

半导体物理發展概況的介紹

黃 昆 著

高等教育出版社

半导体物理發展概况的介紹

黃 昆 著

高等教育出版社出版 北京宣武門內草廠胡同7號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第054號)

人民教育印刷廠印裝 新华書店發行

統一書號13010·683 開本787×1092¹/₁₆ 印張 1
字數22,000 印數0001—2,300 定價(8) 0.17
1959年11月第1版 1959年11月北京第1次印刷

半导体物理發展概况的介紹

黃 昆

本文目的主要在于介紹近年来国际上半导体物理的发展主要有那些方面,其大致内容和成就的水平如何;对于个别的工作,請得比較具体一些,主要还是做为典型的例子。下面把情况归为四个方面加以介紹:(1)半导体材料;(2)半导体中电子运动規律的研究;(3)其他的主要研究課題;(4)一些基础量子理論問題的概述。

(I) 半导体材料

滿足生产一般晶体管要求(电阻率 1—几十欧姆—厘米,寿命几个—几十个微秒,位錯密度低于 $10^4/[\text{厘米}^2]$)的鍺、硅单晶材料的制备技术,在几年以前已經比較成熟。近几年来,一方面制单晶的技术仍旧有不断的改进和提高(更大截面的晶体,更高的完整性和均匀性),另一方面研究工作最多集中在研究材料經過热处理过程所发生的变化。典型的例子有:把一般硅加溫到 $400—500^\circ\text{C}$ 間,冷下来,从电导来看,增加了 $10^{15}/[\text{厘米}^3]$ 以上的施主,加热到 1000°C 的高温以后,寿命往往減到微秒数量級。实验研究的典型課題有:測量在不同溫度下保持不同時間时所产生的变化;并研究生长单晶的具体条件对这种变化的影响等;研究所揭示出来的問題是极多种多样的,例如,发现位錯对变化过程可以有很大影响,它的作用可能是加速杂质扩散和提供利于杂质沉淀的地点。又如,发现由石英坩堝抽制的硅单晶含氧可以高达 $10^{18}/[\text{厘米}^3]$,并且,測量它所引起的紅外吸收带后証明氧在晶体中所处的状态在高温下发生一定的变化。有的工作提出一定的証据說明含氧量和电导率的变化、陷阱的变化之間都存在着一定的联系,也有工作指明,即使在最严格的清洁情况下,硅表面都不能避免有微量金沾污,它足以引起平常所观测到的寿命的剧烈下降。有一些研究工作証明,硅(鍺)表面敷有适当合金时,在高温下可以有效地把已进入体内的有害杂质金(銅)提取出去,使寿命恢复。

这一方面的工作和实际制做器件的技术有着极为密切的联系,因为,在器件制做过程中,材料不可避免要經過高温的处理。然而由于在晶体管技术中,发展了一定的有效方法,上述材料的变化似乎尚不是目前生产中十分严重的問題。

III 族元素鋁、鎵、銦和 V 族元素磷、砷、銻之間形成的化合物是近些年来研究最多的一类材料。这是由于它們是最接近于鍺和硅的材料,有可能用来制做类似鍺、硅的 P—N 結型器件。由于它們提供了不同的基本参数(禁帶宽度,迁移率),因此就可能做出性能为鍺、硅所不能及的器件来。制做这些化合物中,元素的提純并不能都采用区熔法,利用抽制单晶的方法,对于有很高蒸汽压的砷和磷,需要克服特殊的困难。和鍺和硅的技术比

較,要想控制这些化合物的性質,除了要解决控制外来雜質的問題外,还要解决保持严格的化学比問題。由于这些特点,在它們的制做方面也发展了其他的方法。一般說来,材料質量的控制尚未达到鍺和硅的水平,在目前的工作中,除了极少数所用材料中載流子数低到 $10^{14}/[\text{厘米}]^3$ 外,一般載流子数目在 $10^{18}/[\text{厘米}]^3$ 的数量級左右。究竟是什么雜質决定着載流子的数目,还是由于化学比的偏离决定着載流子的数目,現在往往还不能弄清楚。例如,經過最仔細提純的GaSb具有0.08欧姆-厘米的p型导电性,这是由于雜質还是由于化学的偏离并没有弄清楚。

对于这些材料的基本参数、电子和空穴迁移率、禁帶宽度,近来都已获得了大致可以肯定的数据,这主要是依靠測量各溫度下的电导和霍耳系数和測量本征吸收。利用溫差电动势率、光学和其他方法,对于一些有效質量,也作出了一定的估計。由紅外晶格的吸收的測量(所謂殘余射綫頻率),确定了在这些材料中,两种原子荷載的有效电荷大都在0.4—0.5电子电荷之間。

关于雜質方面的工作还是很有限的:已經肯定,II族元素鋅、鎘、可以替代化合物中III族元素起受主的作用;VI族元素硫、硒、碲替代V族元素起施主的作用。而IV族元素則或者替代III族元素起施主的作用。或者替代V族元素起受主的作用。我們知道,雜質的分配系数决定由熔融态結晶出来的晶体所含雜質的多少。它是提純技术中一項基本資料。然而,只对于InSb,用示踪原子法精确定过若干种雜質的分配系数,其他材料只有某些間接的估計。这些材料寿命的數值都比較短,实际达到最长的寿命是微秒的数量級,或稍高,这是否由复合中心决定,或已經是由本征的复合(直接复合)所决定,則尚未能完全肯定。

InSb和InAs都有十分高的电子迁移率;它們的电子有效質量十分小是高迁移率的一个主要的原因。由于这种特点,它們的霍耳輸出功率特別大,利用它們已經生产出将有广闊用途的所謂霍耳器件。根据这些材料的迁移率和禁帶宽度,估計GaAs可以制成兼具鍺(較高的頻率的应用)和硅(較高的使用溫度)的优点的晶体管,而且,和硅比較,它是可以达到更高效率的日光电池材料。其他一些材料,针对特殊使用的要求,也有重要的实际前途(例如,以AlSb做日光电池,InP試做晶体管,都已有一定的工作)。由于这些材料在制备上的不断改进,以及在制做P—N結上已經开展了有成效的工作,用这些材料来制晶体管似乎已不是很遙远了。另外,InSb由于禁帶很窄,对于长紅外光灵敏的材料,可以做成室溫下可使用的、灵敏范围到7微米的紅外光敏元件。

在下面将看到,在这些材料中,对于InSb的深入研究进行得最多。这显然一方面是由于它不含高蒸汽压的元素、熔点又低,所以容易制成高質量的晶体,另一方面,还由于它具有极高的迁移率,因此在性質上表現出一些新的特点。所以,集中于InSb的研究,并不是直接反映了它在实际上的重要性。

碳化硅是有可能用来做为特別高溫使用的晶体管材料。最近对于制造这种熔点极高的晶体的技术,以及对于它的基本参数的研究都有了一定的进展。它的禁帶宽度接近三个电子伏,室溫时电子迁移率最高达到 $100[\text{厘米}]^2/\text{伏}\cdot\text{秒}$ 以上。在雜質方面,肯定了硼和鋁有受主的作用,氮和磷有施主的作用。

以上材料的系統研究首先是以发展晶体管以及一般P—N結型器件的需要提出来

的。这是材料研究中工作最为集中和深入的方面；这正是反映了上述器件近期以来一直是半导体在技术中最具有重要意义的应用。

铅和 II 族元素锗、镉、汞和 VI 族元素硫、硒、碲之间的化合物包括了重要的光敏材料和发光材料，因此也发展成为半导体材料研究中很重要的一个方面。用为实际光敏材料的铅的化合物是多晶的薄膜。但是，它的半导体基本参数的确定是依靠测量和分析单晶样品。近几年来逐渐发展了能较好的控制化学比的单晶制备方法。但是，就目前看到的工作讲，一般用的人工晶体中载流子数目仍在 $10^{17}/[\text{厘米}]^3$ 之上，尚不及最好的天然方铅矿晶体（虽然，已经可以得到比天然晶体更好的人工晶体）。结合单晶工作的进展，对于这些材料的迁移率、禁带宽、积累了更多可以比较肯定的数据。对于有效质量、寿命也都进行了测量和分析。镉的化合物的一般研究情况也大致类似。但是，在这些化合物中，特别是 CdS，开展了很多关于复合中心和陷阱作用的深入研究。这是由于在这种高电阻类型的材料中，有很强的陷阱效应。这种陷阱的作用对于它们的光敏性质有着决定性的影响。汞的化合物 HgSe、HgTe 的特点是具有很高的迁移率（ $\approx 10000 [\text{厘米}]^2/\text{秒}\cdot\text{伏}$ ）。它们已经用为制做霍耳器件的材料。

制做有效的半导体温差发电和致冷器件对材料提出了特定的要求：高的迁移率和低的热导率。另外，实际要求的掺杂程度很高，约为 $10^{19}/[\text{厘米}]^3$ 。不断发展更为有效的材料是这一方面工作的特点。在 1951 年，用 ZnSb 为温差电偶的 p 型支，PbTe 为 n 型支，可以降温 35° 。1953 年发展了 Sb_2Te_3 和 Bi_2Te_3 的合金为 p 型支。1954 年又发展了 PbSe 和 PbTe 为 n 型支，这样获得降温 60° 的成果。在 1956 年后，又发展了 Bi_2Te_3 和 Bi_2Se_3 的合金为 n 型支，降温超过了 80° 。这方面进行的工作当然首先有探索材料的研究（相图，选择最适宜的合金成分等），同时，结合进行有关参数的测定，以及研究各种掺入杂质作为受主或者施主的作用。在这方面三元合金系的研究有了发展。由于理论指出，利用三元合金应当可以提高热阻，而对于电学性质影响很小。实践证明了这一论断的正确性。

和以上的材料比较起来硒是一种很老的材料，在技术上广泛使用已经近三十年。然而，由于硒在技术上的重要性、以及在结构上的复杂性（硒的链式结构），长期以来，对于它不断进行着相当数量的研究工作，如无定形的晶化过程，有关杂质在其中的作用和影响，导电性的机构，单晶硒的制做等。

由于半导体在技术上利用的方面愈来愈广，对于新技术发展的重大意义也愈来愈明显，系统和广泛地发展新半导体材料的研究近年来有重要的进展。

在发展新材料的工作中，途径最为明确的一个方向，便是以类型相同的两种已知材料为基础形成固溶体。在这一个方向上，已经探索了很多系统，而且获得了成功，例如：Ge—Si，InP—InAs，GaP—GaAs，InAs—GaAs，InSb—GaSb；ZnTe—CdTe，CdSe—CdTe，HgSe—HgTe；ZnSb—CdSb……。这样，利用合金比例的变化，就可以得到基本参数不同的系列材料，从而提供了针对使用的要求最恰当地选用材料的有利条件。举例讲，采用不同合金比例的 InP—InAs，GaP—GaAs，就可以得到禁带几乎一直由 0.4 电子伏到 2.4 电子伏的各种材料。这方面的工作也揭示出一些有意义的规律性，例如，已经发现在能带结构相似的两种材料间形成的固溶体的禁带宽度是按合金成分近似线性地改变的。这也为

发展器件提供了新的可能。

有系统地、广泛地探索半导体新材料的工作，直接涉及化学结合的性质与半导体性质之间的关系。愈来愈多的工作指出，典型的半导性是以共价键为基础的。一方面，它和强离子键构成的很大的禁带宽度（绝缘性）相区分；另一方面，它和非饱和电子结构的金属导电性相区分。另外，为了电子和空穴能自由活动于整个晶体中，典型的半导性还要求共价键必须连续地贯通整个晶体，从而就和具有绝缘性的分子晶体相区分开来。

当然，按上述概念，最单纯的典型便是锗和硅。其次便是具有类似结构的 III—V 化合物和 II—VI 化合物；前面的介绍说明，它们确实都是最重要的半导体材料。根据上述关于共价键的概念，已经在这些二元化合物的基础之上系统地发展了许多基本上类似金刚石结构的三元化合物。例如：以一个 II 族原子，一个 IV 族原子去代替 III—V 化合物中的两个 III 族原子成为 $A^{II}B^{IV}C^V$ 型的三元化合物： $ZnSiP_2$, $ZnGeP_2$, $ZnGeAs_2$, $CdGeAs_2$ 等。以一个 I 族原子，一个 III 族原子去代替 II—VI 化合物中的两个 II 族原子就得到 $A^IB^{III}C^V$ 型的三元化合物： $CuGaSe_2$, $AgInTe_2$, $AgFeSe_2$, $AgFeTe_2$ 等。这样构成的材料，不仅具有一般半导体的特点，而且有一些具有相当高的迁移率，例如： $AgFeSe_2$, $AgFeTe_2$, $CdSnAs_2$ 的迁移率都发现在 $1000[\text{厘米}]^2/\text{秒} \cdot \text{伏}$ 以上。经一定系统分析和研究的还有不少其他的体系，如 $A^{II}B^{IV}(Mg_2Sn, Mg_2Ge, Mg_2Si)$, $A_2^{III}B_2^V(In_2Te_3, Ga_2Te_3, In_2Se_3, Ga_2Te_3)$, $A^{II}B^V(ZnSb, CdSb)$ 等。它们的结合似乎都可以在共价键的基础上来分析。

在材料的探索中，还发展了一个特殊的方向，便是非晶态的半导体，或称为玻璃状半导体。在 P_2S_3 (或 Te, Se), As_2S_3 (或 Te, Se), Sb_2S_3 (或 Se, Te) 之间，以及，在 $Tl_2S(Te, Se)$ 与上述 As 和 Sb 的化合物之间，在一定的比例范围内，可以形成玻璃态的固体。它们具有各种典型的半导体特点，如电导随温度的增加而增加；n 型和 p 型导电性，光电导效应。但是做为半导体看待，它们的电阻率一般都是很高的，在 10^{10} 欧姆·厘米数量级；只有个别情况，电阻率低至 10^3 欧姆·厘米。在一定的制备条件下，其中有一些也可以转为晶体。经过转变后，电导提高很多数量级。这似乎说明，不规则的玻璃态虽然仍旧容许电子运动，然而对电子运动是极不利的。

最近有机化合物半导体性的研究和制做受到一定重视。但详情未了解，因此不做介绍。

广泛探索新材料的工作一方面可以直接提供有技术上利用价值的材料，另一方面，对于半导体化学这一学科的形成和发展也有重要的作用。而半导体化学的发展没有疑问将对于推动半导体技术的进一步发展具有极为根本的意义。

值得提到，在控制材料性质方面发展了一项系统的理论，这项工作研究的问题是，引入杂质和外界条件如何决定材料的性质。从理论上讲，这一工作是关于在离子晶体中掺入外离子的价补偿理论和蒸汽压影响半导体化合物比例的理论的进一步发展。这特别是针对着下面的问题而提出的：在宽禁带的离子性晶体中，掺入与原离子不同价的离子所引起的情况（发光材料制备中掺杂质的方法就是属于这一类型的问题）是怎样的？这一理论所概括的问题的范围很广，这里举一个简单的具体问题为例。例如，在 CdS 中掺有 Ga ，它可以引起两种不同的后果。按照离子电荷必须补偿为中性的理论，那末， Ga^{+++} 的出现将引起晶体的缺陷，例如，每出现两个 Ga^{+++} 代替 Cd^{++} ，因而，多出了两个正电单位，必

須以一个 Cd^{++} 的缺位来补偿。但是, 根据半导体物理中施主和受主的理論, Ga^{+++} 的多余电荷完全可以由一个电子来中和; 这样 Ga 的作用正是一个典型的施主。同样根据半导体物理所习用的概念, 上述离子性的补偿等于要求两个一价的施主必須由一个两价的受主所补偿。施主的电子都落于受主之上, 施主和受主都处于电离状态(Ga^{+++} 和负电性的 Cd^{++} 缺位), 它们的电荷相互补偿。究竟发生那一种情况, 实际上决定于外部条件。在硫蒸汽压高的情况就出现 Cd^{++} 缺位的情形, 在硫气压低的情形, Ga^{+++} 的电荷就由电子补偿。而在高硫压和低硫压的极端情况, Cd^{++} 和 S^{--} 的缺位的出现則首先由硫压决定, 掺入的 Ga^{+++} 的影响只是次要的。从半导体物理所习用的概念出发, 离子电荷补偿的原则可以这样理解: 施主的存在 (Ga) 特别有利于受主 (Cd^{++} 缺位) 的引入, 因为, 受主引入后, 施主电子落入受主, 意味着能量的降低, 所以从能量的观点看是特别有利的, 施主和受主能级的能量差愈大, 这一个因素的影响显然也就愈强。从这里也就引伸出来, 宽禁带的半导体容易产生施主受主互相补偿的情形, 从而限制了杂质导电性。上面所述及的理論, 便是把晶体中的电子, 杂质, 缺陷相互之間、以及与相邻(如蒸汽)的相之間的平衡关系, 以質量作用定律加以系统的概括, 并且結合着象以上所举的这种典型問題, 进行具体分析和实验的研究。

材料的研究是和测量分析的工作分不开的。电导和霍尔效应在各个温度的测量始終是最基本的方法。由于新材料不断揭示出新的特点, 测量分析的内容則是不断发展着的。例如, 高迁移率材料就给电导和霍尔效应的分析带来了新的特点; 寿命极短的材料促使人們通过新的途径来测量寿命。

(2) 半导体中电子运动规律的研究

1950 年以前, 半导体的研究都限于多晶的样品。由于发展晶体管技术的需要, 制备鍺和硅单晶体的科学迅速发展了起来。单晶体的测量揭示出电子运动的各向异性特点, 說明电子运动的规律远較以往理論中所設想的情形更为复杂。这一情况的揭露, 結合着鍺、硅的重要性以及制做高质量单晶技术所提供的条件, 推动了关于电子运动的深入研究。在这一方面的研究中, 特别是发展了各种有效的实验方法。下面分别就几个主要实验研究的方面来介绍这方面发展的情况。

迴旋共振的方法

我們知道, 所謂电子运动所显示的各向异性首先表現在它的慣性上。电子的慣性一般地不能用一个簡單的有效質量来概括; 在鍺和硅的情形都証明导带的电子沿着不同的軸有不同的有效質量。迴旋共振的方法正是最有效的揭示电子和空穴这种在慣性上的特点的办法。現在簡單地說明一下它的原理。我們知道, 一个运动的带电粒子, 如果处在一个磁場中, 那末它将在垂直于磁場的方向做圓运动。运动的圆频率与速度无关。

$$\omega = \frac{eH}{mc}$$

如果有同样频率的电磁波通过, 就会发生共振吸收的現象。設想有一定频率的电磁波通

过,那末改变磁场的强度就将在一定场强下发生对电磁波的吸收。根据以上的公式,由电磁波的频率 ω 和发生共振时的场强,就可以推出质量 m 。迴旋共振的方法正是利用这一办法检验电子与空穴在与外加磁场相垂直的方向上的惯性。用不同方向的磁场进行实验,就可以得到关于它们惯性的全面情况。

进行这样的实验要求很严格的条件。平常电子和空穴都经常受到碰撞。必须使碰撞的间隔比迴旋运动周期长才能基本上保证了迴旋运动不受严重破坏。所以,实际上,关于锗、硅的实验都是在液体氮的温度下进行的,以减少碰撞。所选的频率是在微波的范围,用微波技术测量吸收。实验还要求载流子数目不能太多($\leq 10^{14}$ /[厘米] 3),否则将产生屏蔽的效果。

在InSb中,由于导带电子有效质量很小,因此在几万高斯的磁场中,共振频率已经提到几十个微米的长红外范围。这样,共振吸收的测量就可以采用一般红外晶体特性吸收的实验方法。而且,由于频率的提高,在室温下碰撞尚不至破坏迴旋运动。已有人用高达30万高斯的脉冲磁场对InSb, InAs作了红外迴旋共振的测量。

虽然,迴旋共振的方法在全面地明确地揭示电子和空穴的惯性上有很大的优越性;然而在电子和空穴运动的深入研究上起了很大的推动作用。但是,由于这样的实验对材料所提出的要求很严格,用这种方法测过的材料到目前还只限于极少的几种(除去锗、硅、InSb、InAs外,还只看见提到CdS)。另一方面,这种方法,就所解决的问题讲,也只是限于确定在导带底和满带顶的电子惯性。

光学吸收的方法

过去光学吸收的方法长期以来主要只是用于测量禁带的宽度。在深入研究电子运动的发展过程中,光学吸收的方法得到了很大的发展。和迴旋共振方法对比,光学吸收的方法在研究的问题上范围更广泛得多,在适用的条件上,也要宽得多。

我们知道,早在揭示锗的满带结构上,光吸收的实验就曾提供了重要的实验根据。对于确立满带顶是由几个简并带组成并由于自旋—轨道的耦合而分裂出一个带,光学吸收方法提供了特别直接的证据。如图1所示,吸收光谱在 $3.4\mu(1-3)$, $4.7\mu(2-3)$ 和 20μ

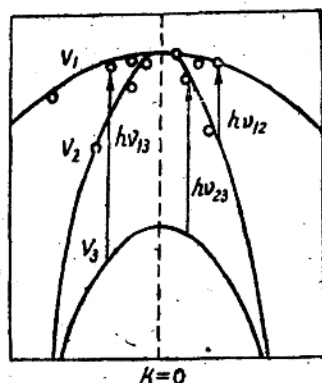


图 1.

(1-2)的吸收带,直接对应于几个带之间的跃迁。在硅中,由于核电荷小得多,自旋—轨道耦合弱得多,估计带的分裂只有锗的 $\frac{1}{10}$,最近才有报导观测到类似的吸收。近两年来,在研究一些III—V化合物的满带结构上,类似的光学吸收现象已开始提供有重要性的资料。由于III—V化合物和锗的结构在对称性上的差异,最上面的重空穴带有可能产生分裂,使带顶并不在 $\vec{k}=0$ 。例如,最近在关于InAs轻—重穴带间吸收(1-2)的测量的分析中,提供了一定根据,说明满带顶不在 $\vec{k}=0$,但离它很近,能量只比在 $\vec{k}=0$ 处高千分之几个电子伏。

另外,在激发电子由满带至导带的本征吸收中,一项重要的发展是确立了所谓间接跃迁实际上是可以发生的。而且,在锗、硅的情形,由于导带底不在 $\vec{k}=0$,本征吸收限附近

的吸收正是由于间接的跃迁(如图 2 所示)。由于间接吸收是一个同时涉及与晶格声子和与电磁波作用的二级过程,所以吸收效果弱,从而提供了在实验中与直接吸收相区分的条件。这样,由吸收系数的变化可以确定直接吸收限 E_g' , 如图 3 示意地表示出。直接吸收的确定,就如满带分裂的带间吸收的测定一样,鲜明地说明,吸收的方法在能带结构的系统了解上(即不仅限于带的底和顶附近)是特别有意义的。实际上,关于间接和直接吸收的概念已经成为一般由本征吸收推断能带结构的重要指导。

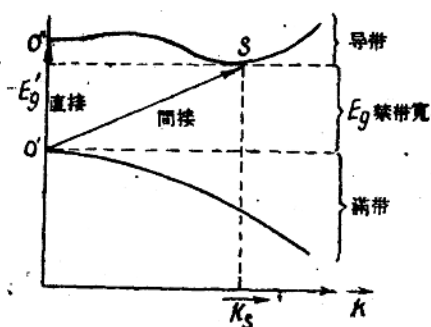


图 2.

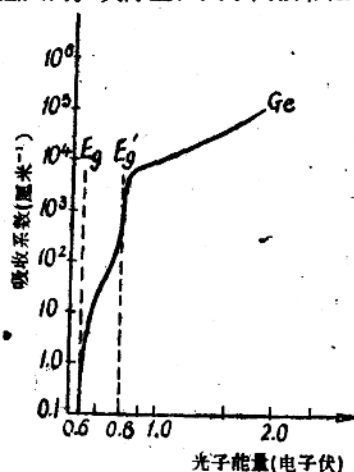


图 3.

在光吸收方面最近揭示一项效应是与迴旋共振直接相联系着的。当在强磁场中,载流子能够在垂直磁场的方向上做周期性的闭合运动时,按照量子力学的规律,运动是量子化的,能量和振子(称为朗道能级)的能量一样。

$$\hbar\omega\left(n + \frac{1}{2}\right) = \hbar\left(\frac{eH}{mc}\right)\left(\hbar + \frac{1}{2}\right).$$

这样,原来是连续的能谱就有了一定的间断性。因此,在本征吸收的边界内,吸收系数将表现出上下的起伏。而且由于最低的能量不是 0,而是所谓零点振动能:

$$\frac{1}{2} \hbar \left(\frac{eH}{mc} \right),$$

所以本征吸收限也应随磁场加强而有所提高。这些效应已在 InSb, InAs 和 Ge 中观测到。在锺的情形,有对应于间接吸收和直接吸收的朗道能级。由起伏式吸收中峰值的位置随 H 的改变,外插到 $H \rightarrow 0$ 的极限成为准确测定吸收限最好的方法。特别是在锺的情形,直接吸收限重叠在间接吸收之上,本来是难于准确地加以确定的。另外,由朗道能级还可以导出质量的数值。这样由 Ge 中直接吸收的朗道谱推出了在 $\vec{k}=0$ 处导带电子的质量为 $0.4m_0$ 。(注意不在平常的导带底!)

上述光学的吸收都是由于电子在不同能带之间的跃迁。但是,半导体因为有导电性,所以象一般的导体介质一样还有折射和吸收作用,这是由于载流子在电场中加速,一方面吸收能量、一方面产生电位移(极化)。这种效果常用一个复数的电介常数描述(光学常数)。它可以通过薄膜透射和反射来测定。近年来的实验证明,在本征吸收的长波方面,在几个到十几个微米的红外范围,有上述由载流子加速运动所决定的吸收。这种吸收发

現和波長的平方成正比。簡單的分析證明，這正說明，載流子基本上是在光波中電場的作用下周期性地運動，只在許多周期中才受一次碰撞。當然這樣的運動主要只決定於載流子的慣性，由於這個緣故，在這個光譜範圍內光學常數的測定可以直接地確定有效質量。例如，最近，對 n 型和 p 型的 Ge , Si , InSb , InAs 都做了比較精確的測定。在能帶複雜的情況下，這種辦法只能確定一個有效質量的平均值。

最近還發展了法拉第效应的測量。這種效应便是指在平行磁場存在於介質中時，線性偏振光的偏振面發生轉動的現象。這種現象顯然可以看成由於介質對於左旋和右旋的圓偏振光的折射作用不同而發生。在前節所述的光譜段內，這一效应的分析是很明顯的：在圓偏振光的加速作用下，載流子做相應的圓運動，磁場對於兩種圓運動的作用相反，因此使它們的折射作用也有所不同。具體分析證明，這個效应與有效質量的平方成反比，因此對於小有效質量的情況將特別顯著，而且可以用來確定有效質量。在 InSb 中已經進行了細致的研究。

磁阻的測量

自從單晶的各向异性被揭示以來，磁阻效应（在磁場中電阻的改變）的研究有了很大的發展。這一方面是由於磁阻可以最直接地揭示出電子運動的各向异性。例如，在各向同性的情形，與電流平行的磁場不能改變電流的情況，所以，這種所謂縱向磁阻效应的實際存在就足以說明各向异性。另一方面，磁阻的測量也可以說是電阻測量方法在深入研究半導體性質的要求下繼電導和霍耳效应之後的最自然的發展。由於對立方晶體來說來各個方向的磁阻測量共可以提供三個獨立的參數（例如，電流在 (110) 方向的縱向磁阻，和在 $[100]$, $[001]$ 方向的橫向磁阻），因此，它的內容也是格外豐富的。

雖然說，磁阻的研究收到了一定的成果，然而到目前為止，以磁阻研究在解決問題上的積極成果和所進行的大量工作比較，則是不很大的。在 n 型， p 型 Ge 和 Si 上面，磁阻一般地起了印証由其他方法所獲知的能帶結構的作用。在一些 III—V 族化合物上，由縱向磁阻很小的事實，證明導帶和滿帶至少都很接近各向同性。另一方面，磁阻測量不同於迴旋共振，它實際可以在各種溫度下進行，並且從而提供了一定的証據說明，能帶的各向异性很可能隨溫度的變化而有較顯著的變化。磁阻的研究未能取得更大的具體成果的主要原因是它不僅與能帶結構有關，而且，密切地倚賴於載流子散射（碰撞）的細致規律（如自由程和能量的關係，散射几率對方向的依賴性等）。這不但使磁阻的分析相當複雜，而更主要的是：遷移率的測量早已揭示目前關於散射的理論向和實際有很顯著的分歧之處，這樣就使磁阻的分析缺乏一個可靠的基礎。可以說，磁阻工作的一項供獻正在於更為廣泛地和尖銳地揭示目前散射理論之不足，從而促使其改進。最近在 n 型 Ge 方面就取得了一定進展。

研究電子在能帶中運動的問題時還發展了許多其他的方法。

例如：測量載流子對逆磁化率的供獻（這可提供一定的對有效質量的平均值），測量和分析強磁場中霍耳系數和磁阻的變化（但這方面的分析引入比磁阻更為複雜的問題）。在強磁場致使電子運動量子化的條件下，可以觀測到磁阻和霍耳系數隨磁場強改變而起伏的效应，從這裡可以提供對有效質量的數據。彈性形變對電導的影響也可以提供有助於分析能帶結構和載流子散射的數據。

最近有人根据这一方面深入研究的成果,提出,有可能利用类似于 p 型 Ge, Si 的能带结构中存在着低能量的负质量粒子的特点,制成新型的放大器,适用于微波以至更高的频率。但是,它的现实性如何尚不能肯定。

(3) 其他的主要研究课题

根据所看到的工作,研究比较集中的有杂质状态、表面状态扩散和高速粒子轰击等方面。现加以分别介绍。

杂质状态的研究

杂质对于半导体材料的性质起着决定性的作用,所以在一般的材料研究中,都在一定程度上研究了杂质的作用。这在介绍材料工作时,已有所说明。在一般的材料工作中,主要是研究杂质作为施主和受主的作用。这是介绍有关杂质(和缺陷)中电子状态的一些深入的研究;工作主要集中在锗和硅。

我们知道,锗和硅的电导主要是由一些束缚作用很弱的施主和受主来决定。就现在所知道的情形,除 III, V 族的元素外,只有锂在锗、硅内形成这种“浅能级”。按照类氢能级的概念,杂质的束缚作用可以看作是一个点电荷 $\pm e$ 的作用。因此,不同的施主杂质(或受主杂质)在同一材料中应有相同的束缚能。然而,随着低温电学测量的发展,揭示出来不同杂质的束缚能并不完全相同。特别是在硅材料中,不同受主的电离能有很大的差别,由 0.04 电子伏一直到 0.15 电子伏。在硅的情形,还在 40 微米的红外范围内观测到杂质态的线状吸收谱,证实了上述电学测量的结果(锗中相应的吸收谱线在 100 微米以外,到最近才有观测的报导)。这说明,杂质原子本身的场起着不可忽视的作用。实际观测的束缚能比根据类氢能级理论估计的值更高。这说明杂质本身的场对电子(空穴)有着更强的束缚作用,从而也可以知道,电子(空穴)比理论中所设想的更多集中在杂质原子的附近。

在 n 型硅的情形,有人用波谱学的方法更为深入地揭示出束缚电子的具体情况。我们知道,电子自旋共振的方法是测量电子自旋在磁场中反向时对于微波的吸收,由吸收线可以确定两个相反的自旋态间能量之差。由于除去电子和磁场的相互作用外,电子和核磁矩间存在相互作用能,它与电子在核处的几率成比例。这个附加的作用能使自旋共振吸收线显出精细结构,由表示这个相互作用的精细结构有可能导出电子在核处的几率,但是只有在电子在核处几率较大的情况下,上述相互作用能才大到可以表现为清楚分开的精细结构。实验证明,在 Si 施主电子的自旋共振精细结构中,能清楚分离的只有与施主核的相互作用;这说明,电子在施主上的几率远为最大。具体的分析指出,电子在施主上的几率比按类氢能级理论(用实验定出的有效质量)所估计的值大十倍以上。要知道电子在“轨道”各处分布几率的情况,则必须利用它的自旋和外围各硅原子核的相互作用。但由于这相互作用(和电子几率成比例)太小,不能靠一般自旋共振分辨出来。利用所谓双共振方法(即另外以射频波改变核自旋方向并以它对于电子自旋共振吸收的影响来加以检验)已提出了可能全面揭示电子在远近不同各硅核上的几率。另一方面,已经提出,有可能利用 n 型 Si 的自旋共振吸收制做微波放大器(双能级固体量子放大器)。

除去能级的能量和电子状态以外，对于它們俘获载流子的作用，以及它們的复合作用，也都开展过一些研究。

杂质能级研究的另一个方面是关于深能级的研究。深能级問題之所以受到重視，首先是由于实际上决定鍺、硅材料的寿命值的复合中心是一些深的能级。然而，对于深能级的复合作用的仔細研究并不多。除去鍺中重要的复合中心 Cu 和 Ni 較早就有了仔細的分析以外，在最近的工作中只看到对于 Au 在硅中的复合作用有仔細的研究，結果說明它是很强的复合中心，特別是在 p 型硅中。另外，有了一定的証据說明，Fe 在硅中具有和在鍺中 Cu、Ni 那样强的复合作用。

深能级研究中揭示出来的最显著的一项結果，便是許多元素在鍺和硅中形成多重能级，也就是說，它們能够依次接受若干个电子，对应于在禁带中愈来愈高的能级。这方面研究的开展首先依靠精細的杂质补偿工作，例如在鍺中掺入 Au ($\sim 10^{14}/\text{厘米}^3$)，如果同时还掺入施主，数目又少于 Au，就可以研究 Au 的第一个受主能级。如果施主多于 Au，便每个 Au 都首先已有一个电子，这就提供了研究 Au 第二个受主能级的条件，如果施主多于 Au 的两倍，就显示出来第三个受主能级的作用。确定这些能级的方法主要还是依靠各温度的电学测量。除去对电子的热激发进行分析外，还可以由散射效果提供有关带电性的資料。此外，还利用了紅外光激发能级中电子产生光电导来帮助确定能级的位置（杂质激发的光电导还有可能被用来做远紅外探测器件）。在鍺中証明，二价的元素 Cd 和 Zn 都可以接受两个电子，一价的 Cu, Ag, Au 都可以接受三个电子。这里特別显示出深能级和形成共价键的密切联系——所接受的电子数恰好等于和四个近邻都形成共价键所需的数目。在硅中，虽然也有多重能级，然而一般講，形成的能级重次較少。

位錯是在材料研究中提得十分多的問題。它的某些作用，例如，对于热处理中材料性質变化的影响，对于杂质扩散的影响，对于制做合金型 P-N 結的影响，都已得到肯定。然而，把位錯当作一种缺陷状态来細致分析的工作还不是很多。綜合看到的工作，似乎可以用下列粗略的图象概括位錯的状态：位錯每单位长度大致相当于 10^7 个受主，当做同样多的复合中心看，在鍺中的复合作用类似于 Cu，在硅里面作用可能还更强一些。我們知道，平常材料的質量規格要求位錯密度不超过 $10^4/\text{厘米}^2$ 。按照上述这一个数目应相当于 $10^7 \times 10^4 = 10^{11}/\text{厘米}^3$ 个复合中心。我們知道，强复合中心的数目确实也是在这个数量级，就可以不严重影响寿命。

表面状态的研究

几年以前已經肯定，在鍺、硅表面有氧化层存在。层外和层內都有表面能级。外面能级数目很多，对于外电场有很强的屏蔽作用。但是，屏蔽作用具体講是要靠能级中电荷的积累，这只能依靠通过氧化层和半导体内部交换电子的緩慢过程来实现，因此屏蔽作用的发生需要較长的时间，或者說，这种对电场的反应是慢的。由于这情况，在层外的这些能级常称为慢态。氧化层內的能级可以很快地与半导体内部交换电子，所以称为快态。它們为数較少，然而表面复合主要是通过些快态进行的。

最近的工作肯定了这个模型，并在快态的研究上，提供了更为具体的了解。在这些工作之中，为了适应細致研究快态的需要，研究方法在以前工作的基础上又有所发展，主要有下列各种：

以交变場来改变表面势,因場的迅速变化可以避免慢态的屏蔽作用,这样就有利于在不同势垒的条件下进行对快态的研究。

在研究快态的复合作用时,更为充分地利用了光电导的方法。另外,还采用了在表面后做成P—N結,利用反向飽和电流来檢驗表面复合速度的方法。

研究工作在下列一些方面提供了比較以前更确切的了解。

在快态之中,实验証明,只有一小部分在表面复合中起着复合中心的作用。这些复合中心的密度估計为 10^{10} — 10^{11} /[厘米]²。它們的能量集中在高低不同的两个值附近,一在本征費米能級以上,一在本征費米能級以下。它們俘获空穴的几率比俘获电子的几率大。虽然,快态外面还有氧化层,但实验証明,在一般情况,外面的气氛变化对快态是有影响的。有人認為所影响的只是快态的数目,但也有人認為能量也受影响。但是,当表面經過一定气氛条件的处理形成了所謂“穩定化”的表面后,快态就不受外界气氛的影响了。

除去对鍺和硅的研究以外,也开始有工作把研究鍺和硅表面所发展的方法用来研究PbS。发现突加恒定場和用交变場都有一定的弛豫現象,因而肯定在PbS表面也有慢态,快态和氧化层存在。

扩散的研究

半导体器件和材料的制备过程,以及在使用中它們性能的变化,都密切涉及杂质在半导体內的扩散。因此,在各种主要的半导体材料(光敏材料,温差电材料,整流器材料)中都进行过許多有关杂质扩散的研究,做为分析制备工艺的依据。最标准的研究方法是利用示踪原子在各种温度下进行不同时间的扩散,借放射性测量它們随深度的分布。这样可以得到在各个温度下的扩散系数。由扩散系数随温度的变化往往可以对扩散的方式和扩散的杂质在晶格中所处的位置做出一定的推断。由于半导体的导电性对杂质很灵敏,所以,有时也可能利用电学测量的方法来檢驗扩散。

在最近的时期,发现由气态扩散施主或受主到鍺和硅中去是一种十分优越的制做P—N結的方法。由于这个緣故,由气态向鍺,硅內扩散的研究有了很大的发展。因为,P—N結的制造往往需要扩散很薄的层($\approx$ 微米),而且对杂质具体分布的形式亦要求有尽可能精确的掌握,所以扩散研究工作的内容也有了新的发展。例如,一般講,在每一个温度,不仅需要测量出扩散系数,还需要确定表面处的濃度。在方法方面,除了示踪原子的方法,还发展了很有效的电学方法。例如,把施主杂质扩散进P型材料,就在表面形成一个n型层,它的厚度可以由电学方法,或腐蝕后經显微观察的方法确定P—N結的位置来决定;再加上,在表面上以一般4探針的办法测量电导,就可以估計出表面处杂质的濃度。到目前为止,对于实际工作所用的扩散温度下,主要的施主、受主杂质在鍺和硅內的表面濃度和扩散系数都已有了—定的資料。然而,为了能够更为精确,以及更为灵活地运用扩散的技术,还不断提出許多新的課題来。例如,实际上发现,杂质在半导体內扩散的具体分布情况不仅决定于杂质在半导体內扩散的快慢,而且还决定于杂质由气相进入到固体表面內的过程。在硅的情形,一般都認為,杂质首先要参与和表面氧化层的化学反应,然后才扩散到半导体內去。另外,例如还发现,硅表面氧化的程度可以决定性地影响扩散,氧化較强的表面可以几乎完全阻止某些元素的扩散,然而对另外一些元素的扩散影响則很小。这样的現象已被用为控制扩散的一种工艺方法。总之,密切結合着发展精密的扩散工艺的

需要,提出許多需要进一步研究的問題。随着其他材料的发展,这方面的工作将不断有新的研究課題。

高速粒子轟击的影响的研究

近些年来,不断有許多的工作研究高速粒子轟击的效果。一般所用的是能量为兆电子伏数量级的电子,质子和 α 粒子,还进行过許多中子轟击的实验。

高速粒子轟击的作用主要是打乱原子的規則排列,形成缺陷,因此,很直接地影响着半导体的电学性質。所以最主要的檢驗方法,是电导和霍尔效应的測量。不同性質的粒子引起的效果大体上是相似的。例如,在轟击下,n型锗的电导首先下降,然后轉为p型。轟击p型锗时,它的电导减少而不变型;在硅的情形,无论是n型或p型,电导都减少以至逐渐接近本征的情况。

一般認為,轟击的结果使原子由格点迁入晶格的間隙,亦即形成符倫克尔缺陷。这种假設是十分自然的。但是,经过分析可以知道,在重粒子打击下,被击的原子可以得到十万电子伏以上的能量,因而有足够能量去破坏另外的格点。实验的分析也証明,这样一个被直接击中的原子可以产生4—5个缺陷。在这种情况下,估計将可能形成性質更为复杂的局部破坏。

轟击效果的研究往往集中在分析下列几个方面的問題。

轟击究竟产生怎样一些缺陷能级?电学性質的变化最直接地反应出能级的变化。一个最受到公認的假設是間隙中的原子形成施主,留下的缺位則形成受主。经过对不同电阻率的锗和硅的电导改变进行仔細的分析,証明了必須假設施主和受主都具有多重能级,并且大致确定了能级的位置。为了更好地确定能级位置,还利用了以紅外光激发杂质光电导的方法。另外还进行了缺陷对寿命影响的測量,証明它們具有和锗中Cu, Ni可以相比拟的强复合作用。由于这个緣故,寿命的測量成为最灵敏的查觉缺陷发生的方法。

另一个方面是研究缺陷形成的問題。例如,分析形成一对符倫克尔缺陷所需最低的能量是多少。一般估計出的结果都是在10—30电子伏的范围。又例如,分析一个粒子所形成缺陷的总数是多少;粒子在材料中的能量消耗和产生缺陷的数目的关系如何……。

另外一个主要研究課題是所謂恢复的問題。经过轟击所产生的变化,一般都可以在足够高的温度下,获得很大程度上的复原。恢复的作用并不一定都需高的温度。实际上为了避免同时发生恢复的作用。很多轟击实验是在液态氮的温度下进行的。例如,n型锗經轟击轉为p型后,在室温下只需要几十分鐘又会恢复到n型。仔細的实验分析証明,恢复的过程具有复杂的性質,既与材料有关,也与进行轟击的粒子性質有关。

轟击半导体的研究不仅能够明确核輻射对半导体的影响,对器件使用的研究有实际意义。由半导体研究得到的結論对于明确一般固体材料在核輻射下遭受的破坏也有很直接的指导意义;而在半导体中檢驗缺陷則是特別有利的。另一方面,虽然理論上早已明确缺陷可以和杂质一样地形成束缚能级,然而,过去的实验对这一問題并未能提供很多直接的資料。間隙原子和缺位是两种最基本形式的晶格缺陷,轟击的研究在揭示它們的电子状态和作用上提供了丰富的实验資料。

以上所介紹的几个方面并不完全。重要性和它們可以相比拟的,还有一些其他的方向,例如,电致发光的研究,CdS型光电导过程的研究等,只是限于准备的条件,本文才未

予介紹。

除去以上工作內容較廣的各个方面外,另外还有一些有显著进展的,內容較窄狹的課題。以下举一些典型的例子。

早在硅P—N結初次做出时就會发现,在击穿电流陡增的低电流段,有很显著的噪音。经过这些年来对問題的研究不断有所深入,最近两年已經对这一現象获得比較明确的了解。仔細的測量証明,击穿电流开始陡增是由于有一些时断时續的电流脉冲出現。随电流的增长,一方面电流脉冲的数目增加,另一方面,每个脉冲的时间加长,間断的时间縮短,最后成为連續的电流。到了这个电流范围,噪声便逐漸消失。另一方面,当电流达到击穿范围,发现P—N結內出現一些发光点,数目随电流而增加。結合理論分析証明,电流的脉冲是由于电子和空穴通过碰撞电离而倍加引起空間电荷使电场向某些局部区域集中而又造成更强的电离,从而引起不穩的情况,形成了所謂“微等离子区”。发光点的光譜研究証实了其中高速电子和空穴的复合发光。

激子的研究也是一个典型例子。激子是早在二十多年前由理論上首先提出的。可以这样設想激子的形成:如果在本征激发中形成的一对电子和空穴沒有完全摆脱相互的庫倫吸力則有可能形成类似氢原子的相互束縛的状态——激子。从能量看,形成激子对应于本征吸收限外的譜綫(能量<本征吸收限)。过去一些年中,在 Cu_2O 、 CdS 、 PbI_2 、 HgI_2 光譜里观察到了这样的譜綫,但結構很复杂,不能明确地根据半导体的結構做出具体的分析。最近两年在鍺光譜里面发现了激子的譜綫,不但观察到与間接吸收限相联系的譜綫(电子在导带底),而且还观察到与直接吸收限相联系的譜綫(电子在 $k=0$)。在鍺的情形有可能做很仔細的分析,这肯定将推进激子的研究。

把激子工作看成是一个較窄狹的方面,只是就它的光譜研究講。激子問題曾經从很广泛的各个方面被提出来:如在发光現象中,有人認為激子可以成为把吸收的光能傳到发光中心的重要媒介。在热傳导的研究中,有人提出,激子由高溫向低溫的扩散对热导有所供献。还有人提出激子有可能帶走复合时发生的剩余能量,因而促进复合。但是,目前这些推断还没有足够的实验来証实。

电子直接在杂质原子間运动而不通过激发就可以导电的現象,也是一个在不断研究中的課題。例如在鍺和硅之外,又在某些 III—V 化合物中肯定了这一現象的存在。另外,进一步发展了以磁化率的測量来分析电子在杂质間运动的性質,以及加入反型杂质改变杂质上电子数目以檢驗电子在杂质上运动是否受到严格相关性的限制(两电子不能同时在一个原子上)等細致研究的方法。杂质上导电的問題与另一个重要的事实有关,实际上发现某些半导体,如 PbS 、n型的 InSb 、 InAs 、 GaAs 虽然在最低温度,导带电子数仍不减少。一般認為,电子在杂质間运动表明杂质間形成了能带,如杂质能带足够宽时就和导带連接起来,因而就造成了上述“金屬化”半导体的情形。

(4) 一些基础量子理論問題的概述

与半导体理論基础直接有关的量子理論研究也曾有不少的工作,这方面的工作大部

分帶有一般固體基礎理論的性質，我們在這裡只做一个極概括的介紹。

和深入的實驗工作聯繫最密切的，同時也是最有顯著成績的是關於能帶的理論計算和分析。一方面對這樣一個極為複雜的理論計算問題發展了比較有效的計算方法，並對若干具體半導體材料的能帶利用電子計算機進行了一定的具體計算。另一方面，根據晶體對稱性的分析，提出了表征不同能帶基本特征的一些根本依據。儘管目前最精確的計算的具體結果和實際能帶的情形仍然可以有很大的出入，然而理論的結果對於由實驗結果的分析提高到對於整個能帶結構有大概的了解，有極重要的作用。另外一方面，能帶的計算實際上迫使人們從實際的原子結構出發具體導出關於半導體的性質。儘管根據能帶概念的計算有片面性，然而這樣的工作對於把原子結構和半導體性聯繫起來這一極具根本意義的研究課題終究起着促進的作用。

在澄清某些較為狹窄的問題上，量子理論的工作也有顯著的作用。例如，在分析電击穿現象的過程中，強電場下電子如何轉為“熱電子”的理論是一個重要的基礎。在明確間接吸收的現象上，量子理論的分析起了決定性的作用。當然還有許多前面述及的研究是和一定的量子理論分析不可分的，例如，淺能級的分析，強磁場下光學和電磁學性質的起伏現象，激子的分析，都是這樣的情況。

前面已經說過，散射理論是一個多方面實驗結果所提出來的尖銳問題。這方面雖然也曾有過許多工作，但目前還沒有揭示出明確的發展的途徑。

熱躍遷是在半導體現象中一個基本環節，直接涉及到陷阱和複合現象。雖然，在這方面已經發展了在形式上很完備的理論，但是因為沒有廣泛的實驗資料檢驗它的一般結論；所以它對於分析實際問題上的可靠性還不明確。在這個理論基礎上進行具體分析要求對於電子狀態有精密了解，目前這樣的要求還很難達到。在這種情況下，目前工作也是缺乏明確的進一步發展的方向。

對於激子，長期以來曾經進行過不少各式各樣的理論計算。但是，在分析和闡明實驗已經揭示出來的許多事實方面，工作則很不夠。

我們知道，極化子也是一個首先從理論上提出來的問題。簡單說，這是在電子和晶格有較強相互作用的情況下，電子的能量和運動將受到怎樣的影響的問題。當做解決一個粒子和標量場有較強耦合的典型理論課題看，確實已經做出了不少的成果。但是，到目前為止，極化子在半導體現象中究竟有怎樣的的作用，尚不明確，還沒有完全可以肯定的實驗把極化子的理論結果和實際的現象聯繫起來。

低遷移率的半導體，雜質間隙的電子導電以及熔溶態的半導體的導電都超出了過去已有的導電理論基礎。因此，有許多工作試圖為解決這一問題開辟途徑。例如，有的工作擺脫了過去把散射看作為一個微擾因素的框子，發展了普遍形式的理論；有許多工作中，相當仔細地分析了無規排列的原子所形成的能譜的特點；還有一些以比較粗糙的假設為基礎的分析，以方便能得到比較具體的結論。

另外，還有許多分散的、途徑不同的所謂“多電子理論”工作的嘗試（即擺脫了能帶論中把電子看做互不相干地在固定勢場中運動的假設），例如，以共價鍵狀態為分析問題的基礎的理論，以有多餘電子和缺少電子的原子狀態為基礎的理論等。

由於以上的介紹都是以科學問題為主，並未對實驗技術有所說明，這裡特別強調一

下，半导体物理研究的迅速和深入发展是和高度的实验技术水平分不开的。一方面制备高质量样品和多种多样材料的技术提供了研究的最根本的条件。另一方面，半导体研究的丰富内容促使在研究中最广泛地利用了各种物理实验方法；特别一些最近代的实验技术，如极低温的技术，红外光谱方法，微波技术，强磁场，高真空技术，示踪原子的方法等对于研究的深入发展起了极为重要作用。

結 語

由上面的介绍可以看到，无论是研究的材料对象，或是研究的具体问题，都说明半导体物理比之我们过去所熟悉的许多基础学科部门都更为直接和紧密地与生产技术相联系。这正是反映了在当前科学发展所达到的新阶段上先进科学和尖端技术紧密联系的一般特点；也正是由于这种特点，半导体物理才有这样迅速的成长。但是，另一方面，准备本文的过程中，特别感觉到，仅仅了解国际上具体科学工作及其成果是完全不够的。只有对它们进行批判性的评价才能使掌握的情况成为我们开展工作有效的参考。当然，只要是正确的科学结果都是可能有用的，但是，问题在于如何才能正确地，以“科学为生产服务”的原理为指导，最有成效地发展科学。按照这样的精神做批判性的估计，必须经过十分认真和全面的分析研究。在这篇很仓促准备的短文中完全没有解决这个问题。本文仅仅企图介绍一些发展的具体情况。然而，就在这上面仍旧受到了两重严重的限制：一方面半导体研究工作的面很广泛，又没有经过一个明确的批判性的分析，则内容选择不能避免有盲目性，实际上，本文是更多侧重有比较集中的系统理论成果的工作。另一方面，由于知识上的限制，虽然要求能比较全面和真实，实际上，这在很大程度上还是一个落空的希望。譬如，在本文中为了避免片面介绍自己最熟悉的工作，结果是介绍了不少自己只有一知半解的内容。

以上是为了说明，本文仅仅是一个极初步的报导，不免有许多不够确切以至错误之处；另外，还想提出，我感到，更深入的掌握发展情况必须和批判性的估计结合起来。

在修改初稿的过程中，许多同志，特别是复旦大学谢希德和方俊鑫同志，提供了很多宝贵的意见和情况。在这里特别对他们表示感谢。文中关于表面的部分则主要是由本校研究生秦国刚同志负责准备的；他的工作也使我准备全文有了较多的一些时间，特别应予感激。