

半导体科学技术与诺贝尔物理学奖*

彭英才^{1,†} 傅广生² X. W. Zhao³

(1 河北大学电子信息工程学院 保定 071002)

(2 河北大学物理科学与技术学院 保定 071002)

(3 Department of Physics, Tokyo University of Science, Tokyo, Japan)

摘要 半导体科学技术是自然科学和技术领域中的一个极其重要的活跃分支,也是完美体现当代科学技术发展特点的一个突出范例.而诺贝尔物理学奖则是一种在全世界范围内最具权威性的自然科学奖励,也是获奖者所拥有的一种最高科学荣誉.半导体科学技术与诺贝尔物理学奖之间有着某些必然的关联性.揭示与探讨二者之间的这种内在联系,对于认识半导体科学技术的历史发展规律,并进而把握它的未来发展走向具有一定的现实指导意义.

关键词 半导体科学技术,诺贝尔物理学奖,内在联系,有益启示

Semiconductor science and technology, and Nobel physics prizes

PENG Ying-Cai^{1,†} FU Guang-Sheng² X. W. Zhao³

(1 College of Electronic and Informational Engineering, Hebei University, Baoding 071002, China)

(2 College of Physics science and Technology, Hebei University, Baoding 071002, China)

(3 Department of Physics, Tokyo University of Science, Tokyo, Japan)

Abstract Semiconductor science and technology (S & T) is a very active branch in the field of natural science, and is also a typical example embodying the development of advanced S & T. The Nobel prize for physics is a prize of the highest honour in the world, and there are certain relationships between this award and semiconductor S & T. We explore and analyze these inherent relationships which have practical importance for our understanding of the development of semiconductor S & T and for predicting its future.

Key words semiconductor science and technology, Nobel physics prize, inherent relations

1 引言

自从1895年瑞典化学家诺贝尔在巴黎立下遗嘱设立诺贝尔奖金,并从1901年正式执行颁奖制度以来,已经整整一个世纪了.诺贝尔奖评选制度实施的100年,恰逢物理学光辉灿烂发展的100年.作为自然科学中的三大诺贝尔奖之一的物理学奖,不仅充分展现了物理学发展的辉煌成就,而且也是许多物理学家毕生想摘取的科学桂冠.如在1901—2000年的100年中,全世界共颁发了94次诺贝尔物理学

奖,有162人获得了这项令全世界科学家为之仰慕的最高殊荣.

在物理学波澜壮阔发展的100年中,于20世纪中叶出现的半导体科学技术占有着举足轻重的地位^[1].作为它对当代自然科学发展和人类社会生活面貌改变所产生的巨大影响,其主要标志是来源于半导体科学技术的六项诺贝尔物理学奖的获得.可以说,它从一个侧面真实而客观地记录和反映了55年来半导体科学技术所走过的光辉历程.

* 2003-11-11收到初稿,2004-02-01修回

† 通讯联系人. E-mail: ycpeng2002@163.com

2 源于半导体科学技术的六项诺贝尔物理学奖

按照诺贝尔基金会的章程,对诺贝尔奖获得者来说,至少应在下述三个方面之一作出杰出贡献:第一是首创性研究,即研究成果在时间上应是重大的新发现;第二是卓越的科学成就,即研究成果在空间上是确定了某个学科的新疆界,或是奠定了某个学科和科学知识的新基石,或是构筑了科学的新大厦;第三则是巨大地造福于人类,即研究成果在物质上应是开创性的发明,能赋予整个人类以深刻的社会影响和潜在的文化和经济利益。下面我们将看到,源于半导体科学技术的六项诺贝尔奖则涵盖了上述三个方面,这充分说明了它在物理学领域,乃至整个现代科学技术发展中都扮演着一个极其重要的角色。

2.1 开辟半导体科学技术发展新纪元的晶体管的发明

在第二次世界大战结束前夕的1945年7月,美国贝尔实验成立了以肖克莱(Shockley W B)为首的固体物理小组,开始着手固体理论的基础研究,并进行新半导体器件的研制探索。这是一个集中了一批优秀物理学家的高水平研究集体,其中有理论造诣甚深的巴丁(Bardeen J)和实验技术精湛的布拉顿(Brattain W H)与皮尔森(Pearson G L)等人。他们在短短的两年多时间内,进行了一系列卓有成效的开拓性研究工作。1947年12月,当巴丁和布拉顿二人按照由巴丁本人所提出的面效应理论,对Ge半导体表面形成金属点接触结构的电子流动特性进行实验研究时,首次发现了电流放大现象,并进而试制成功了世界上第一只Ge点接触晶体管。紧接其后的1948年1月,肖克莱独立地提出了结型晶体管的新概念,之后又于1949年提出了半导体p-n结理论,并在1951年与他的合作者共同研制成功了以掺杂p-n结为有源区的首例Ge结型晶体管。由于肖克莱、巴丁和布拉顿三位科学家对晶体管发明所作出的决定性和开创性贡献,使他们共同荣获了1956年的诺贝尔物理学奖^[2]。

晶体管的发明开辟了半导体科学技术发展的新纪元。半个多世纪以来,半导体科学技术把材料、物理、器件与工艺融为一体,使四者以相互影响、促进、交叉与渗透的方式协调发展,成为完美体现当代科学技术发展新特点的一个极好范例。

2.2 具有科学里程碑意义的隧道效应、无序体系中电子的定域化效应、整数与分数量子霍尔效应的发现

隧道贯穿现象是由微观粒子波动性所导致的一个奇特结果。按照量子力学原理,如果一个势垒结构不太宽,带电粒子便有一定几率穿过这个“不可逾越”的势垒。1957年,当日本物理学家江崎(Esaki L)领导东京索尼公司的一个小组,对一个具有势垒宽度很窄(约10nm)和掺杂浓度很高(约 10^{21} 个原子/cm³)的Ge p-n结的电学特性进行研究时,成功地观测到了该p-n结所呈现的负阻特性,这就是著名的隧道效应。这一重要的科学发现开辟了研究半导体中载流子隧道贯穿输运特性的新领域,江崎本人也因此荣获了1973年的诺贝尔物理学奖。隧道效应的发现对半导体科学技术发展所产生的贡献在于,一是它对具有特殊掺杂分布p-n结二极管的正向电流-电压特性,用量子力学隧道效应从理论上作出了精辟说明。换言之,它是把非常玄妙的微观量子隧道效应,用一种很简便的实验方法观测出来了^[3]。二是它为1969年前后江崎等人首次提出“半导体超晶格”这一新概念提供了重要物理依据,同时也为深化人们对其后发展起来的半导体超晶格与量子阱中的双势垒共振隧穿、多势垒顺序共振隧穿、以及纳米半导体结构中的单电子隧穿和库仑阻塞现象的认识与研究,都奠定了十分重要的物理基础。

作为凝聚态物理学中的一个活跃前沿,非晶态半导体物理在上世纪50—70年代中获得了重大发展。研究非晶态半导体的意义不仅是在科学技术上能够获得大量的新材料和新器件,而且对于认识固体理论中的许多基本物理问题也会产生深远影响。早在1958年,固体物理学家安德森(Anderson P W)就发表了具有开创性的《扩散在一定的无规网络中消失》的著名论文,首次明确提出了无序体系中电子的定域化概念。其后,莫特(Mott N F)等人在深入的实验和理论研究基础上,又提出了迁移率边和带尾定域态的概念,从而丰富了人们对非晶态半导体能带理论的认识与理解。1972年,安德森又提出了在跳跃传导过程中电子-声子相互作用的模型,从而进一步发展了无序体系中电子的跳跃式输运特性理论。莫特与安德森由于对非晶态半导体理论研究所做出的重大贡献而荣获了1977年诺贝尔物理学奖,成为整个非晶态物理发展中的一个重要里程碑,同时也为固体物理学的发展开辟了一个新天地^[4]。

随着半导体物理研究的不断深入和低维物理研究的急速兴起,人们陆续发现半导体微结构中所具有的各种新颖物理效应.从1966年起,人们就对二维电子气在磁场下的量子输运性质进行了大量的实验和理论研究,发现磁导率随栅电压呈现出周期性的振荡特性.其后,日本的安藤恒也等人发展了二维量子输运理论,他们预言在磁导率等于零的栅压下,霍尔电阻应该等于 h/ie^2 (i 为整数).这种研究趋势预示着低维物理领域将有重大突破性进展.1980年,德国科学家冯·克利青(Klitzing K V)在低温(1.5K)和强磁场(15T)下测量金属-氧化物-半导体场效应晶体管(Si-MOSFET)反型层中二维电子气的霍尔效应时惊奇地发现:在霍尔电阻 R 随栅电压的变化曲线上出现了一系列数值为 h/ie^2 和具有一定宽度的电阻平台.与此同时,纵向电阻 R_{xx} 在相应的栅压区域内的数值也趋于零,这就是具有划时代意义的整数量子霍尔效应(IQHE)^[5].为此,在短短五年之后的1985年,冯·克利青便获得了诺贝尔物理学奖.这项工作具有深远的意义,在理论上它首先证明了量子霍尔效应的存在,并指出该效应不仅与电子填充朗道能级有关,也与缺陷等引起的局域化效应有关.在实用上,它可以用来精确测定精细结构常数 h/e^2 和作为电阻的自然基准.更进一步,人们目前正致力于交流量子霍尔效应的研究.

如果说整数量子霍尔效应是人们事先没有预期到的,那么分数量子霍尔效应(FQHE)则是完全出乎人们预料的重大科学发现.1982年,被称为半导体科学技术摇篮的美国贝尔实验室的崔琦(Tsui D)和斯托默(Stormer H L)等人,在极低的温度(55mk)和更强的磁场(20T)的实验条件下,研究具有超高电子迁移率($5 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$)调制掺杂 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 异质结的量子霍尔效应时,在霍尔电阻中发现了一个使他们非常惊奇的新台阶,它的高度是冯·克利青所发现的最大高度的三倍.随后,他们又在整数的上面和整数之间都找到了越来越多的新台阶,并且所有这些新台阶的高度都能表示为早先的同一常数 h/e^2 除以不同的分数,这些平台即为分数量子霍尔电阻平台 hp/qe^2 .其中 q 和 p 都为整数,但是 q 为奇数,这就是所谓的分数量子霍尔效应.1983年,美国科学家劳克林(Laughlin R B)采用强关联费米液体态理论成功地解释了FQHE的物理机制.1998年10月,瑞典皇家科学院宣布劳克林、斯托默和崔琦三位科学家,由于在发现分数量子霍尔效应方面所作出的杰出贡献,而获得本年度诺贝尔物理学奖.

量子霍尔效应在时隔13年内两次获得此项殊荣,不能说不是低维体系物理对当代凝聚态物理学发展所作出的重大贡献.

2.3 造福于人类文明与社会进步的集成电路的诞生

如果说1947年晶体管的发明是具有划时代意义的伟大发明,那么1958年集成电路的诞生则是具有科学里程碑意义的重大创新.晶体管问世之后的10年间,在需求牵引和技术推动的双重作用下,半导体科学技术获得了突飞猛进的发展.20世纪50年代初期,出于对电子装备的高可靠性和微小型化的要求,人们着手分立半导体器件的电路集成技术研究.美国德州仪器公司(TI)的基尔比(Kilby J S)经过一番深思熟虑之后,认为解决这一问题的出路在于使分立半导体器件全固体电路化.为此他开始了将电阻、电容等无源元件与有源器件制作在同一块半导体基片上的实验.经过大胆的探索与研究,于1958年9月在实验室完成了第一块集成电路振荡器的演示实验,这标志着集成电路从此诞生^[6].紧接着,由外延、氧化、扩散和光刻等一系列新工艺技术所确定的Si平面晶体管工艺,揭开了以Si平面器件为核心的集成电路发展的序幕.由于基尔比这一具有历史意义的创新性工作,使他荣获了2000年诺贝尔物理学奖.然而可能有人要问,集成电路从1958年诞生到2000年获奖,为什么会经历长达42年的漫长路程呢?诚然,这与整数与分数量子霍尔效应相比,它的获奖可谓姗姗来迟,或似有某些不公正之处.可能的原因之一是,当时集成电路被人们认为是一项重要的技术创新,而并非是一项重大的科学发明.但是42年来,集成电路的发展经受住了时间与空间的考验.它不仅导致了微电子技术的产生,促进了信息科学技术的发展,加速了现代科学技术的进程,而且使人们的社会生活面貌发生了天翻地覆的变化.因此,集成电路对人类文明和社会进步所产生的巨大影响和带来的巨大经济利益,使它荣获诺贝尔物理学奖则是当之无愧的.

3 由半导体科学技术获诺贝尔物理学奖所获得的有益启示

半导体科学技术的发展从上世纪50年代被确立至今,已经走过了55个春秋.与物理学中的其他许多学科分支相比,应该说是一门年轻的科学技术.然而,在半个世纪的发展进程中,已有五项重大科学

发明和科学发现获得诺贝尔物理学奖,足以证明它在现代科学技术发展中所占据的显赫地位。不难看出,半导体科学技术与诺贝尔物理学奖之间有着一定的必然联系,对此进行分析与探讨,不仅可以使我们深刻认识与理解半导体科学技术的发展规律,而且还能够使我们预见和把握它的未来发展走向,因此具有重要的现实意义。纵观半导体科学技术的发展历程,我们可以获得以下几点有益的启示。

3.1 先进理论体系的创立是产生重大科学发明的重要前提

纵览自然科学的发展使我们认识到,任何一项重大科学发明都是以长期的科学积累为基础。晶体管的发明就是一个典型的例证。它的理论基础是在20世纪30年代建立的以量子力学体系为基础的固体能带理论。

众所周知,量子力学是一门反映微观粒子运动规律与特点的理论。由于量子力学的出现,人类对物质微观结构的认识日益深入,从而能比较正确地理解与掌握物质的物理性质及其变化规律。而固体物理则是研究固体的结构性质及其组成粒子(如原子、离子和电子等)之间的相互作用与运动规律,并借此阐明其物理性能及其应用的学科。将量子力学理论用于固体物理研究,使我们对晶体中的电子能量状态和电子运动规律的研究,开始由表及里,由浅入深,由定性到定量地有了一个本质认识,并进而导致了以固体能带理论和晶格动力学理论为主干的现代固体理论。尤其是固体电子态理论的建立,使我们能够成功地用导带、禁带和价带的概念将金属、半导体和绝缘体进行区分,使人们对半导体结构的认识有了一个新的飞跃。可以毫不过分地说,如果没有以量子力学为基础的固体能带理论的创立,就不会有上世纪40年代后期晶体管的伟大发明。除此之外,由巴丁所提出的面效应理论也为晶体管的发明起了至关重要的作用。

而从另一方面说,新的发明又为理论体系的进一步发展提供了新的用武之地,由于以Ge和Si为主的晶体管的研究产生了半导体物理,这标志着固体物理的发展又进入了一个新的更深层次。随着半导体物理研究的不断深入,各类新半导体材料不断涌现,各种新型半导体器件陆续诞生,尤其是集成电路的发明,使半导体科学技术在晶体管发明并进入微电子时代后,进入了一个崭新的发展时期。这些新材料、新器件以及新工艺的发展,都进一步深化了固体物理的研究内容,从而极大地推动了固体物理学

以及凝聚态物理学的蓬勃发展。

3.2 理想实验系统的构建是产生重要科学发现的必要条件

如果说丰厚的科学积累和先进的理论体系是重大科学发明的物理基础,那么理想的实验系统和优越的实验条件则是重要科学发现的必要前提条件,这一点可以由整数与分数量子霍尔效应的发现予以证实。

整数与分数量子霍尔效应是二维电子气系统在低温和强磁场实验条件下所呈现出来的独特的强关联属性。二维电子气最早是在Si-MOS器件中实现的。在Si-SiO₂界面上形成的量子反型层,对于电子来说就象一个势阱,电子只能在层平面内运动,并且具有一定的浓度。该电子浓度可以通过改变栅压加以控制,费米能级也会随之发生相应变化,因此是研究多电子效应的理想系统。由于Si-MOSFET工艺水平的提高,低温下的电子迁移率可达 $10^4 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$,这就为量子霍尔效应的发现提供了良好物理实验系统。

然而,分数量子霍尔效应的观测对实验系统的要求更为苛刻。由于Si-MOSFET的电子迁移率较低,所以它已不能担当此任,因此必须寻求其他更优异的二维电子系统,而调制掺杂的Al_xGa_{1-x}As/GaAs异质结构的出现,为分数量子霍尔效应的发现提供了一个近乎理想的二维电子体系。该体系具有以下三个独特优点:一是用现代分子束外延生长技术几乎可以获得具有单原子级平滑程度的界面,因此大大减少了界面缺陷与粗糙度对载流子输运性质的影响;二是在超高真空下的分子束外延生长保证了GaAs和AlGaAs本征材料的纯度可达 $10^{13}/\text{cm}^3$ 级的水平。更为重要的是,利用调制掺杂技术可将施主杂质Si掺杂到离界面一定距离以外的AlGaAs一侧。这样,由于转移到窄能隙GaAs一侧界面势阱中的二维电子远离其电离母体施主,从而使它们遭受到的库仑散射作用大大减弱,极大地提高了二维电子气在低温下的迁移率。迄今为止,Al_xGa_{1-x}As/GaAs调制掺杂异质结中电子迁移率最高值可高达 $1 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。它意味着调制掺杂结构已将杂质和缺陷对二维电子系统的干扰降低到了最低限度,因而使得电子间的多体相互作用显得更为重要起来^[7]。

3.3 良好科学素质的培养是产生重大科学突破的重要因素

现代自然科学技术发展的历史告诉我们,除了活跃的研究环境、激励性的治学氛围、丰厚的科学积

累与优越的实验条件之外,任何一项重大科学突破的产生都与科学家所具有的良好科学素质是分不开的。晶体管的发明,集成电路的诞生,量子霍尔效应的发现等都无一例外。

所谓良好的科学素质,是指严谨的科学态度,勇敢的探索精神,敏锐的观察能力和精巧的实验技术,这是一个科学家在长期从事科研实践活动中所必须具备的条件。肖克莱、巴丁、布拉顿、江崎、基尔比、安德森、莫特、冯·克利青、斯托默、崔琦和劳克林等都具有这种良好的科学素质,这也是他们能够在科学上获得成功的关键所在。如对于 Si-MOS 结构的量子反型层中的二维电子气,在低温与强磁场下的霍尔电阻与外加栅压之间所呈现的量子化台阶行为,起初没有引起同事们的足够重视,而这一极为重要的实验现象却被细心的冯·克利青不失时机地捕捉到了,他认为这很可能是一种新的物理效应。此后,他在法国的 Grenoble 强磁场实验室进行了更精细的实验测量,最终导致了量子霍尔效应的发现。可以设想,如果不是他具有敏锐的观察能力,且不说他本人有可能与诺贝尔物理学奖擦肩而过,而很可能一项重要的科学发现将被遗漏掉。

4 结束语

以上,我们概略地分析与探讨了半导体科学技术与诺贝尔物理学奖之间的内在联系,从中可以窥见整个现代物理学发展与诺贝尔物理学奖之间的某些内在规律性。尽管我们目前不能断言在今后的半导体科学技术发展中,有无新的重要科学发现问鼎诺贝尔物理学奖,但有一点是可以肯定的,那就是它会按照自身的发展规律,继续在更深层次上进行延伸和在更广范围内进行开拓。自然,我们也期待着有更新的物理效应和更新的物理现象在半导体科学技术领域中产生。事实上,目前作为凝聚态物理一个活跃前沿的低维物理仍在向其纵深方向迅速发展。这一领域有着丰富的研究内容和深刻的科学内涵,如各种低维结构中的元激发、电子相干效应、量子隧穿

现象、量子化一维输运、非线性光学特性以及玻色-爱因斯坦凝聚等就是例证。与此同时,各种纳米量子器件,如单电子晶体管、单光子器件、单壁纳米碳管、光子带隙晶体、光学微腔、量子点激光器以及自旋晶体管中都蕴藏着许多新的物理效应,有待于人们去探索^[8,9]。此外,结构为无序体系的非晶态半导体以及近年新发展起来的有机聚合物半导体,也有着许多新的物理性质,需要我们去揭示。可以相信,随着理论与实验研究的不断深化,工艺技术的日臻完善和实验手段的逐步提高,人们认识世界和改造世界的的能力将会不断增强,半导体科学技术这朵鲜花也会在 21 世纪的自然科学技术这座大花园中开放得更加绚丽多姿。

参 考 文 献

- [1] 彭英才. 物理, 1994(2):121 [Peng Y C. Wuli (Physics), 1994 (2):121(in Chinese)]
- [2] 阎康年编著. 贝尔实验室. 保定:河北大学出版社, 1999. 147—188 [Yan K N. Bell Laboratory. Baoding: Hebei University Publishing House, 1999. 147—188(in Chinese)]
- [3] 现代科学技术简介(半导体科学技术). 北京:科学出版社, 1978. 62—65 [Introduce To Advanced Science and Technology (Semiconductor Science and Technology). Beijing: Science Publishing House, 1978. 62—65 (in Chinese)]
- [4] 何宇亮, 陈光华, 张仿清编著. 非晶态半导体物理学. 北京:高等教育出版社, 1989. 1—16 [He Y L, Chen G H, Zhang F Q. Amorphous Semiconductor Physics. Beijing: Higher Education Publishing House, 1989. 1—16(in Chinese)]
- [5] 江丕桓. 物理, 1986(7):393 [Jiang P H. Wuli (Physics), 1986(7):393 (in Chinese)]
- [6] 王阳元, 康晋峰. 物理, 2002(7):415 [Wang Y Y, Kang J F. Wuli (Physics), 2002(7):415 (in Chinese)]
- [7] 郑厚植. 半导体学报, 1999(1):1 [Zheng H Z. Chinese J. Semiconductors, 1999(1):1 (in Chinese)]
- [8] 彭英才, 赵新为, 刘明. 自然杂志, 2003(3):145 [Peng Y C. Zhao X W, Liu M. Ziranazhi (Chinese J. Nature), 2003 (3):145 (in Chinese)]
- [9] 夏建白编著. 现代半导体物理, 北京:北京大学出版社, 2000. 260—286 [Xia J B. Advanced Semiconductor Physics. Beijing: Beijing University Publishing House, 2000. 260—286 (in Chinese)]