半导体中的量子：以霍尔效应为例

姬　扬

（浙江大学物理学院 310027）

为了促进全球合作并应对科学与技术领域的重大挑战，2024年6月7日，联合国大会宣布，将2025年定为“国际量子科学技术年”(IYQ, International Year of Quantum Science and Technology)，由联合国教科文组织领导的这项全球性倡议将“通过各级活动来实施，旨在提高公众对量子科学及其应用重要性的认识”。

20世纪是物理学革命的时代，量子力学和相对论是物理学革命的两大成果或者说支柱，与此相关的纪念活动也是持续不断。2000年是纪念普朗克提出量子概念100周年，2005年“国际物理年”纪念爱因斯坦“奇迹年”100周年(他的5篇研究论文彻底改变了传统的物理学)，今年则是纪念海森伯发表论文《关于运动学和力学关系的量子理论重新诠释》，并以此为契机提高公众对量子科学及其应用重要性的认识。

图1　2025年是“国际量子科学技术年”，联合国教科文组织推动全世界“提高公众对量子科学及其应用重要性的认识”

有些读者可能觉得量子科学挺玄乎的，离我们的生活太远了。其实并非如此，量子科学出现在方方面面，因为现在是半导体的世界，我们的生活离不开各种各样的半导体器件，手机和计算机是最明

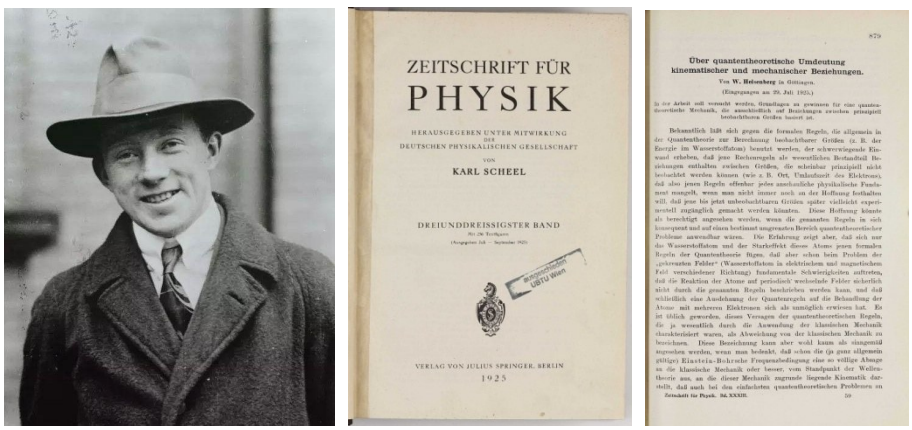

图2　1925年，海森伯(1901.12.5~1976.2.1)在《物理学杂志》(Zeitschrift für Physik)上发表了《关于运动学和力学关系的量子理论重新诠释》(Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen)，奠定了矩阵力学的基础，标志着新量子力学理论的诞生

显的代表，而我们接触(或者看不见)的电器里充满了半导体芯片，它们都离不开量子科学。半导体科技有三个相辅相成的要素，材料、器件和物理，而物理通常就是量子科学。在过去的200多年里，半导体科技的发展越来越快，半导体器件在生活中的应用越来越多，对经济的影响也越来越大，而这一切跟物理学密切相关，特别是100多年前开始的量子力学。

半导体科学开始于人类对自然界中材料的兴趣。早在1782年，伏特(A. Volta)就造了词“semicoibente”(半绝缘的)，随后翻译为英语“semiconducting”(半导电的)。在接下来的一百年里，人们通过实验观测陆续发现了半导体的一些特性，但是都没有合理的理论解释：1821年，塞贝克(T. J. Seebeck)在PbS等材料里，发现了温度差导致的电学现象(热电势)；1833年，法拉第(M. Faraday)发现了硫化银电阻率的负温度依赖特性；1834年，佩尔捷(J. Peltier)发现了电流导致了冷却(佩尔捷效应)；1873年，史密斯 (W. Smith)在体材料硒中发现光电导效应；1874年，布劳恩(F. Braun)在一些硫化物表面发现了整流效应；1876年，亚当斯(W. G. Adams)和戴伊(R. E. Day)发现了硒(Se)的光伏效应。

1879年，二年级的研究生霍尔测量了玻璃上的金薄膜的横向电势差，首次发现了我们现在所谓的霍尔效应。霍尔的发现并不是凭空出现的，而是他深入思考的结果，通过巧妙细致的实验否定了麦克斯韦在《电磁通论》中的论断：“必须认真记住，促使一个载流导体扫过磁力线而运动的机械力，不是作用在电流上而是作用在电流所通过的导体上的。”

现在我们知道，固体材料中的载流子在外加的垂直磁场中运动时，因为受到洛仑兹力的作用而使轨迹发生偏移，就会在材料两侧产生电荷积累，形成垂直于电流方向的电场，最终使载流子受到的洛仑兹力与电场力平衡，从而在两侧建立起一个稳定的电势差，即霍尔电压。

霍尔最初用的是延展性好的金(这样可以做出非常薄的薄片)，后来又研究了银、铁、锡、镍、铂、

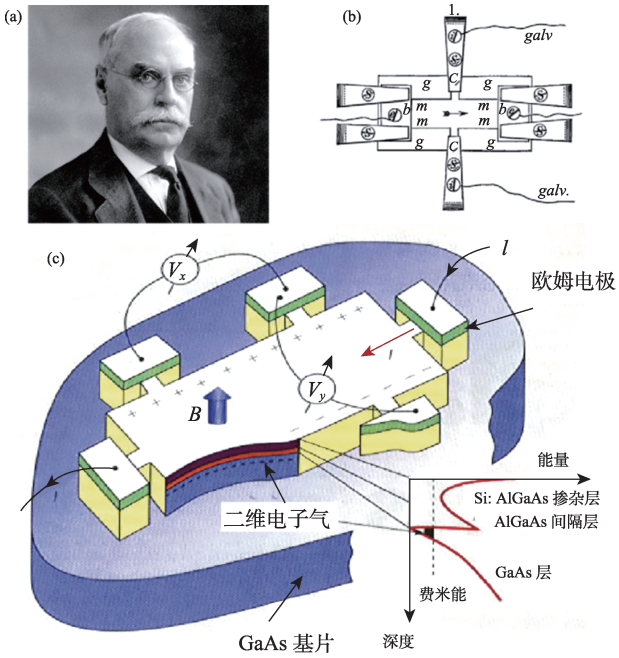

图3　霍尔(Edwin Herbert Hall, 1855.11.7~1938.11.20)(a)和他绘制的霍尔效应测量示意图(b)；现在，在GaAs/AlGaAs材料制作的二维电子气样品中(c)，不仅可以观察到霍尔效应，还可以观察到整数和分数量子霍尔效应

铜、钴、镍等金属，并在1881年发现，铁磁性材料表现出所谓的反常霍尔效应(不需要施加垂直磁场就可以表现出霍尔电压)。

需要注意的是，在霍尔做出他的发现时，还没有量子理论。甚至连原子存不存在，都是当时物理学界争论的问题，距离洛伦兹在建立经典电子论时提出洛伦兹力假设(运动电荷在磁场中受到作用力)还有16年，而汤姆逊(J.J. Thomson)发现电子则是1897年。

后来人们发现，半导体材料往往具有更大的霍尔系数(标志霍尔效应大小的参数)，但有时候会表现出相反的符号。现在我们知道，这是因为半导体材料的载流子浓度低，而且载流子可能有两种不同的类型(电子和空穴)。但是这一切都要等到量子理论建立并应用到固体材料以后才知道。尽管如此，人们已经利用霍尔效应来表征不同材料的性质了。

1925年，以海森伯发表论文《关于运动学和力学关系的量子理论重新诠释》为标志，新量子力学(矩阵力学和波动力学)很快就取得了巨大的成功，

图4　为固体的量子理论做出重要贡献的几位理论物理学家(从左到右)：布洛赫(Felix Bloch, 1905.10.23~1983.9.10)，派尔斯(Rudolf Peierls, 1907.6.5 ~ 1995.9.19)，泡利(Wolfgang Pauli, 1900.4.25 ~ 1958.12.15)，威尔逊(Alan Herries Wilson,1906.8.2 ~ 1995.9.22)

彻底改变了人们对原子世界的理解，而且这种成功很快就扩散到物理学的其他领域，比如说，固体材料的研究。

1928年，布洛赫研究了晶格里的电子的量子力学，给出了电子在周期势里的波函数，“布洛赫函数”。1929年，派尔斯利用没被占据的电子态，解释了正电荷的霍尔效应。1930年，派尔斯在泡利的建议下，第一次计算能带结构和带隙。1931年，海森伯提出了“空穴”态的理论。

1931年，英国的理论物理学家威尔逊把崭新的量子力学应用于电导的研究，提出了能带理论，解释金属、半导体和绝缘体在导电性上的差别，能隙决定了半导体的特性。泡利的名言是：“不要研究半导体，它们就是一团糟。鬼才知道半导体，到底存在不存在？”1932年，威尔逊又提出了杂质能级和缺陷能级的概念，为理解掺杂半导体的导电机理做出了重大贡献。先是在金属里，然后是半导体。他呼吁大家要关注锗，但回应是“一片沉寂、气氛非常尴尬”。人们跟他说，关注半导体这样混乱的东西，很可能会损害他作为物理学家的职业。威尔逊不理睬这些警告，在1939年推出了名著《半导体和金属》，用电子能带解释半导体的性质，包括备受怀疑的本征半导电性质。但是他也犯过错误，曾经认为“硅是一种金属”。他的学术生涯也因为研究半导体而受到损害，尽管学术很出色，却一直是助理教授。

1939年，苏联的达维多夫(A. Davydov)、英国的莫特(N. Mott)和德国的肖特基(W. Schotky)独立提出了势垒理论，解释金属-半导体接触的整流效应。1940年，塞兹(R. Seitz)出版了《现代固体理论》。至此，量子理论为固体材料的研究奠定了坚实的理论基础，并且最终导致在1947年12月，布拉顿和巴丁终于成功地发明了点接触式晶体管，标志着现代半导体科技的开端。

霍尔效应的应用日渐广泛，但是直到它被发现100周年的时候，仍然没有表现出什么特别出奇的地方，跟量子理论的联系似乎也不密切。可是当它刚刚过了百岁诞辰，突然就有了重大的实验突破，完全没有人想到的突破：实验发现了量子霍尔效应(冯·克利青，1980年)和分数量子霍尔效应(崔琦，霍斯特·施特默，阿瑟·戈萨德，1982年)。这主要是来自于半导体材料生长技术和低温强磁场下的精密测量技术的进步。罗伯特·劳克林等理论物理学家很快给出了理论解释。

整数量子霍尔效应和分数量子霍尔效应是凝聚态物理领域的里程碑式发现，不但深刻改变了人们对量子物态的理解，并且在理论和应用上产生了深远影响。整数量子霍尔效应表现出的量子化霍尔电导非常精确，不受材料缺陷或杂质影响，只依赖基本常数(电子电荷e和普朗克常数h)，从1988年起被用作国际电阻标准。分数量子霍尔效应揭示

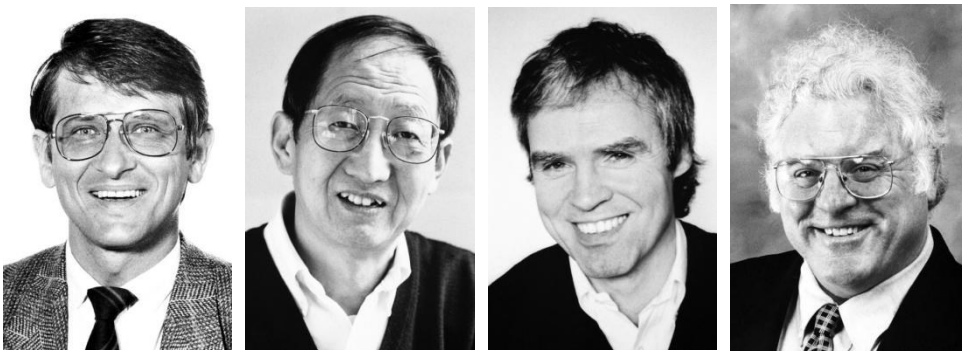

图5　克利青(左一),因为发现量子霍尔效应获得1985年诺贝尔物理学奖。崔琦(左二)和施特默(右二)因为发现分数量子霍尔效应、劳克林(右一)因为给出正确的理论解释而获得1998年诺贝尔物理学奖

了电子间的库仑相互作用导致的新量子态,挑战了单粒子物理的传统认知,并且有可能具有所谓的“分数统计”(任意子),为拓扑量子计算提供可能。

刚才说过,霍尔效应产生的原因是,载流子在垂直磁场中运动时感受到洛伦兹力,也就是说,磁场破坏了时间反演的对称性,载流子在磁场中运动就会朝一个方向偏。即使没有这个磁场,如果有某种机制使得载流子朝一个方向偏,偏移后的载流子堆积在器件的两侧,同样会建立起电压差,所以,霍尔效应并不一定需要外加磁场,不加磁场也能产生霍尔效应。前面说过,霍尔本人在发现霍尔效应的两年以后又发现,在铁磁性材料薄片中,不加磁场也能产生霍尔效应,这就是后来所谓的反常霍尔效应,可以简单地认为反常霍尔效应的原因是材料本身磁性原子或能带结构所引起的等效的内禀磁场。

内禀磁场也是磁场,有没有方法可以不用磁场就让载流子发生偏转呢?有的。任何材料中都有缺陷和杂质,它们是影响材料电导(或者说载流子迁移率)的重要因素,它们散射了电子,使得电子不再沿着原来的运动方向行进,通常我们认为这种散射不依赖于自旋,但这只是个近似。任何一个散射中心实际上都可以视为一个局域电场,电子被这个电场散射的几率实际上是依赖于电子自旋的。这是个相对论效应,可以这样来看:电磁场是不可分割的整体,它是电场还是磁场,或者是二者的混合,完全依赖于参考系的选择。在半导体晶体的静止参考系中,散射势场是个电场,但是换个参考系,换到相对于电子初始运动保持静止的惯性参考系中,就出现一个磁场,这个磁场就确定了空间中的一个特殊方向,自旋向上和自旋向下的粒子就会感受到差异,它们的散射也就有所不同,不同自旋的粒子向左右散射的几率也就有差别,所以样品两侧堆积的自旋粒子的数量就会有差别:总的来说,样品两侧并没有出现净电荷,只是在某一侧,自旋向上的粒子比自旋向下的粒子多,而在另一侧,情况正好相反。边上的粒子浓度高了,它们就会向中央扩散,这种扩散最终会抵消掉粒子散射的差异。这就是自旋霍尔效应,1971年,苏联科学家迪阿科诺夫(M. I. Dyakonov)和佩瑞尔(V. I. Perel)提出了与此相应的理论,1984年,巴昆(A. A. Bakun)等人在实验上观察到了逆自旋霍尔效应。

由于自旋散射差别引起的这种机制,要求材料中要有杂质和缺陷。到了21世纪,科学家发现,不需要杂质也能出现自旋霍尔效应。因为电子位于周期势场中,存在自旋轨道相互作用,可以导致自旋简并的能带发生劈裂,成为自旋非简并的能带。2004年,科学家们在实验中观测到了自旋霍尔效应。他们是怎么检测的呢?一种方法是利用光的偏振(克尔效应),看反射光偏振状态的变化。我们知道,光的反射过程是由材料的能级决定的,因为反射率和透射率都依赖于折射率,依赖于介电常数,而介电常数是由材料的能级分布和电子的能带

决定。另外一种方法就是利用荧光的方法，即在边缘上电子也有空穴，如果电子没有取向的话，发出的光就没有偏振，对左边测量荧光的偏振状态和右边的荧光状态进行比较，就可以了。

后来，科学家们又预言(2006年)和实验实现了(2007年)量子化的自旋霍尔效应。需要指出的是，美国著名华裔物理学家张守晟在自旋霍尔效应和量子自旋霍尔效应的理论研究方面都做出了重要贡献，还在此基础上(与其他科学家一起)开辟了拓扑绝缘体这个新兴研究领域。2013年，我国科学家薛其坤领导的研究团队实验实现了量子反常霍尔效应，这是近年来凝聚态物理学领域的重大进展，杨振宁先生评价这是“诺奖级的工作”。在实现这个重大成果的过程中，我国的实验物理学家(薛其坤、王亚愚、何珂、常翠祖，等等)和理论物理学家(方忠、戴希、翁红明、余睿，等等)都做出了有世界影响力的重要工作。

最近十年以来，各种新型的霍尔效应继续出现，轨道霍尔效应、非线性霍尔效应、三维霍尔效应、热霍尔效应、分数自旋霍尔效应，等等，让人眼花缭乱。量子力学仍然在努力推动半导体物理迅速发展，为半导体科技提供强大助力。在新量子理论诞生百年之际，半导体科技正在继续高速发展，各种各样的霍尔效应只是一个例证。

参考文献

[1] 半导体物理学，马吕斯·格伦德曼 著，姬扬 译，中国科学技术大学出版社，2022年

[2] 霍尔效应的发现，刘战存，郑余梅，大学物理，2007, 26(11), 51-55

[3] 整数、分数量子霍尔效应简介，郑厚植，半导体学报，1999, 20(1), 1-10

[4] 从反常霍尔效应到量子反常霍尔效应，余睿，翁红明，方忠，戴希，现代物理知识，2013, 25(3), 13-15

科苑快讯

可以聚集、适应和自我修复的微型机器人

科学家设计了微型机器人，它们利用声音来聚集、适应和自我修复，就像一个活的有机体一样一起工作。这一发现可能会改变医学、环境清理和机器人技术。

一个国际研究组受到蝙蝠、昆虫和鲸等动物的启发，开发了一种微型机器人模型，这种机器人利用声波移动，并在协调的大群体中协同工作，其行为几乎是智能的。这些机器人团队最终可能会承担具有挑战性的任务，比如探索灾区、清洁被污染环境或执行医疗任务。

这些可发声微型机器能够自我组织、在狭窄空间中航行，被破坏后还能重新组装。甚至还可能在体内运作，将药物直接运送到目标部位。其感知环境变化和“自我恢复”的能力，使它们即使在分离后仍保持功能，这对于探测威胁或充当高级传感器尤为有利。

研究组开发了一个计算机模型来跟踪微型机器人的运动，每个机器人都配备了一个声波发射器和一个探测器。他们发现，声波通信使机器人能够持续地协同工作，使其形状、行为适应环境，就像一群鱼或一群鸟。虽然这是计算机模拟观察到的集体智能，但是这可能会出现在任何具有相同设计的实验研究中。

此前认为，自我推进的微观生物和合成物的集体行为主要通过化学信号控制活性物质而实现。现在，首次表明声波可以作为控制微型机器人的一种手段。

研究人员认为，声波在通信方面比化学信号要好得多——声波传播得更快更远，几乎没有能量损失，而且设计更简单，机器人有效地“听到”和“找到”彼此，导致集体自我组织。

（高凌云编译自2025年10月16日SciTechDaily网站）