 是凝聚态物理方面迄今在国内举行的规模最大的国际会议, 应当算是一个有分量的题目; 又想到, 近一些年来在中国物理学会历次大会的学科性报告中, 半导体物理反映确实很少. 在这样的背景下, 我终于同意以这次国际半导体物理学会会议为背景对半导体物理发展的动态作一初浅的介绍.

可能许多同志都知道, 是由于谢希德同志在过去几年中间进行了卓有成效的争取工作, 在会议期间又出色地做了会议主席工作, 在今

物理

年 (1992 年) 8 月 10—14 日在北京顺利地召开了这次国际半导体物理会议. 当然, 还有一批同志作了大量繁重的会务工作, 会议进行的圆满成功.

我则是迫于形势, 十分勉强地担任了该会议程序委员会两名主持人之一; 另一位是张立纲先生. 他一贯热诚关心我们国内的工作, 为这次会更是作了大量的工作. 正因为他已经作了十分繁重的工作, 使我难以过分推脱, 最后只能答应, 在闭幕会上按惯例由我作一个发言. 内容一般是结合会议学术报告, 概括一下半导体物理学的发展, 其中不免发表一些个人的看法. 我今天就以这个发言为蓝本, 对近年半导体物理的发展作一简单的介绍.

为准备上述这个发言, 我对自 1984 年以来每两年一次的五次国际半导体物理会议上宣读的论文作了分类的统计. 按照这次会议对论

文的征集，共分以下六大类：

1. 体材料性质；2. 表面和界面；3. 异质结和超晶格；4. 小量子系统；5. 杂质和缺陷；6. 一般问题。我统计了每次会上所接受的六类文章各自的数目。图1表示出统计的结果，六条折线勾画出六大类论文在历次会议上的篇数，以百分比表示。

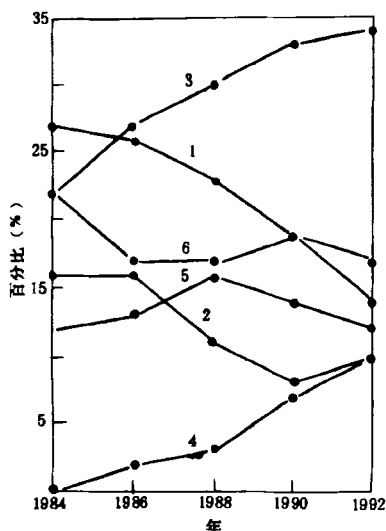


图1 1984—1992年五次国际半导体物理会议上六类论文的比例

对了解近年来的发展趋势，这张图看来很说明问题，所以我就以这张图作为发言的纲。

图1的上半部主要是第1类——体材料性质，和第3类——异质结和超晶格。非常明显的是，后者持续增长，前者逐次会议减少。第4类——小量子系统和第3类是相近的，实际上是第3类的一项前沿发展，由于其突出性质，所以另列为一类。如果把第3和第4类归在一起，可统称为微结构材料的研究，其上升趋势就更加明显和突出了。我认为，这种从均匀材料的研究向微结构材料研究的转移是近年半导体物理研究发展的一个主要特征。

近年来微结构材料研究的突出发展是由超晶格的提出和先进的材料生长加工技术的发展所推动的。其中对微结构引入了两个物理要素，即超周期性和量子限制效应。

环绕这两个物理要素，近年的研究都有显

著的发展。

图2(a)是A和B两种半导体薄层交替生长构成超晶格的示意图。A+B构成一个周期，一般远大于晶格常数，即上面所称超周期性。

图2(b)是与图2(a)对应的能带(只画出电子导带)，由于A和B的禁带隙宽窄不同，形成台阶型的导带边。在这样导带中的电子会自动陷落进窄带隙的A层，电子这样被限制在A层构成的“量子阱”内，运动发生量子化——形成分立能级和驻波式的波函数；这就是上述的量子限制效应。

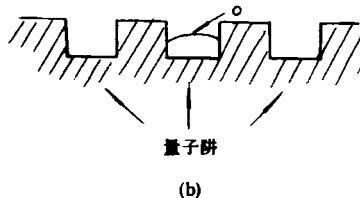
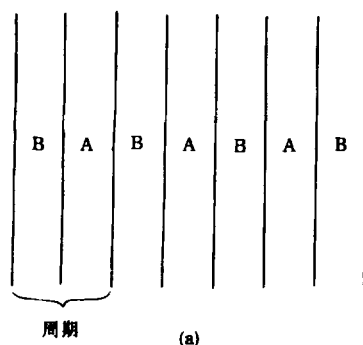


图2 超晶格和量子阱

近年环绕超周期性研究的显著进展是指所谓微带输运和 Wannier-Stark 局域化。下面略作解释。

我们知道，对电子来说，周期性的材料结构意味着形成能带，描述能带中电子动量空间的所谓布里渊区的宽窄和周期大小成反比。因此，在超晶格里应形成布里渊区很窄的能带，被称为 miniband，即微能带。

超晶格最初提出来，就着眼于实现微能带，因为预期在微能带中，在适当强电场下，电子在布里渊区中运动未经散射之前就可以达到能带上半部，成为负有效质量粒子，从而导致负的微分电阻。图3(a)中形象地表示，电子在电场

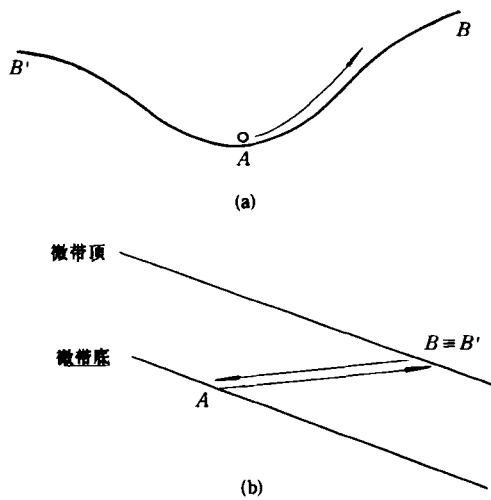


图3 k -空间和实空间的微能带

\mathcal{E} 作用下, 在 k -空间按准经典运动规律

$$\hbar \frac{dk}{dt} = -e\mathcal{E}$$

以恒定速度沿 k 运动, 由微带底移动到微带的上部.

最近几年, 实验上成功地、全面地研究了从低场到高场 miniband 的输运过程, 完全验证了理论预期的行为. 特别引人注目的是, 还证实和系统研究了在微能带中实现的 Wannier-Stark 局域化. 这是 Wannier 早在 30 多年以前所预言并曾引起争议的. 可以用图 3 的准经典模型简单说明这种局域化现象. 首先, 图 3 (a) 的动量空间 (即 k -空间, $\hbar k$ 为有效动量) 的能带图, 如不受散射的干扰, 电子将周游整个微能带, 如从带底 A 到带顶 B , 而布里渊区右端的 B 状态和左端的 B' 状态实际代表同一状态, 所以电子达带顶后将由带顶 B' 运行到带底 A , 运动将如此继续循环. 再看图 3 (b) 实空间中的能带图, 电场的作用表现在附加的静电势能 $-e\mathcal{E}x$, 使能带成为倾斜的. 由于运动中总能量守恒, 以上结合图 3 (a) 由带底 A 至带顶 B 的运动, 在图 3 (b) 中成为水平的 AB 线, 同样图 3 (a) 中由带顶 B' 至带底 A 的运动, 在图 3 (b) 对应于与 AB 重叠而相反的 $B'A$ 水平线. 因为图 3 (b) 直接表示出在实空间的运动, 可以看到, 这种在电场下的运动在空间是局域的,

物理

即限制在 A 和 B 之间区域.

以上采用的是一个粗略的准经典的描述, 可以想到, 在量子理论中这种局域化运动将对应于一个确定的量子态. 也就是说, 原来具有连续能谱的微能带在电场下将被环绕各个周期的一系列量子态所取代, 由于静电势能, 它们将对应于一系列等距的能级.

我们知道, 多年来超晶格研究主要归结为量子阱物理的研究. 近几年从低场到高场微带输运和 Wannier-Stark 效应的研究才反映了超晶格周期性的物理性质. 所以, 这代表了超晶格物理研究的一个显著进展.

但是, 近几年更重要的是在量子限制效应研究上的突出发展.

量子限制效应已是多年重点研究的问题. 如上面所讲, 多年来所谓超晶格的研究主要是研究量子阱的问题, 而量子阱问题特点就是体现了量子限制效应: 在垂直量子阱平面的方向, 电子运动被约束而量子化, 电子的自由运动限于二维平面, 运动的性质成为一个所谓准二维体系. 所以, 量子阱的特点是在一维方向上 (如 z -方向) 受限制, 电子运动成为二维的 (如 xy 面). 近年的突出发展是研究两个方向上 (如 y 和 z 方向) 受限制, 形成一维系统 (如沿 x), 和三个方向都受限制, 形成的所谓 0-维系统. 前者被称为量子线, 后者被称为量子点.

这种从二维到一维、0-维的量子限制效应, 在概念上看很简单, 在具体理论处理上就繁杂得多, 而具体实现这样的结构则是最大的困难. 近几年国际上采用最先进的材料生长手段和各种亚微米以至纳米级的超微加工技术, 尝试了许多不同方案来制作量子线和量子点结构. 但是, 迄今各种方案的结果都存在局限性, 研究工作还是初步的, 主要限于检验工艺和结构, 如通过能级验证量子限制效应, 以复合发光效率检验工艺质量.

只有以所谓分裂栅的方法实现一维和 0-维结构比较容易, 并便于调控, 近年来用这种方法已进行了相当多的有成效的研究. 我们知道, 在所谓调制掺杂的异质结 (如 GaAs 上生长掺

了施主杂质的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层构成的异质结)中,自然形成一个电子薄层,即常说的二维电子气.分裂栅的方法就是在调制掺杂的异质结之上制作适当的电极,加负偏压后可以驱赶位于电极之下的电子,以此来实现对电子的进一步限制.最简单的就是制作有一条把电极一分为二的缝隙的电极,加负偏压可以把电子限制在电极缝隙之下的区域,成为一个量子线的结构.在这方面所取得的最突出的一项发展是以所谓 Coulomb blockade 为基础的单电子物理. Coulomb blockade 效应是指一个电子进入一个小的量子点,由于量子点极小的电容,会使负电位显著增大,足以制止另一电子进入量子点.这样,电子出入量子点就象通过旋转门一样,一次只能通过一个,通过适当电极就可以控制单个电子的出入.例如,以一定频率使电子进出一个量子点,频率乘以电子电荷就给出电流.这种对单个电子运动的控制显然是有深远意义的.

我想,微结构材料研究有一个特点,是值得指出的.这个特点就是,它的研究对象已经主要不是半导体材料本身,而是半导体以其特点与现代材料生长和加工技术相结合,构成各种微结构,其中可以产生各式各样的内涵深刻的物理过程和特殊效应,从而开拓新的研究领域.

回顾过去,获得诺贝尔奖的 PN 结隧穿和量子霍尔效应都属于这类微结构研究中的发现.看当前的发展,分数量子霍尔效应的研究仍在向深入发展,它有力地促进了所谓强关联系统研究这一重大理论物理课题的开拓.上面讲到的,量子限制效应向更低维系统的发展,显然也将是物理学发展的前沿领域.

再看图 1 的下半部第 2 类是表面和界面,第 5 类是杂质和缺陷.我认为,特点是这两方面的研究都有很长的历史,早在 30—40 年代,表面能、肖特基势垒、浅杂质态及深缺陷态就已经是受到重点研究的课题.至少可以看到有三方面的原因,这两方面的研究有很长的历史并可以预期今后必将持续发展下去.一是实际半导体总是外有表面或界面为界,内有不可避免,甚至有意引入的杂质、缺陷.二是它们对无论是半

导体材料的生长和加工,或半导体内发生的物理过程,都有重要的以至决定性的作用.三是实践表明,它们的物理问题往往具有很复杂的性质,例如下面要说的 DX 中心、EL2 中心以及肖特基势垒的机理都是虽经长期重点研究迄今仍是在争议中的问题.

在这次会议上,表面界面方面最显著有意思的工作多数是直接或间接与扫描隧道电镜的发展和有关,也反映出扫描隧道电镜的发展是多方面的.它实际上也早已超越表面研究的范围,而在很广的领域发挥着重要的作用.该次会议报告在具体课题上,除表面电子态,原子的再构,在表面上吸附原子,表面台阶,单原子层生长等的动态研究占有很显著的比例.

该次会议上杂质和缺陷的研究对象十分广泛,包括有氢、氧参与的缺陷,过渡元素,稀土元素等杂质中心.但是,被称为 DX 中心和 EL2 中心这两个已经多年重点研究的深能级中心仍占据最引人注目的地位. DX 中心是 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 中与施主密切有关的一个杂质缺陷中心; EL2 则是高纯砷化镓中在近禁带隙中心的一个深能级,它们都是呈显复杂亚稳态行为的缺陷.对它们都进行过多方面的实验研究以及十分认真的理论计算.可以说有相当分量的证据表明,它们都是在一个状态,其结构就是一个代位杂质(在 DX 中心是一个代位施主,对 EL2 是一个 Ga 的位置为 As 占据称为反位缺陷).在另一状态,代位杂质原子显著偏离格点的中心位置,与近邻的键合性质也发生质的变化.但是,该次会议上仍提出这样的理论模型所不能解释的实验结果.

值得看到的很有意思的是,表面和缺陷这两个完全不同的领域却有着致使它们的问题具有复杂性的共同物理因素,即原子结构的弛豫和再构.我想,正是在这样的背景下,适应于计算这种包含原子结构位形变化的所谓分子动力学理论计算,在会议中也是比较显著的.

第 6 类是所谓一般问题.实际上具有特殊性质的新材料研究占相当比例.从半导体发展的历史看,各种新材料的出现,如夹层的层状半

导体、非晶态半导体、半磁半导体等都不断扩大丰富了半导体材料的研究。C₆₀和多孔硅都是当前引起人们广泛兴趣，首次出现在这次会议上的新的材料。它们作为半导体材料的发展前景如何，看来还有待于进一步研究的深入。

该次会议还表明，比较传统的材料也可以成为新的研究热点。这次会上以 Ge, Si 为基础的超晶格研究报告相当多，特别是报道了成功生长出优质的在 Si 衬底上的各种成分的 Ge_xSi_{1-x} 混晶，被认为对发展光电集成器件可能是很重要的。另外会上还报道，已期望多年现在终于成功制出蓝绿色 ZnSe/ZnS 激光器，给 III-V 族材料以新的推动。

最后对我国工作的发展现况也略附几句说明。这次国际会议共接受 572 篇论文，其中我国的论文有 93 篇。我也统计了各大类论文的比例，列于下表 1。

表 1

论文类别	1	2	3	4	5	6
全会论文	18	10	34	10	12	14
我国论文	14	10	38	6	12	18

这些数字大体可以表明，经近十几年的努力，我国半导体物理研究已经有了相当的基础，发展也比较全面。

当然应当看到，从接受论文数量来讲，会议主办国的论文数目总会多许多。也应正视，从整体来讲在水平和先进性上存在的差距。从表 1 的一项数据中，实际上十分尖锐地表明了这一点。前面已经指出第 4 类实际代表了第 3 类的一个突出前沿发展。从表 1 看，在第 4 类，我们相差也不太多，实际上，我们分在这类的论文基本都是多孔硅的文章，严格讲不属于以亚微米、纳米结构为特征的第 4 类研究。

第一届全国农业物理技术应用研讨会在北京举行

由中国农学会和中国生物物理学会共同主办的首届全国农业物理技术应用研讨会于 1992 年 12 月 3 日至 5 日在北京农业大学举行，来自 14 个省市的农业院校、科研单位的代表共 35 人参加了这次会议。本次研讨会共收到 32 篇论文，并在会上作了充分的交流。这些论文的内容较为广泛，涉及到核技术、静电及交变电场、恒磁场及梯度磁场、微波、激光和光谱学等物理技术在农业中的应用。有些应用已取得明显的经济效益。例如，内蒙古大学静电研究室经过八年的研究和推广，用静电场处理甜菜种子，提高了甜菜的甜度，使产糖量增加约 10%，1991 年推广面积 16.2 万亩，经济效益达 536 万元，1992 年推广面积 31 万亩，预计经济效益达千万元。在这次研讨会上还对某些作物种子在磁、光、电和核辐射作用下产生变异的机制进行了初步探讨。

中国农学会高新技术专业委员会主任、中国农科院副院长沈桂芳教授、中国生物物理学会理事唐树延研究员和北京农业大学校长、学部委员石元春教授在开幕式上分别发言，对会议的召开表示热烈祝贺，对物

理高新技术在农业上的应用已取得的成绩给予了肯定和赞扬，他们希望广大农业物理工作者作进一步深入研究工作，为我国农业现代化作出贡献。

大会邀请了俄罗斯农业物理研究所卡·丽巴教授就关于前苏联农业物理研究所的发展和工作的介绍，特别对有关梯度磁场对农作物的影响作了详细的报告。唐树延研究员作了场效应生物技术在农业中应用报告，林延安副教授作了梯度磁场对农作物的影响及其机制的专题报告。

与会代表一致认识到为了将物理高新技术应用于农业，一方面要取得良好的经济效益，另一方面要深入研究机制，将物理高新技术应用于农业推向更高的层次。为了将全国从事农业物理科技工作者进一步组织起来，与会代表一致委托北京农业大学等单位筹建正式组织，并决定在 1994 年举行第二届全国农业物理技术应用研讨会。

(北京农业大学 金仲辉)