

半导体会议文集

科学出版社

第
五
期

半 导 体 会 議 文 集

中国物理学会編

科 学 出 版 社

1957

半 导 体 会 議 文 集

中国物理学会編

*

科学出版社出版 (北京朝陽門大街117号)

北京市書刊出版業營業許可証出字第 061 号

北京新华印刷厂印刷

新华書店总經售

*

1957 年 10 月第 一 版

書号: 0920

1957 年 10 月第一次印刷

字數: 169,000

規格: 1-1,405

開本: 850×1168 1/32

(京) 版字: 1-1,350

印張: 8 3/4 插頁: 3

定价: (10) 道林精裝本 2.20 元
報紙平裝本 1.30 元

序 言

半导体的研究和利用是科学技术中的一个新兴的领域。直到最近十年内,科学先进的国家才以大量的而且是加速增长的人力和物力来发展这一领域。在我国内,由于科学基础薄弱,不用说,在解放之前是没有这方面的研究工作的,只是到了解放后才有少数人开始准备半导体的研究工作。但研究力量是非常薄弱的。

1953年春,中国科学院派赴苏联考察苏联科学研究概况的访苏代表团考察归来后,报告了苏联在半导体科学与技术上的巨大成就与飞躍进展的情况,使我国物理学工作者进一步认识到半导体科学技术在社会主义建设事业中的重要性,应当在国内大力推动这方面的工作。为此,中国物理学会常务理事会特决定于1955年1月底召开一次全国性的半导体物理学讨论会,并聘请陆学善、黄昆、王守武、洪朝生与湯定元等五位同志组成筹备委员会,以陆学善为召集人,进行筹备工作。嗣后,陆学善同志因健康关系需作较长时期的修养,常务理事会改聘施汝为同志为召集人。1955年中国科学院数理化学部成立,为了使半导体物理学讨论会得到学部与全国科联的直接领导,在筹备会中又分别添聘了邓稼先与沈泉林两位同志。

筹备委员会曾初步决定讨论会在1955年初举行。后因计划的变更,决定会议日期推迟到是年夏;到了夏天,全国正处在肃反运动的高潮,召集会议事实上有困难,故临时又把会议改到1956年1月30日到2月4日举行,地点在北京。会议的两次改期使筹备委员会有了更充分的时间作准备。而在这个时期里,党中央提出了向科学进军的号召,半导体事业受到极大的重视与关注,这对会议的筹备工作是一个极其重要的鼓舞。同时,从1955年夏到年底,有几

位半导体專家，如高鼎三、成众志等同志从国外归来，更使會議增添了新的內容。

會議的目的是为了引起大家对半导体的重視，以便推动国内的半导体事業。因此會議的內容着重於介紹半导体在各方面的应用及其物理原理。同时在會議期間也交換了有关今后半导体科学技术工作者的培养与半导体的制造的組織機構等意見。

这次會議虽然是物理学会主办的，但是由於會議前情况的發展，產業部門的代表和無線电、电子学方面的科学工作者都積極地参加了这次會議，因此會議的影响远远超出了物理学和物理学界的範圍。通过會議的綜合介紹性的报告，与会的代表對於半导体科学技术的最近發展有了較为全面的認識；通过在會議中所举行的座談会，代表們認識到祖国需要半导体科学与技术的迫切性以及發展这一事業的現實性。在整个會議期間，各方面的代表有了多次接触，因而加强了彼此間的联系，为今后实际工作中的合作提供了有利的条件。

这次半导体物理学討論会的召开是甚为及时的。在會議进行的时候，我国的科学家正在国务院科学规划委员会的领导下开始拟定十二年科学技术远景规划的工作。在这个规划中，半导体技术的建立被列为五十七項任务之一；半导体的科学研究与干部培养工作也提前到1956年的紧急措施範圍之內。这样，半导体物理学討論会的举行，正好为制定这项任务的规划做好准备工作。

这个“半导体会議文集”就是在这次半导体物理学討論会中所报告的各种論文的彙刊。除了几篇研究工作报告的摘要外，其余的論文都是介紹性的，系統地而又比較通俗地介紹了半导体在各个方面的应用的基本原理。这些介紹不仅可以作为半导体工作者的参考資料，还可以向一般科学工作者說明这一新領域的內容。因此中国物理学会决定刊印这本文集。

最后必須指出：半导体物理学討論会的成功与这本文集的刊

印,一方面是由於科学院与全国科联的正确领导与支持,而另一方面也因为有筹备委員同志們以及做报告的同志們的热情劳动与积极工作。在此我謹代表中国物理学会向科学院、全国科联、全体筹备委員和作报告的同志們表示由衷的感謝。

周 培 源

1957年8月

內 容 提 要

本書系彙集 1956 年 2 月中国物理学会召开的半导体討論会上所報告的論文而成。內中包括:半导体的一般介紹,半导体整流器,鍺整流器的制造問題,晶体放大器,半导体放大器的应用,半导体的光电效应,固体發光,場致發光,半导体材料,金屬間化合物等論文十篇和研究簡报五篇。

目 次

序言·····	周培源 (i)
---------	-----------

論 文

半导体的一般介紹·····	洪朝生 (1)
半导体整流器·····	王守武 (18)
鍺整流器的制造問題·····	高鼎三 (33)
晶体放大器·····	黃 昆、卓濟蒼 (49)
半导体放大器的应用·····	成众志 (95)
半导体的光电效应·····	湯定元 (103)
固体發光·····	許少鴻 (126)
場致發光·····	徐鈺塔 (149)
半导体材料·····	周光地 (167)
金屬間化合物·····	周光地 (184)

研究簡報

半导体的电子生伏特效应的理論·····	王守武 (206)
氧化亞銅整流器中形成 n 型層的可能解釋·····	曹昌祺 (207)
氧化亞銅整流器特性受拉力的影响·····	陈志全 (209)
硫化鎢單晶体中激子光譜·····	趙廣增、徐世秋、王傳珏 (211)
一种硫化鉛光敏电阻的制备及其特性·····	····· 湯定元、周帥先 (212)

半導體的一般介紹

洪 朝 生

(中国科学院应用物理研究所、北京大学物理系)

固体按照它們的电导率来分类时划分为:金屬,半导体与絕緣体。金屬与合金的室温电导率在 $10^4 \text{ 欧}^{-1} \cdot \text{厘米}^{-1}$ 以上,它的温度系数是負的,金屬的电导率大致上随温度的上昇而直線式地下降。半导体的室温电导率通常在 10^4 到 $10^{-10} \text{ 欧}^{-1} \cdot \text{厘米}^{-1}$ 的范围,它的温度系数也与金屬不同:符号是正的而絕对值又很高;半导体的电导率是随温度的增高而指数式地上昇。絕緣体的室温电导率在 $10^{-10} \text{ 欧}^{-1} \cdot \text{厘米}^{-1}$ 以下,它的温度系数也是正的,但是在通常温度下电导率总是很低的,我們不把它作为导电物体看待。金屬和絕緣体是电工装备上的主要材料,是我們早就熟悉了物質,半导体的应用和它的半导电性質的了解还是比较近的事情。大家熟知的硒和氧化亞銅整流器是在 1924 年以后才工業制造的,方鉛矿的無線电檢波器虽然使用得比較早,但是使用方法一直处於比較粗糙的地步。对半导体导电机構的了解在 1930 年以后才开始,是在量子力学的發現以后。

在第二次大战期間,硅与鍺的檢波器由於它們極小的电容,解决了真空电子管所不能解决的極高频电路中应用的問題,而使用在雷达裝置中。半导体第一次成了不可缺少的东西。对半导体的研究也就大大地扩展和深入。

到今天我們有了半导体的整流器、檢波器、放大器,因此全部無線电装备中的真空管都可以用体积極小、电能消耗極少、造价低的半导体仪器代替。我們有了在自动控制和远程控制中佔重要地

位的光電池、光敏電阻和熱敏電阻，它們的特性可以在很大範圍內變動，在蘇聯還初步利用了半導體來把熱能轉變為電能。對於這些半導體儀器的物理本質，可以說是已經基本上了解了，這些半導體的應用特點（光電、熱電、整流、放大等效應）都是直接與半導體中載流子（傳導電流的電荷）數量的控制有關的。這些問題也就是在這次會上所主要討論的。

還有許多在工業應用上佔重要地位的材料，從電導的數值及其對溫度的依賴關係來說也都屬於半導體的範圍，例如：應用在高頻交變電裝置中的、渦流耗損很低的非金屬磁性材料；各種電子管的陰極材料；具有特別高電容率的介電質；以及發光材料，日光灯，熒火屏和各種各樣的磷光體。這些材料的主要性質不是直接依賴於它們的導電機構。這次會上所討論的將只包括發光材料，因為發光的機構也與前述半導體中的光電效应有直接關係，而磷光的衰退時間更是由載流子的行動來決定。

此外還有離子導電的半導體，這也不在我們討論之列。

一、電子半導體的導電機構

我們在這裡將先介紹一下電子半導體中的導電機構，為以後的報告提供一個初步的共同基礎。我們將先討論在一個純淨半導體中電導的來源，也就是簡單介紹半導體的能帶圖形。然後再來談談雜質對導電性質的重大影響。

（一）純淨半導體的能帶圖形

1. 價電子的共有化。在原子中電子環繞着原子核作循軌運動。價電子處於最外層，它與原子核的結合最弱，運動軌道半徑最大。在未激發狀態下，價電子也仍然是束縛於原子中；只有受激後才能脫離（圖1）。

當大量的原子排列成晶體時，因為原子間距離很近，所以價電

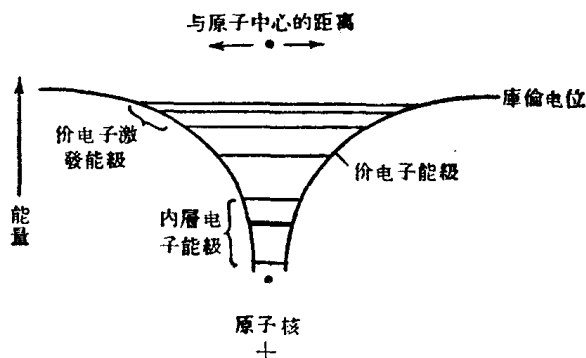


圖 1. 原子中的电子能量分佈.

子由於它較大的軌道，就不再是單只受到它原來所屬的原子的影响，而也要受到相隣原子核（及其內層电子）的強烈影响。这样的影响就使得价电子不再是分別地屬於晶体中的各个原子，而是全部价电子被整个晶体中原子所共有化。原子中內層电子因為它們的軌道較近於原子核，与原子核的結合較強；当原子接近时，它們所受到相隣原子的影响就較小，因而便仍然屬於各个个别的原子而不被共有化（圖 2）。

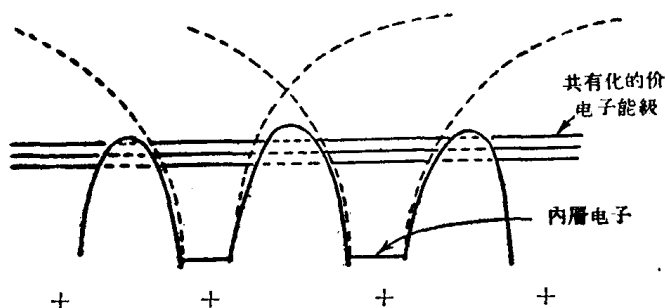


圖 2. 晶体中庫倫電位的改变(虛線——个别原子的庫倫電位;實線——全部原子的週期性電位)和改变了的电子狀況.

被共有化了的价电子可以在晶体中的各处移动，但是它們的运动要由量子力学的規律来决定，只有在一定的条件下它們才能

是“自由”的，即是可以傳遞电流的，以下就来討論这些条件。

2. 允許帶与禁帶。在独立的原子中电子的能級分佈如圖 1 所示。价电子可以处於基态的能級上，也可以处於激發态的能級上，这些能級是分立的。基态包括兩個能量上極為接近的能級，相当於价电子的兩個自旋方向。在一价原子的情形中，价电子只佔据这两个能級之一；在二价原子的情形，这两个能級由兩個价电子所佔据。

当价电子被共有化时，就發生了这样一些問題：价电子能級是否仍是分立的（基态与激發态之間有沒有一定的能量距离）？所有价电子的基态是否屬於同一能量？全部价电子的基态包括多少能級（可以容納多少电子）？

根据量子力学原理所得到的結果可以用圖 3 来表示。

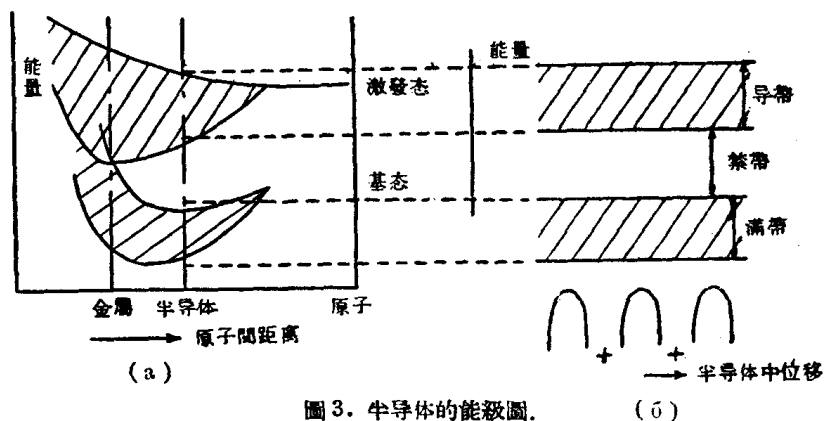


圖 3. 半导体的能級圖。

圖 3 a 表示当原子接近时，价电子的原有的能級就要因其他离子（原子核及其內層电子）对它的影响而有所改变。但是並非所有改变了的基态能級都屬於同一能量，而是分佈在一个通常約为数个电子伏的能量範圍內。在这个能量範圍內全部能級的数目是 $2N$ ， N 是晶体中原子的数目。因为 N 的数量級是 $10^{23}/\text{厘米}^3$ ，所以能級相互極為接近，可以把这些能級看成为一个連續的能帶

——允許帶。价电子可以佔据任何一个能級，但是不能有两个或两个以上的电子佔据同一能級。在通常情况下，全部价电子佔据最低的 N 个能級（一价的情形）；或佔据全部 $2N$ 个能級（二价的情形）。在均匀的半导体中，在空間上这些电子大致上是均匀地分佈的。

价电子被共有化时，激發态同样地形成允許帶。

在相当於基态的允許帶与相当於激發态的允許帶之間，可能有一个能量距离（原子間距較大的情形）（圖36），也可能这两个能帶交疊（原子間距較小的情形）。在前者的情形下，两个允許帶之間的能量范围，相当於电子所不能具有的能量，被称为禁帶。物質的导电性質与是否存在有禁帶以及禁帶的寬度有直接的关系。

3. 电导的来源；金屬与半导体、絕緣体的区别。允許帶中的 $2N$ 个能級代表以不同速度沿各个方向运动着的电子的状态；其中若有 m 个能級代表以一定速度（也就是具有一定能量）向某方向运动的电子状态，那么也就必定有 m 个代表以同样速度向反方向运动的状态。在未加电場的情况下，价电子佔据能帶中最低的一部分能級，它們在晶体內以同等机会沿着相反方向运动。因此虽然电子是不停地运动着的，但是並沒有电流發生。在外加电場的作用下，如果价电子整体的状态有了改变：就是代表电場方向运动的能級被电子更多地佔据，而代表反电場方向运动的能級較少地被电子佔据；那么就發生了电流。能不能發生这种价电子状态的改变（也就是能不能产生电流），就要看能帶中电子充滿的情况了。

在一价的金屬中， N 个价电子只充滿允許帶的一半，其他的 N 个能級是空着的，因此在外加电場的作用下，电子有充分的机会去多佔据一些以前空着的、代表反电場方向运动的能級，而把一些代表沿电場方向运动的能級騰空出来。这就是保证了金屬性电导。傳遞电流的电子——載流子——的数量是不变的；而电阻的来源則是由於晶体內离子的热振动对电子运动的阻力，这阻力是随

温度的上昇而增加的。在二价的金属中,由于允许带的交叠(禁带的消除), $2N$ 个价电子仍然不能充满能带, 因此同样保证了金属性电导。

在半导体或绝缘体中情形便是另一样。价电子刚好充满了代表基态的允许带, 称为满带或价电子带。而禁带是存在着的(代表最低的激发态的允许带称为空带或导带)。外加电场对于每个电子的作用, 只能是使它从能带中的一个能级跃迁到相邻的一个能级中去而不足把它越过禁带投掷到导带中去。因此既然电子原已佔满满带中的全部能级(代表没有电流的状态), 那么电场的作用结果只不过是这些电子互相交换它们能佔据的能级, 而电子整体的状态依然不变, 这时不发生电流。这种结论是量子力学的特殊结果, 表示晶体中的共有化的电子(它们在晶体中离子的週期性电场中运动)的运动规律是不能从经典力学的观点来推出的(经典力学中是不容许禁带的观念的)。

但是在半导体或绝缘体中并非完全没有电导。这是因为在任何温度下, 由于热运动激发的结果, 总是有一部分电子从满带跃迁到导带中去; 这些在导带中的电子只佔据导带中能级的一小部分, 因此仍有机会去佔据新的代表沿电场方向运动的能级, 因而保证了电导(图4)。

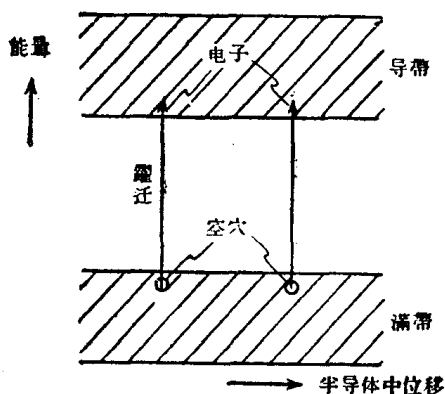


图4. 本征半导体中的电子跃迁。

了电导(图4)。电导率的大小与导带中电子的密度成正比。温度愈高, 则热激发愈强, 导带中电子密度愈大, 电导率也愈高。这关系可以大致用下式表示:

$$\sigma = Ae^{-\frac{\Delta E}{2kT}},$$

式中 σ 是电导率, A 是随温度缓慢改变的函数, ΔE 是禁

帶寬度、 k 是玻耳茲曼恆量、 T 是絕對溫度。這裡可以看出，與金屬的情形相反，電導率的改變是由於載流子密度的改變，而且溫度的改變所引起的電導率的改變是很大的。

禁帶寬度的大小對電導率的大小及其溫度系數起着主要的作用。在半导体中禁帶寬度通常在 2 電子伏以內（禁帶寬度為 1 電子伏時，室溫電導率約為千分之幾至萬分之幾歐⁻¹·厘米⁻¹）。絕緣體的禁帶寬度通常在 3—4 電子伏以上，室溫電導是很難測量出的。

4. “空穴”導電機構。當半导体中一部分電子從滿帶躍遷到導帶中去時，不單是在空帶中造成了導電的條件（由於其中有了自由電子），而且在滿帶中也造成了這種條件（由於電子不再充滿它）。在後一情形中，導電的機構雖然仍是由於電子的運動，但是性質上與在前一情形中不同。在前一情形中，空帶中的少量電子在電場的影響下的運動代表負號的空間電荷的移動（移動的空間電荷的符號可以由霍耳效應或溫差電動勢的方向的測定來決定）。在後一情形中，電子差不多充滿所有的能級，只留下少量的“自由”能級，或稱為“空穴”，“空穴”在空間的分佈代表電子的缺少（在半导体的大部分區域內，電子是不缺少的，也就是說，這些區域是中性的），因此也就代表正號的空間電荷。在電場的影響下電子的運動，取消相鄰的一個空穴，而把它原先的能級釋放出來成為一個新的空穴。這樣電子的運動就相當於“空穴”的反方向運動，也就是正號的空間電荷沿電場方向運動。實驗上可以確定這一點。

因此當電子從滿帶躍遷到導帶中去時，就發生了電子以及空穴的混合導電機構——本征導電。這時有一定數量的帶負電的電子在導帶中反電場方向運動，而相同數量的帶正電的空穴則在滿帶中沿電場方向運動。總電流是這兩部分電流的和。

混合導電機構也是量子力學的結果，在半導體的現象中佔很重要的地位。

5. 有效質量。前面已討論到根据量子力学原理, 电子在晶体中运动規律的特殊性。

这里再补充一点: 在能帶中的电子的运动情况与經典力学規律所要求的不同, 但是在导帶中的少量电子, 其运动情况与在真空中的自由电子有相似的地方。我們說, 导帶中的电子在半导体中运动时可以看作为与質量为 m_e^* 的电子在真空中运动一样。同样, 空穴的运动規律也用它的有效質量 m_h^* 来表示。

实验測定的 m_e^*/m_0 (m_0 是电子的真正質量) 約为 1 到 0.1, 而同一半导体中 m_h^* 又常較大於 m_e^* 。应当注意的是: 有效質量仅仅代表外加力与在导帶下緣的电子的平均加速度的比, 並不就是通常質量概念所表示的意义: 重力和慣性。

(二) 雜質对半导体的作用

适当类型和数量的雜質对半导体的光、电性質起着决定性的作用。如果半导体是純淨完整的晶体, 那么半导体性質的可控制性是比較有限的。在以后的几个报告中, 我們將看到使用半导体时最首先的是控制它的导电类型——电子导电或是空穴导电, 而一个純淨完整的半导体晶体的导电类型只能是电子与空穴的混合导电。适当的雜質則可以使它帶有我們所需要的导电类型。当然, 不适当的雜質也可以使半导体材料成为廢物。

适当的雜質所以对导电类型起决定性作用, 是由於它們在半导体的电子能級結構中附加一些新的性質不同的能級, 这些雜質能級位於禁帶中間, 电子在这种能級中时並非是共有化了的, 而是在雜質离子的电場範圍内运动, 因此这种能級又称为局部能級, 电子在局部能級中时並不参与导电, 要把它們激發到导帶中去后才能在电場的影响下运动(圖 5)。

雜質能級怎样發生的? 我們提出一种情形作为例子。硅是半导体, 每一个硅原子有四个价电子, 通过这些价电子与最近隣的其

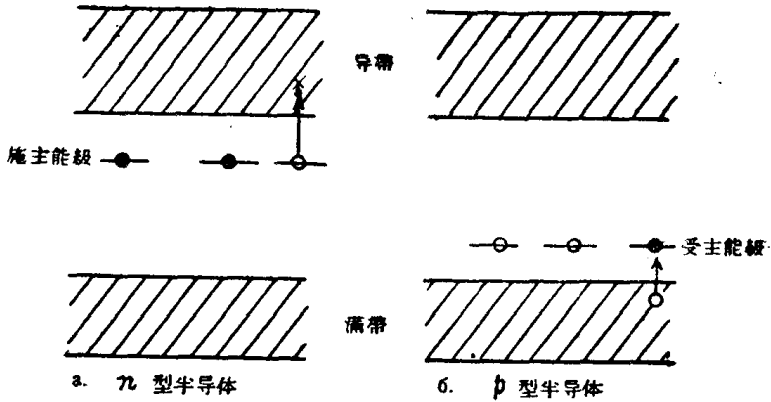


圖 5. 半导体的杂质能级图。

他四个硅原子以共价键相联系。在純淨完整的硅晶体中，这种共价键是饱和的，电子可以互换位置因而在晶体中移动，但是全部电子的状态不因这些互换而改变(圖 6 a)。在外加电场下，也不能發生电流。这就相当於前面所討論的能帶圖形中滿帶中的电子。在足够大的热运动激发下，一个电子可以脫出价键而在晶体中自由运动，它可以附着在任何一个 Si^{4+} 离子上(圖 6 b)。在外电场下也就可以傳遞电流，因此相当於导帶中的电子。相似地，缺少一个电子的价键也可以由相隣价键的电子来补足，这样就形成一个可以自由移动的空穴。在外电场下同样可以傳遞电流，相当於滿帶中

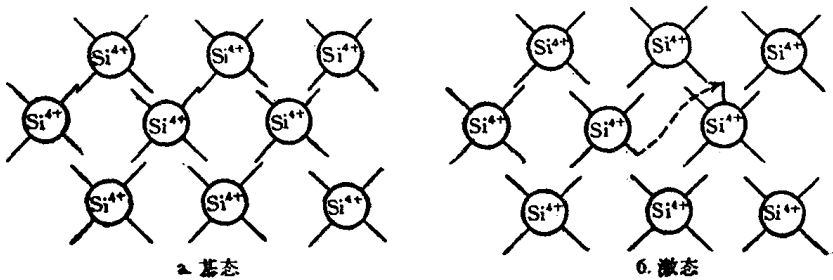


圖 6. 純淨完整的硅晶体。