

课时，吴有训先生要我选两门课，一是在物理化学和电化学里选修一门；二是一定要选一门中国文学课。物理化学和电化学要求先学热学课。当时因为我没学过热学所以未选成。但后来我还是认真自学了物理化学。至于中国文学课，我当时选了朱自清先生的宋诗。吴先生对我选宋诗非常欣赏。朱自清先生的课使我对旧诗产生很大的兴趣。现在，我在物理界同事中被认为是一个会做诗的人。无论如何能够成为朱自清先生这位品高学博的学者的及门弟子，我一直认为是三生有幸。以上的例子说明，当时的清华大学非常重视学生的全面发展。我认为目前有一种不正确的想法，就是学校里培养的学生要和他毕业后要去的单位的专业“对口”，并要求他在新岗位上能够立刻拿起工作。这造成忽视基础和学习方向狭窄等现象。分配到新单位能立刻拿起工作，这在建国初期也许

是必要的。但在现在各厂矿和各研究单位的科学队伍都已有相当高的水平，大学的学制也已缩短。让大学本科去培养其他单位的专业人材是不可能的。因此大学本科的任务只能是打好较宽的基础，以适应将来的需要。在上面所引的叶先生的一段话里，还提到理论与实验并重的问题。我觉得现在大学里太偏重理论学习而忽视学生动手的能力。我认为应该多设选修课，鼓励学生动手，使有理论倾向和实验倾向的学生各得其所。教师们也要因势利导使理论和实验不致偏度，并且密切结合。

十年动乱，使叶先生的精神和身体受到很大的摧残。我国物理学界也失去了整整一代年轻人。怀念叶企孙先生，更促使我们有效地办好大学教育，振兴科学，为“四化”建设贡献出更大的力量。

电子隧穿效应和超导性

Ivar Giaever

本文是1973年诺贝尔物理学奖获得者I. 贾埃弗(Ivar Giaever)的获奖讲演。它对学生解放思想、理工结合以及教改方向等，颇有参考意义，故转载于此。

奥斯陆报纸上最近有个标题，大概是这样写的：“弹子戏和桥牌的行家，物理几乎不及格的人获得诺贝尔奖。”这篇报道谈及我在特龙黑姆(Trondheim)的学生生活。我必须承认这篇报道是相当准确的。所以我不准备“掩饰”而且坦白地说我在数学上也同样几乎不及格。在那些日子里我对力学工程和一般的课程不是很感兴趣，但是我以中等程度在1952年毕业。主要因为挪威的房子短缺，我和妻子最后决定迁居加拿大，在那里我很快受加拿大通用电力公司雇佣。我参加了公司中的三年一期的工程和应用数学方面的课程，这个课程也称为“基础课程”。我认识到这次学习是为了实用，因为它可能是

我最后的学习机会，所以我真正刻苦地学习了几年。

当我28岁时，我到了纽约州斯克内克塔迪(Schenectady)，我发现物理学家的生活不错，在那个地方很可能造就一些人成为物理学家。我已经接受了公司委派的各种在应用数学方面的任务并且逐渐感觉到：所用的物理知识落后于数学。因此，我想也许我应该学习一些物理。尽管我当时还是一个工程师，但我在通用电器研究实验室中得到了试一试的机会。

我分配到的任务是做薄膜方面的工作，对我来说薄膜意味着摄影术。但是我很幸运和约翰·费希尔(John Fisher)一起工作，他显然还有

别的想法。费希尔同样也是机械工程师“出身”，但后来他把注意力转向了理论物理。他想利用薄膜技术去制作实用电子器件，以后不久我就用薄的绝缘层隔开金属膜准备做隧穿效应实验。我相信费希尔那时已经知道江崎玲于奈(Leo Esaki)的隧穿效应实验，但是我肯定是不知道的。一个粒子能够穿过势垒的概念对于我来说有一些离奇，因为我刚刚在特洛伊(Troy)的伦塞勒科技学院(Rensselaer Polytechnic Institute)攻读量子力学，在那儿正式地学习物理课。对于一个工程师来说这听起来颇为离奇：如果你朝墙扔网球，扔了很多次它竟然会穿过墙去而墙和网球本身都不受损坏。通向诺贝尔奖的道路真是艰难得很！当然，这个诀窍在于用十分小的球而数量很多。因此如果我们能够使二块金属靠得非常近但不短路，那末金属中的电子可认为是这种球，金属间的空隙就代表了这座墙。

无论是费希尔还是我在实验物理方面都没有太多的基础，确切地说没有基础，开始时我们遭到了几次失败。为了能测量出隧道电流，二块金属的间距必须不超过100埃左右。起先因为有振动的问题，我们决定不采用空气或真空来隔开二个金属。毕竟我们二人都受过机械工程的训练！我们试着用各种由朗缪尔薄膜和聚酯酸甲基乙烯酯(Formvar，用于油漆、搪瓷和胶粘剂上)薄膜做成的薄的绝缘体来保持二金属间的间隔。当然这些薄膜总是有些针孔，而所用的水银接触电极就会使这些薄膜短路。因此我们花了一些时间测量了非常有趣的但总是不可重复的电流电压特性。这些特性我们认为极妙的，因为每种情况只发生一次。几个月后我们才得到了正确的想法：采用蒸发的金属膜并且用自然生长的氧化层把它们隔开。

为了实现我们的想法需要一台蒸发器，因此我购买了我的第一件实验设备。为了制备隧道结我们先在一块玻片上蒸发一条铝膜，再从真空中取出薄膜很快加热以氧化表面，然后在第一条膜上交叉地沉积上几条铝条同时做成几个结。这个步骤解决了两个问题：第一，在氧

化层上没有针孔，因为它是能够自愈的；其次我们摆脱了用水银接触电极引起的机械问题。

大约在1959年4月，我们做成了几次成功的隧道贯穿实验。样品的电流电压特性重复性相当好并且和理论很符合。做了几种诸如改变结的面积，氧化层厚度以及温度的检验。每一件事看来都很好，我甚至在实验室举行了一次专题讨论会。到这个时候我已多次地解了薛定谔方程相信电子有时的性态象波，现在我不再为那件事困惑了。

然而，在本实验室里还有许多真正的物理学家，他们当然怀疑我的实验。怎么知道没有金属短路？是离子电流？是半导体而不是隧穿效应？当然我不知道。即使理论和实验符合得好，对实验的正确性我还一直在怀疑。我花了许多时间致力于一些不可能实现的计划，例如隧道三极管或者冷阴极，二者都是为了最后证明我做的是隧穿效应并使我的工作也许有些用处。在那个时候拿着薪俸做我认为是开玩笑的事对我真是不可思议的，我的良心要责备我。但是正象量子力学一样，你只得习惯它，而现在我常常还要支持相反的观点：我们应该有更多的人去做纯粹研究。

我继续和费希尔试验我的想法，费希尔现在正以他特有的兴趣和热情注视着基本粒子问题。此外，我得到查利斯·皮恩(Charles Bean)和瓦尔特·哈里森(Walter Harrison)愈来愈多的忠告和指导。这两位都是物理学家，具有只要一支粉笔一块黑板就能把事情讲得一清二楚的非凡能力。我继续在伦塞勒科技学院听课，一天在亨廷顿(Huntington)教授讲的固体物理课上我们上到了超导性。我并不相信电阻真会降到零，但是真正引起我注意的是提到了超导体中的能隙，这是新的巴丁-库珀-施里弗(Bardeen-Cooper-Schrieffer)理论的核心。如果这个理论是正确的，如果我的隧穿实验也是正确的，对我来说很明显，这二者结合起来就能发生某些十分有趣的事情。当我回到通用电器公司实验室，把这个简单的想法向朋友试探一下反应，我记得他们并不太感兴趣。能隙实际上是一个多体

效应，不能用我做的办法作字面上的解释。虽然表示怀疑，但每个人都鼓励我继续前进并试一试。当时我并不知道能隙的大小是什么量级，是多少电子伏特。这个问题用我常用的办法很容易解决：先问一下皮恩，然后问哈里森，当他们一致回答是几个毫电子伏时我很高兴，因为那是在容易测量的电压范围里。

我还从未做过要用低温和液氮的实验——这看起来似乎是件复杂的事情。然而在象通用电器公司那样的大实验室里，最大的方便是在你周围总是有“万宝全书”，并且愿意助你一臂之力。在此情况下，我要做的只是到大厅的尽头沃伦·德索鲍(Warren Desorbo)已经在做超导实验的地方去。我不再记得花费多少时间去装配我借来的液氮杜瓦瓶，但是也许不超过一天或二天。不熟悉低温工作的人相信低温的整个领域是十分神秘的，-但是实际上它仅有的要求是通入液氮，这一点在我们实验室里是容易做到的。那时，我用习用的铅-氧化铝做成样品，但是我把铅条加在上面。铅和铝都是超导体。铅在7.2K下超导，所以你使它超导的全部要求就是液氮，它沸腾于4.2K。铝只有在低于1.2K下才变成超导体，要达到这个温度需要更加复杂的实验装置。

起先我做的两次实验失败了，因为用的氧化层太厚。通过厚的氧化层的电流不足以供我所用的仪器作可靠的测量，我所用的简单仪器就是一只标准电压表和一只标准安培计。仅仅13年后的现在，当实验室里摆满了高级的XY记录仪时，再去想象那时的情形是不可思议的。诚然，那时我们已经有了许多示波器，但是我对它们的应用很不熟悉。在第三次试验中我不是仔细地氧化第一层铅条，而是简单地把它在空气中曝露几分钟，就放回蒸发台中去沉积交叉的铅膜。这个办法做的氧化层大约不超过30埃厚，所以我能够很容易地用已有的设备测量电流电压特性。对我来说实验中的最重要时刻恰是在我了解到一个特定的想法究竟是好的还是坏的之前。因此即使失败也是兴奋的，当然我的想法大部分是错的。但是这一次却成功了！

当铅从正常态变到超导态时，电流电压特性发生显著的变化，那是激动人心的。我立刻用不同的样品重复了这个实验，一切顺利！但是如何肯定呢？众所周知，超导电性在有磁场时受到破坏，但是我的简单的杜瓦装置不可能做那样的实验。这时我不得不穿过大楼到以色列·雅各布(Israel Jacobs)研究低温磁学的地方。我再一次很幸运地碰到了有成套的实验装置，温度和磁场都能够控制，我能够很快地做所有要做的实验。情况汇总起来，我记得整个小组都非常激动。我特别记得皮恩热情地在实验室大楼里上下奔波传布这些消息并且耐心地对我解释实验的意义。

当然，我不是测量超导体能隙的第一个人，我很快就知道了蒂克哈姆(Tinkham)和他的学生用红外发射做的一些非常好的实验。我记得我担心我测量到的能隙的大小同那些先前的测量并不很符合。皮恩说从此以后人们必将与我一致，我的实验将会作为标准。他的话使我放心并且感到高兴，第一次感到象一个物理学家。



喝咖啡时的非正式讨论会。
左起：贾埃弗、哈里森、皮恩、费希尔

那是我生活上一个非常激动人心的时刻，我有几个很重要的改进实验和扩展实验的想法，想把实验推广到各种材料如正常金属，磁性材料和半导体中去。我记得许多次在喝咖啡时的关于下一步做什么的非正式讨论。这种讨论中的一次，在1960年拍了一张照片。老实说，这张照片是事先安排了的，我们通常并不是这

样衣着整齐的,我也很少在黑板前主持讨论.我们的大多数想法并不行得通,哈里森不久发表了一种“理论”说明生活毕竟是复杂的.但是超导实验是吸引人的而且一直在进行.看起来隧穿效应的几率正比于超导体中的态密度.现在如果这是严格成立的话,不难想象就能理解两块超导体之间的隧穿现象应该显示出负阻特性.当然负阻特性意味着放大器、振荡器和其他器件.但是我的周围没有人有能把氦气泵入足以使铅变成超导体的设备.这时我只得离开大楼重新起用一只在邻近大楼里的老的低温装置.确实,铅一旦变成超导体,负电阻就出现了,真的,隧穿效应的几率正比于态密度的概念从实验上证实是正确的.

现在看来大有希望,因为能利用这个效应做出各类电子器件,但是它们当然只能在低温下工作.我们应该记得在1960年半导体器件还不是那样高级,我们认为超导体会有机会与例如江崎二极管相竞争.我面临的基本问题是走哪一条路:工程的研究还是科学的研究,我决定应该先做科学的研究.我得到了我的顶头上司罗兰·施密特(Roland Schmitt)的全力支持.

回想起来,我懂得施密特多么想鼓励其他人在新的领域开展工作,或同样鼓励在我周围的较有经验的物理学家去这样做.然而他没有这样做,就在这个时候施密特给我找来了一位合作者卡尔·梅格勒(Karl Megerle),他作为一名研究培训人员加入我们的实验室.我和梅格勒合作得很好,不久我们发表了一篇涉及大部分基本效应的论文.

象在物理学中通常的情况那样,将实验推广到更高的能量、更大的磁场或者在我们的情况下推广到更低的温度是很重要的.所以我们联合了霍华德·哈特(Howard Hart),他刚刚完成了一台能获得高达0.3 K的氦-3致冷器.同时,梅格勒完成了一只锁定放大器,用这台仪器我们可以用来直接测量电流对电压的微分.这真正是一台漂亮的仪器,它有一块磁铁以每秒八周的速率转过一个拾波线圈,但是当然比现在的锁定放大器差多了.我们已经知道在铅的

电流电压特性上有时有一些反常现象,现在通过在微分曲线上找出某些额外的纹波而终于把它定下来.这使得我们很快活,因为到目前做过的所有隧穿实验都是去证实BCS理论的,这不是一个实验者真正愿意做的事.我们的愿望是证明一个普通的理论不正确,而现在我们终于在理论上打开了一个缺口.此时我们猜测这些纹波是与声子有某些联系的,声子被认为是在超导体里引起电子与电子相互吸引作用的原因.如常发生的情况那样,理论家们从我们处接过手来,聪明地利用这些纹波,适当地把理论推广,并且证明BCS理论实际上是正确的.巴丁教授在他最近的诺贝尔奖讲演中对此作了详细的说明.

至此,我主要谈的是通用电器公司在那段时期发生的事情,有时我很难于相信,斯克内克塔迪不是世界的中心.一些其他人开始去研究隧穿效应,这里只提几个:罗厄尔(J.M.Rowell)和麦克米伦(W.L.Mcmillan),他们是真正地阐明了超导体中声子结构的人;当然,托马希(W.J.Tomasch)坚持着研究他自己的效应;夏皮罗(S.Shapiro)和他的同事们与我们在同时做两块超导体间的隧穿效应;巴丁和后来的科恩(M.H.Cohen)担当了大部分理论工作.

回过头来谈谈伦塞勒科技学院,那时,我已完成我的课程,并决定随亨廷顿教授做关于有序无序合金的理论论文,因为超导体中的隧穿效应已经基本上搞清楚了.后来有人告诉我,约瑟夫森(B.Josephson)在物理快报上发表了一篇短文,问我有何看法?我看不懂这篇文章,但不久后我在剑桥有机会遇到约瑟夫森,给我留下很深的印象.约瑟夫森预言的效应之一是当氧化层势垒两边的材料是超导态时,在零电压下,可以有一个超导电流通过氧化层势垒,这个现象现在称之为直流约瑟夫森效应.我们已多次观察到这个效应,事实上当用锡-氧化锡-锡或铅-氧化铝-铅,不会不看到这个电流.早期的隧道结经常是用氧化铝而制得的,一般较厚,所以热涨落抑制了直流电流.在我们的第一篇

(下转第58页)

仪,样品放在探测器的前面。如果把样品放在干涉仪的一个臂中,就构成了色散傅里叶变换波谱仪(DFTS)。这是1963年由Chamberlain开创,在70年代飞速发展起来的新技术。这两项技术都使用双束干涉仪和宽频带信号源。它们的共同基础是:当干涉仪中两束光的程差变化时,探测器所记录的干涉信号,是投射到它的功率谱的傅里叶变换。这样,一个未知谱就可以从测得的干涉图通过数学计算得到。

在FTS中样品造成的相移存在于干涉仪的两束波中,因而该方法只能测量材料的吸收系数或介质损耗。然而当样品插入到一个波束中时,折射指数会使干涉图变得不对称。这时干涉图不仅记录了样品的衰减,而且也包含了相移。从而能直接决定材料的复折射指数 n 或复介电系数 ϵ 。

测样品复折射指数时,可以将样品放在反射镜与分束器之间测量其复透射谱,或者用样品取代反射镜测量其复反射谱。所有的具体结构可以归纳为如图1所示的三种基本类型,它们分别适用于不同性能的样品。然而不管采用

图1中的哪一种,我们都可以看做:一个具有复插入损耗 $\hat{L}(\sigma)$ 的样品放入双束干涉仪的固定镜臂 M_2 中[图1(d)]。而材料的光学参数 $n(\sigma)$ 或电学参数 $\epsilon(\sigma)$,可以根据我们采用的具体结构,与复插入损耗 $\hat{L}(\sigma)$ 联系起来,因而能够得出复折射指数和复介电系数。

这个方法使用的频率范围,目前约为 3cm^{-1} (90 GHz)到 1000cm^{-1} (30THz)之间。由于物质分子和远红外辐射有强烈的相互作用,因此DFTS无疑能为研究物质微观结构,研究材料中分子的相互作用提供大量可靠的信息。目前它已被广泛应用于气体、液体的分子动力学,晶格动力学,铁电现象及其软模性能,生物体结构与生命科学等研究领域。

参 考 文 献

- [1] J. R. Birch et al., *Infrared Phys.*, **19**(1979), 201—215.
- [2] K. J. Button, *Infrared and Millimeter Waves*, **2**, Academic Press, New York and London, 1980, 123—271.

(上接第55页)

文章里,我和梅格勒发表了一根曲线,表明了这种超导电流以及它强烈地依赖于磁场。然而我对这个超导电流有了现成解释——它来自金属的短路或者金属桥。我当时搞得迷惑了,因为对小小的金属桥,磁场的敏感性是出乎意料的,但是没有人知道一个20埃长20埃宽的桥会有怎样的性能。如果我已象一个科学家那样学到了什么东西的话,那就是不应该使只需作简单解释的事情复杂化。因此我们做的所有显示了约瑟夫森效应的样品都当作存在短路而被抛弃。这次我是头脑太简单了!后来有人多次问我错过了这个效应我是否感到懊恼?回答是明确的,不。因为要作出一个实验上的发现光观察到某些情况是不够的,还必须了解到观察的意义,就此而言我甚至还没有入门。即使在我知道了直流约瑟夫森效应后,我还是感到它和

真正的短路不能清楚区别,所以我错误地认为只有对所谓交流效应的观察才能证明或否定约瑟夫森理论。

在结束时,我希望我这种个人味道很浓的讲话能对科学发现的规律提供某些启示。我个人的看法是通向科学发现的道路很少是平坦的,但它并不要求有很多的专门知识。事实上,我确信新手常常有很多优点,因为他没有学识,并不知道为什么不应该试试某个实验的全部复杂的原因。然而,重要的是当你需要的时候能够得到各种学科的专家们的指导和帮助。对我来说我成功的最主要的原因是我在适当的地点适当的时间并且结交了通用电器公司内外的很多朋友,他们无私地支持了我。

(邱经武 须重明译 易穆校 原载《世界科学》1983年第2期1—8页,本刊有删节)