

成功源于勤奋、毅力与协作

——纪念约翰·巴丁逝世 20 周年

李欣欣 王晓义

约翰·巴丁 (John Bardeen, 1908~1991) 是迄今为止唯一的一位在同一领域中两次获得诺贝尔物理学奖的科学家。1956 年, 巴丁与 W. 布拉顿 (Brattain) 以及 W. 肖克利 (Shockley) 由于在半导体研究方面的突出贡献, 并且发现了晶体管效应而获得诺贝尔物理学奖。第二次获奖是由于超导微观理论 (BCS 理论) 的建立, 巴丁与 L. N. 库珀 (Cooper) 和 J. R. 施里弗 (Schrieffer) 一起分享了 1972 年的诺贝尔物理学奖。

一、求学生涯

1908 年 5 月 23 日, 巴丁出生于美国威斯康星州的麦迪逊市。父亲 C. R. 巴丁 (Charles Russell Bardeen) 是威斯康星大学医学院的创始人, 第一任院长兼解剖学教授。母亲 A. H. 巴丁 (Althea Harmer Bardeen) 从事室内装饰生意。巴丁是父母五个孩子中的第二个。

1914 年巴丁进入麦迪逊小学, 9 岁时他从小学三年级直接跳级到威斯康辛大学附属中学的初中一年级, 由于连跳三级, 巴丁成了同学中年龄最小的学生。尽管如此, 他的学习成绩仍然十分优异, 尤其突出表现在数学方面。

1922 年, 巴丁在大学预科班完成了学业。1923 年秋天, 在年满 15 岁不久, 他就考入了威斯康辛大学电气工程专业。1928 年, 巴丁在那里获得电气工程学士学位, 并于 1929 年在那里获得硕士学位。

1930 年, 巴丁跟随他最喜欢的教授彼得斯 (Leo Peters) 去了匹兹海湾研究所实验室, 在那里研究地球物理。不久, 他发明了一种新的电磁学方法勘探石油。新方法是如此有效, 以至于海湾研究所决定不申请专利, 以免竞争对手获得更多技术信息。在差不多 30 年之后, 这种方法才公布于众。

巴丁在海湾呆了三年后, 由于对固体物理发生兴趣, 1933 年巴丁开始了在普林斯顿大学攻读研究生课程。他原本打算在爱因斯坦的指导下完成博士学位, 但由于爱因斯坦对带研究生不感兴趣, 因此巴丁改投在年轻而又非常杰出的数学物理学家维格

纳 (Eugene Paul Wigner) 教授的门下学习数学物理。在攻读博士学位期间, 巴丁主要从事碱金属内聚能和导电率研究, 巴丁也在这期间最初接触到超导问题。在普林斯顿大学毕业之后, 1935 年到 1938 年间, 巴丁在哈佛大学做博士后, 这期间, 巴丁开始了关于超导电性最初思考。

二、从明尼苏达大学到海军军械试验室

1938 年, 从哈佛毕业之后, 巴丁开始了在明尼苏达大学的第一份教师工作。他开始积极努力地研究超导理论。二战爆发后巴丁关于超导的研究工作被迫中断。由于技术的需要, 1941 年 3 月, 巴丁应征到华盛顿的海军军械实验室从事磁矿勘探工作。他通过寻找船舶影响区域来帮助盟军部队对抗德国的磁发射。虽然在这一时期内他没有机会进行超导理论的研究, 但他一直没有停止关于超导问题的思考, 他后来说“我一直在考虑费米面上怎样得到一个小能隙的问题”。但是, 他不得不等待了几乎将近十年的时间才能继续超导的研究工作。

三、贝尔实验室的晶体管研究

二战结束后, 巴丁希望能够马上继续之前的关于基础物理的研究工作。此时, 肖克利领导一个新半导体小组里进行固体物理研究工作, 小组确立了以“半导体物理”为研究方向, 并以研制“半导体放大器”为科研目的。

肖克利提出用“场效应”的思想来进行晶体管的实验研究, 小组中实验物理学家布拉顿和物理化学家吉布尼 (R. Gibney) 认为, 利用外加电场来影响半导体层内部的电子行为是难以实现的。但是组里实验物理学家皮尔逊 (G. L. Pearson) 和电路专家穆尔 (H. Moore) 对场效应设想却有信心, 认为在外加电场条件下的“电荷输运”应该导致强电流的形成。最后不同学科的学术观点经过交流达到共识, 认为晶体内电子或空穴在外加电场作用下应涌向表面而获得放大电流。但他们在多次实验中却观测不到预想的“场效应”现象, 实验宣告失败。

1945 年 10 月 15 日, 肖克利将巴丁推荐引进到

小组中来。10月22日，肖克利与巴丁就困惑问题进行探讨。经一段时间的研究，1946年3月，巴丁在小组会上首先提出了半导体的表面态理论，他认为：在外加横向电场的作用下，电子被吸引到半导体的表面并被束缚在那里，形成严密的屏蔽，阻止电场穿透到半导体内部，使存在于内部的正电荷载流子免受影响，而负电荷载流子又被捕获在表面上，因而不能形成电流。这就解释了肖克利的场效应观测不到的原因，同时也加深了人们对半导体表面特性的认识。

1947年11月21日上午，巴丁与布拉顿开始着手研制半导体放大器。他们先分别试用P型硅和N型锗晶片做实验比较后，决定选择以锗晶体为实验材料。由于最初的实验目的是用肖克利的“场效应”思想制作放大器件。因此，他们通过利用同时含有正负离子的电解液（水）来改变晶体表面电荷的分布，这样借助一个垂直于表面的外加电场的用来控制锗晶体内电子的运动而获得了放大电流。但在11月23日巴丁和布拉顿对这个实验装置进行测试时，发现这个实验装置没有实用价值：一是放大器工作时，整个装置输出电压无显著变化；二是装置只能在频率为8Hz以下工作，低于人的听觉范围。为了解决这些问题，布拉顿直接在锗表面所形成的绝缘氧化膜上蒸发一个金点作为电极，并在金点中央穿一小孔让钨丝（针尖）与锗片接触。当把针尖移到金点边缘时，他们意外地发现不用电解质而直接使金电极与晶体表面接触，就可使实验装置获得良好的响应频率。而且当在金点上加一个小的电压时，流进锗表面的空穴流极大地增加了从锗流向针尖的电流。余下的只需解决放大器输入与输出端保持信号同步问题，以保持放大器音频输出不失真，获得应有的放大功率。

擅长于运用分析法处理实验结果的巴丁，提出把锗晶体表面上的两个接触点尽可能地靠近的方法来解决。布拉顿成功设计出一种方法不用导线也能在两个金电极之间狭小的空隙中实现实验装置的要求。12月16日下午，巴丁与布拉顿进行改正后的实验，观测到放大30%的输出功率和15倍的输出电压，频率测试为1000Hz，达到了人耳听到的正常音频，世界上第一只固体放大器件就这样问世了。

第一只晶体管的结构是金属丝和半导体的点接触，故称为点接触晶体管。12月23日下午，在固

体物理组和贝尔实验室科研管理部门小范围内，对放大器进行音频信号放大演示，在场人员激动不已。为了进一步证实放大器的功率放大功能，12月24日又成功地进行了一次振荡实验。由于技术保密和专利申请等原因，直到1948年6月30日，贝尔实验室才为此举行了新闻发布会。

四、伊利诺伊大学的BCS理论研究

从跟随维格纳教授做博士开始，巴丁毕生都在进行有关电子相互作用和金属、半导体及超导体迁移特性方面的研究。

1951年5月24日，巴丁离开了贝尔实验室，到伊利诺斯大学任教。他重又投入超导领域的研究。虽然巴丁在超导理论研究中遇到了重重困难，但是他并没有气馁，并且通过吸纳优秀人才，来推动对这一问题的研究。

研究工作开始不久，巴丁遇到了以前出现过的关于多体相互作用的困难。巴丁认为，他的合作者们有着自己所缺乏的知识、天赋和经验。他认为戴维·玻姆（David Bohm）的新多体模型对于模拟电子等离子体的电子相互作用模型也许有用。玻姆的学生大卫·派因斯（David Pines）曾经用数学的方法从短程作用的单粒子激发中分离出远程库仑相互作用的问题。巴丁在伊利诺伊大学为派因斯提供了一个博士后的位置，巴丁希望运用派因斯最新研究经验来继续自己的研究。

1952年7月，派因斯到伊利诺伊大学后，巴丁要求他考察弗勒里希（Fröhlich）早年研究的在极性晶体中的电子运动问题。年轻的物理学家李政道，在这个夏天作为巴丁的博士后也参与到工作中来。派因斯意识到李政道新近在自己的场论研究中所运用的方法（“中等偶合法”）可以运用到极化分子问题中来。此后弗朗西斯·洛（Francis Low）也加入这个工作。李政道、洛和派因斯的工作对于BCS理论发展提出了有益的构想。

在之后的研究中，巴丁意识到自己对于场论知识的欠缺。1955年春天，巴丁打电话给在普林斯顿高等研究院的杨振宁，询问杨振宁是否可以给伊利诺伊大学推荐“精通场论并愿意从事超导性研究”的合适人选。杨振宁推荐了已经开始做博士后的年轻物理理论学家利昂·库珀（Leon Cooper）。小组的第三个成员是罗伯特·施里弗（J.Robert Schrieffer），他是巴丁的一个研究生，他选择了超导性作为他的

毕业论文。

巴丁成为了这个三人小组的领导,他提出问题、激励团队成员,并通过合理的分配进行新理论的研究。巴丁要求施里弗对布吕克纳(Keith Brueckner)新近研究核子时所建立的“t 矩阵方法”进行考察。他要求库珀对玻姆-派因斯理论以及 1954 年巴丁和派因斯对电子-电子相互作用的研究进行考察。

1956 年 9 月库珀取得了突破。他考察了费米面外两个电子的简单例子,并做适当的假定,他解释说,如果两个电子间的净作用力呈现为吸引力的话,那么他们就会在正常状态的连续统形成一个束缚态,并通过能隙把连续统隔开。但是,之后团队试图尝试从一个“库珀对”推广到多电子理论时遇到了困难。主要的困难是要解决许多“库珀对”会发生重叠的事实。问题在于如何用数学的方式来表述这种情况。他们担心近似法的有效性。从正常态到超导态所改变的能量必须小于他们所能精确计算的任何一个状态能量。只研究成对的那部分系统,他们担心是否忽略了其他更重要的问题使得他们的分析无效。

1 月底的时候,转机出现了。正如施里弗所记得的,研究过程是一种智力熔补的结果,他最终写出了超导体基态的波函数,其中包括“库珀对”。然后他用朝永振一郎(Tomonaga)曾在 π 介子-核子中使用的变分法来表达这一函数。按照朝永振一郎的方法,他尝试写出这个函数。当晚,施里弗进一步研究了 this 表述,早上他做了变分计算以确定隙方程。“我只用了几个小时就解决了隙方程的截止势能”。

最令人兴奋的时刻发生在几天之后,当巴丁根据能隙和临界场来计算凝结能量,并获得了这两种实验量之间的关系。三个人开始加速工作。巴丁再次分配任务,他要求施里弗研究超导体的热力学性质,要求库珀对迈斯纳效应和其他的电动力学性质进行研究,而他自己则研究超导体的传输以及非平衡属性。

施里弗取得突破后的两周,他们准备发布研究成果。但是巴丁还没有完成关于二级相变的推导。他最终决定不再让这一点来推迟他们的发表。2 月 15 日,巴丁把他们关于 BCS 的研究成果以书信的形式寄给《物理评论》。

同年 3 月,巴丁决定在费城举行的美国物理年

会关于固态物理研究会上宣布这个理论。为了确保施里弗和库珀能够获得荣誉,巴丁决定不参加这个会议,并通过他俩上交两篇论文。但施里弗因故未能参加,于是库珀代表 3 人首次公开地报告了他们的研究成果。1957 年 12 月,第一篇完整叙述他们理论的文章在《物理评论》上发表了。

五、企业和政府顾问

巴丁一生大部分时间都在大学里任职,科研工作也几乎贯穿他的一生。除此之外,他在企业、政府这些非学术领域内也是很活跃的,他为企业和政府提供了大量科学技术方面的建议,这些有价值的建议一直被政府和企业沿用。

巴丁担任过很多企业的顾问,其中比较有影响的是美国的施乐公司和日本的索尼公司。在 1951 至 1982 年间,巴丁一直担任施乐公司的顾问。从 1961 年直到 20 世纪 70 年代,他还在该公司的董事会中任职。在与施乐公司交往的几十年中,巴丁为公司的发展壮大做出了卓越贡献。

巴丁另一个重要的企业活动就是与日本索尼公司的合作。巴丁与索尼公司高管建立了亲密的友谊。1953 年巴丁去东京参加一个科学会议时,结识了鸠山一郎(George Hatoyama)和菊池武夫(Makoto Kikuchi)。后来鸠山一郎成为索尼公司研究所的第一任所长,菊池武夫后来成为他的继任者。在他们认识后的很多年里,巴丁与索尼公司的研究人员来往甚密。1968 年伊利诺斯大学为巴丁举办了盛大的 60 岁生日宴会,鸠山一郎专程从日本赶来,并送给巴丁一个带有索尼晶体管收音机的高尔夫球作为礼物,这是索尼公司专门为巴丁设计生产的。巴丁 80 岁生日时,菊池武夫在伊利诺斯大学设立索尼巴丁教授席位。1990 年,巴丁最后一次访问日本索尼公司,并在那里做了关超导研究的演讲。

在政府机构中,巴丁也有任职。1959 年到 1962 年,巴丁担任美国总统科学顾问委员会(PSAC)委员一职。1981 年到 1982 年,巴丁被任命为白宫科学委员会委员。1983 年 3 月 23 日美国总统里根发表“星战计划”演讲,提出了有关的战略防御计划,认为美国要加紧研制和部署空间时代的超级武器。包含巴丁在内的科学界大部分人都认为“星战计划”的目标是难以实现的。巴丁认为“星战计划”会使本应为增强国家经济竞争力服务的国家有限的科学技术人力资源偏离经济轨道。巴丁公开反对星战计

划，并向白宫科学委员辞职。

六、两次中国之行

1975年9月4日，巴丁跟随美国固体物理学家12人代表团第一次来到北京，团中除了巴丁，还有两位诺贝尔物理学奖得主，一个是与巴丁共同创立BCS理论而获奖的施里弗，另一个是因在实验中发现超导体隧道效应，于1973年获奖的贾埃沃(Ivar Giaever)。他们的来访，是对由北京大学周培源教授担任团长，包括黄昆教授等的中国物理学家代表团1975年3~4月间在美国进行为期5周参观考察的回访。9月4~15日，代表团在北京主要参观了中国科学院物理所、半导体所、生物物理所、北京大学、清华大学和半导体设备厂。9月16日~10月2日，代表团到西安、南京、无锡、上海等地，主要参观了西安交大、南京大学、无锡农村工厂、复旦大学、上海机械厂等单位。美国代表团于10月2日从上海回国。

巴丁第二次访问中国是应我国教育部和时任北京大学校长周培源的邀请前来讲学。1980年4月30日到达北京，这次他偕妻子一起来访。国务院副总理方毅在人民大会堂会见了巴丁夫妇，同时媒体对这次会见进行了全国性的宣传报道。巴丁这次在中国的学术交流活动主要安排在北京大学进行，5月中旬后再到西安、南京、上海等地进行参观访问。巴丁在中国期间作了有关“超导问题的发展与近况”等方面的12次报告与演讲。巴丁在北京期间，还先后与北京大学低温物理专业、半导体物理专业、中国科学院物理研究所以及冶金工业部有色金属研究所等单位举行了多次座谈。离开北京后，罗小兰教授陪同巴丁夫妇前往西安、南京、上海等地参观访问。巴丁在西安交大作了有关超导材料及其应用技术方面的演讲。5月23日，巴丁在南京大学度过了他72岁的生日，那天正逢南京大学校庆活动，南京大学精心地安排了盛大的庆祝活动，以纪念这一难得的巧合。最后，巴丁及其夫人于5月27日到上海，并在上海科学会堂为上海市物理学界及科技界人士作了有关美国科技、教育情况方面的报告。5月31日巴丁夫妇从上海回国。

巴丁很关注我国科研进展情况。在巴丁访问复旦大学几年之后，谢希德教授带领的表面物理学研究室科研人员，对关于III族元素在Si(111)面上吸附

的研究取得了重要成果。巴丁称赞说：“在中国科学界中，谢希德教授是属于最有影响的人士之一”。此外，巴丁还很重视与我国学者的友谊。1990年5月上海交通大学应用物理系蔡建华教授逝世时，巴丁教授从美国专门发来唁电说：“蔡教授的逝世使我感到失去了一位良友和科学上的合作者，蔡教授在科学上的指导作用和他本人的贡献，将为科学界所缅怀。”

七、结束语

巴丁之所以能够取得如此令人瞩目的成就，源于巴丁特有的优秀品质。

首先，巴丁注重实验研究，具有敏锐的思维力和洞察力。正如他在晶体管发明过程中所作出的科学设想一样，他的大多数研究均以实验事实为线索，而并非从某些数学模型的公式中推导而来的。当然，他也使用数学，但只是在很有必要时才应用。因为巴丁认为，过分依赖公式往往会使人误入歧途，除非这种数学方法十分密切地和实验以及物理学知识相结合。同时他还认为，数学至今还未能达到一个能直接与处理诸多尖端课题相适应的水平。

其次，巴丁有着坚持不懈、刻苦努力、孜孜不倦的科学精神。在巴丁长达60年的研究生涯中，他几乎在凝聚态物理学的各个领域都做出过重要贡献。他还涉足了许多其他领域，包括电气工程、数学、理论物理、科学政策、工业研究和发展等。直到1991年去世时，82岁的巴丁仍不断地发表自己的科学见解。

最后，巴丁还非常善于团结协作，当他进行超导电性研究时，十分注意发挥团队的作用，大胆启用年青人，善于挖掘和利用团队成员各自的优点、特长，使个人的智慧与集体的创造力得到最有效的结合，从而成功地创立了著名的BCS理论，解释了几十年来一直使人困惑的超导现象。

1991年1月30日，巴丁在马萨诸塞州的波士顿逝世，享年83岁。巴丁对科学事业的重大贡献令人难以忘怀，他的科学精神和团队精神永远值得我们学习。

(李欣欣，黑龙江省大庆师范学院物理与电气信息工程系 163712；王晓义，北京首都师范大学物理系 100048)