

# 固体中电子隧穿研究的奇妙旅程

林志忠<sup>†</sup>

(台湾阳明交通大学电子物理系 新竹 30010)

2025-03-19收到

<sup>†</sup> email: jjlin@nycu.edu.tw

DOI: 10.7693/wl20250411

CSTR: 32040.14.wl20250411

## 1 前言

1973年, 诺贝尔物理学奖颁发给了固体中的量子隧穿现象, 得主共三位: (1)江崎玲于奈(Leo Esaki, 1925年生), 他在半导体实验中发现了单电子的量子隧穿现象; (2)伊瓦尔·贾埃弗(Ivar Giaever, 1929年生), 他在超导体实验中发现了单电子的量子隧穿现象; (3)布莱恩·约瑟夫森(Brian Josephson, 1940年生), 他在理论上预测了超导隧道结的超导电流(电子对)的量子隧穿现象。这三位年轻得主做出突破性发现时, 都尚未获得博士学位! 前两位得主的求学与科研人生, 更饱受第二次世界大战的摧残祸害而充满变数, 幸而他们不但都坚强的存活了下来, 而且闯出一片广阔的学术天地, 为人类开创了新知识。本文介绍江崎和贾埃弗的一些(而非全部)故事, 关于约瑟夫森预测超导电流隧穿行为的理论故事, 请参考文献[1]。

## 2 贾埃弗的得奖故事

诺贝尔奖的主旨是奖励思想和概念的突破性、先驱性创新, 而非最具规模化的工艺与生产。所以如曼哈顿计划制造出原子弹, 及美国国家航空暨太空总署(NASA)阿波罗计划登陆月球的领导者, 都不会因其史无前例的丰功伟绩和人类壮举而获得诺贝尔奖。

贾埃弗的获奖工作发表于1960

年8月的 *Physical Review Letters* 上, 论文只有一页长<sup>[2]</sup>, 并只引用了一篇参考文献, 即三年前发表而尚未被广泛接受的 Bardeen—Cooper—Schrieffer (BCS)理论。贾埃弗在玻璃片上以加热蒸镀方式镀出一层铝薄膜, 让薄膜在空气中自然氧化几分钟, 之后再蒸镀上一层交叉铅薄膜, 形成一个隧道结(图1)。他把隧道结放在液氮杜瓦瓶中, 用一个电流计以及一个电压计测量电流对偏压的变化。他的实验不仅检验BCS理论的预测, 还展示超导能隙——一个崭新多体基态物理量——的真实存在, 更直接测量出其大小值。

贾埃弗的开创性实验源自于当时他的雇主通用电气公司(General Electronic Company, 简称GE, 奇异公司的前身)的宽松研究气氛, 以及周围一群专业知识丰富、功力扎实, 且密切掌握前沿进展, 乐于讨论与互助的资深及年轻同事们, 还有公司对新进工程师的一系列严格培训课程, 并鼓励他们前往附近大学修读博士学位。同时, 他们的出于好奇心而看似没有直接实用价值的探索性研究获得了公司主管的热诚支持。可以说, 是1950—1960年代的GE研发部门的理论及实验科学家们, 而非仅是贾埃弗个人, 共同赢得了1973年诺贝尔

物理奖。(当时的美国贝尔实验室也有类似的浓厚学术氛围, 具体可参考文献[3]和[4]。)

贾埃弗发现超导隧穿现象的故事, 建议读者聆听他本人于2008年在德国林岛诺贝尔奖得主大会中的亲自回顾与演说<sup>[5]</sup>, 另外还有很富启发性, 又很真切与具平常心的一段纪录贾埃弗的“看似寻常最奇崛, 成如容易却艰辛”的隧穿实验过程的影片: A story of research: Ivar Giaever-1982<sup>[6]</sup>。

学术经历: 贾埃弗是挪威人, 大学主修机械工程, 毕业后服了一年义务兵役。退伍后开始工作不久, 因遭逢第二次世界大战结束后



图1 贾埃弗与他在GE实验室的热蒸镀机, 当时一套仪器设备的价格“高达”2000多美元, 让贾埃弗迟疑良久(图片取自网络: <https://www.alamy.com/stock-photo/1970s-laboratory.html>)

挪威住房严重短缺，居无定所，因此决定与家人移民加拿大(1954年)。4年后，他很想在工作以及学习数学和物理上更上层楼，因此主动参加GE公司设计和提供的工程师高级培训课程，遂再移民美国(1958年)。接受严格培训后，因为表现优异，他获得了GE研发实验室的正式聘任，是那些年间唯一没有博士学位而获得该实验室长聘职位的工程师/研究员。

笔者恍惚记得，多年前曾经读过贾埃弗当年热切求知的一件往事。贾埃弗说，1963年《费曼物理讲义》出版之后，他时常书不离手，睡觉时也拿来当枕头——应是

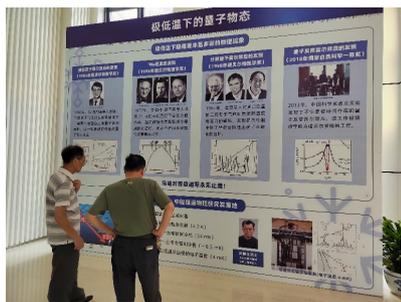


图2 2023年9月，作者访问北京怀柔中国科学院综合极端条件实验室，与总工程师景秀年研究员合影(天津大学李志青教授拍摄)



图3 1959年6月，年轻的江崎在索尼实验室做实验(图片取自 Wikipedia)

指一读再读，读得滚瓜烂熟的意思。所以，在GE工作的不到10年间，贾埃弗靠着自觉与勤奋努力，把自己从一位平凡的、英文不太流畅的机械工程师，转型成为一位有板有眼、成就非凡的物理学家。从1954年一无所有又前途茫茫移居加拿大，到1959、1960年间沉浸于工业研究实验室做出突破性隧穿成果，贾埃弗只花了约5到6年时间，他显然不是吴下阿蒙。

中国和韩国的诺贝尔奖焦虑症：贾埃弗曾经在1975年“文革”将结束前跟随美国(凝聚态)科学界代表团访问中国，之后他又访问过几次。贾埃弗也曾经应邀多次访问韩国并驻地讲学，有时停留时间长达一个月。贾埃弗说他对于中国和韩国在过去几十年的(都市)高速发展印象非常深刻，也很佩服。但是，他又非常不能理解的是两国对于想要获得诺贝尔奖的强烈欲望。

值得反思的一点是，贾埃弗说他觉得在伦斯勒理工学院指导过的中国研究生常想要取悦他的想法和心思，而不是提出自己对科研(和其他)问题的独到见解。他又说，韩国学生“太有礼貌了！”以致他甚至从来不知道韩国学生在课堂上是否领会了授课内容，听懂了哪些？

1985年诺贝尔物理奖得主克劳斯·冯·克利青(Klaus von Klitzing, 1943年生)曾经多次应邀访问中国。听说他每次都被提醒要记得随身携带(复制的)诺贝尔奖章，因为许多学生很企盼跟他(的奖章)合影。图2显示北京怀柔中国科学院综合极端条件实验室入口处的“极低温下的量子物态”大型广告牌，左起第一位即是介绍克利青及其重大科学发

现：量子霍尔效应。

### 3 江崎玲于奈的得奖故事

江崎因在薄锗p-n结(p-n junctions)中发现量子隧穿现象(科学史上首次在固体中测量到的明确电子隧穿行为)，而与贾埃弗和约瑟夫森共同赢得1973年诺贝尔物理学奖。江崎的关键论文发表于1958年1月的*Physical Review*上，也只是一页多长<sup>[7]</sup>。阅读这类开创性学术论文，仿若品读一首(绝句)诗，简洁、流畅、晶莹剔透。获得诺贝尔物理学奖提名时，这篇论文“只”被引用了200余次，到次年底领奖时，约被引用了250次。这一历史性发现奠基于江崎的深刻思维与明察秋毫，他努力突破当时的半导体长晶技术极限，将二极管p型和n型两边的掺杂提升到极高浓度(杂质浓度达到简并状态)，同时又保持锗晶体结构的稳定，进而把p-n结的接面宽度降低至约15 nm，因此得以实现量子行为，出现电子隧穿现象。(注：二极管p-n结的掺杂浓度越高，接面宽度越窄，越有利于产生隧穿现象。所谓“简并”(degenerate)是指因掺杂浓度高，使得费米能级高过导带底部(n型)或低于价带顶端(p型)。)

江崎的两大科学贡献是：(1)发明“隧道二极管”(tunnel diode)；(2)发明“半导体超晶格”(superlattice)。前者(一项看似意外的发明)让他赢得1973年诺贝尔物理学奖，但后者(一项精心构想、落实成真的“思想实验”)对科学和技术的影响可能更为深广。江崎说，上帝赐给人类各式各样材料(如金、银、硅、锗)，上帝又赐给人类创造力，因此他想要发挥创造力，制作出上帝未

曾给予过的“人造材料”，即具有量子力学特性的半导体超晶格。

江崎自东京大学毕业时(1947年)，目睹了东京在美军大轰炸和日本战败后的满目疮痍，到处孤儿、流莺、无业游民如行尸走肉，因此决定放弃研究所学业而进入产业界工作，他期盼投身工业界可以促进经济发展和救国济民。他的这一动机和决定，因缘际会，让他及时接触到半导体和晶体管，更使他成为有强烈意识地把量子力学引入日本电子工业的第一人，日本电子工业也因此得以转型，从此脱离真空管时代，迈向晶体管时代。在神户川西机械制作所(神户工业前身)工作约8年半后，江崎于1956年辗转进入当时初创的、仍可能会随时倒闭的索尼公司工作(图3)。在那里，他很快凭借着在东京大学修课时学到的对量子固体物理学的热爱与深刻理解，在1957年发明了隧道二极管。不过，笔者认为必须强调，如果没有当时的日本电子工业基础，以及东京大学教授对固体物理和战后全球(尤其是美国)半导体研发的密切掌握，江崎肯定难以只身做出世界级突破性贡献。

离开舒适圈，探索新疆域：江崎测量到p-n结界面中的电子隧穿现象之后——在正向偏压一定范围内的“负微分电导/电阻”现象，声名大噪。1958年他应邀顺道访问美国贝尔实验室，在实验室的入口处他读到该实验室创始人，电话发明者贝尔雕像上的一句话：“偶尔离开熟悉的路径走入森林，你肯定会发现一些以前从未见过的东西。”(Leave the beaten track occasionally and dive into the woods. You will be certain to find something that you have never seen before.)于是

他决定离开索尼老东家的舒适圈，坦然面对和接受可预期的文化冲击与震撼，于1960年毅然移居美国，任职IBM公司(图4)。他转任IBM的动机之一，是因为他认为IBM有充裕经费可以进行昂贵实验。几年之后，他和合作者朱兆祥及张立纲利用分子束外延技术(molecular beam epitaxy, MBE)开启了半导体量子阱和超晶格的一片广阔研发天地，迄今不衰。江崎认为，人工超晶格的制作成功是一种“思想实验”的落实与成真。他说，有了纳米尺度精确堆栈的周期性半导体超晶格，如 $\text{GaAs}/\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ ，科学家就可以直接亲手操控薛定谔方程式，进行准一维量子力学课题的探索，把思想实验具体落实成为一个研究室里的/手边的可调控、可操作的物理系统。(所以，我们可以强调：半导体超晶格既是思想实验的落实成真，也是纳米科技的开端。)

先在此附记两件题外话。(1)科普名著《费曼手札：不休止的鼓声》一书的英文原名为*Perfectly Reasonable Deviations from the Beaten Track: The Letters of Richard P. Feynman*；(2)美国已故诗人佛洛斯特(Robert Frost)有一首脍炙人口的诗：“The Road Not Taken”，结尾一句是：“Two roads diverged in a wood, and I— / I took the one less traveled by, / And that has made all the difference.”这本书名和这首诗名，与贝尔名言建议的暂时离开舒适圈，看看周遭，有异曲同工之妙。

1969年，江崎和朱兆祥的首篇超晶格论文(“Superlattice and negative differential conductivity in semiconductors”)投稿到*Physical Review*时被拒绝，一位审稿人批评

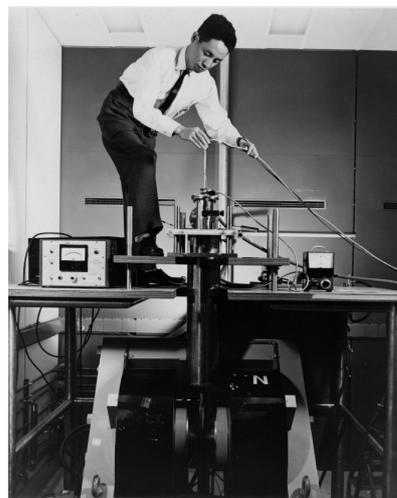


图4 江崎在IBM做实验。即便获得了诺贝尔奖，在短暂激情过后，亲自动手做实验乃是研究者本色，也是公司赋予的职责(图片取自：Leo Esaki | IBM)

说：论文令人高度怀疑而且内容毫无新意。所以这篇开创性论文只落得于1970年发表在公司内部期刊*IBM Journal of Research and Development*。过了十余年，它开始受到广泛关注，后来更是声势赫赫，成为了一篇凝聚态物理学经典的文献。(发现准晶体的首篇论文投稿到*Journal of Applied Physics*后也被期刊编辑拒绝，未送审，见文献[8]。)

#### 4 隧穿研究的漫长旅程

江崎一生的成就与声名，来自于他在人工半导体结构中实现量子隧穿现象，以及开发基于量子力学原理(尤其是隧穿特性)运作的电子组件。欲在固体结构中实现电子隧穿行为，通常需把异质结构的界面——相当于一个势能壁垒(potential barrier)——制造得很薄，形成弱势垒，以便电子波函数可以穿透。江崎把他在诺贝尔奖颁奖典礼的演讲题目简洁睿智地订为《隧穿研究的漫长旅程》(Long journey

into tunneling)<sup>[9]</sup>，文章的精彩结论中使用了许多相关语，翻译如下(为突出江崎的巧思，保留相关语的英语原文)：

“当然，我深深知道，我的获奖得自许多同事及朋友的长期合作与重要贡献。隧道二极管是我在日本完成的工作，其余(量子阱和超晶格)都是在美国进行的。因为我的隧穿研究(my journey into tunneling)还持续不歇，所以我今天的演讲没有达到任何结论。然而，我想指出，当前的世界存在许多高墙壁垒(high barriers)：国家、种族、教条之间的壁垒。不幸的是，其中有些壁垒厚而强(thick and strong)。但我希望，我们痛下决心寻找出一条能够轻易又自由隧穿通过(tunnel through)这些壁垒的路径，拉近世界彼此的距离，以便每一个人都得以分享阿尔弗雷德·诺贝尔的遗产/遗愿——信奉和平主义，反对战争。”

读者宜记住，以上是1973年12月作的演讲。整段结论，至今(地缘政治激烈动荡的2025年)仍然，甚至更加迫切适用。

2003年，我曾与江崎教授有过一面之缘。后来我有一小段文句写在文献[10]中：“几年前，江崎玲于奈应张俊彦校长之邀到台湾交通大学演讲，他谆谆告诫学生，读书必须要‘温故知新’。‘温故知新’四个字，他特别用汉字写出，并说明是孔子的老话。”演讲当场，江崎带给我的感受是他接受了儒家的熏陶(而汤川秀树(日本首位诺贝尔奖得主)则涵泳于道家的逍遥与自得)。

## 5 结语

1992年，67岁的江崎再度变换跑道，接受邀请担任日本筑波大学

校长职位。对他而言，从美国营工业界的一名凡事亲力亲为的研究员，摇身一变成为一名“公务员”和教育者及规模庞大复杂的国立大学领航员/管理者，无疑是一项巨大转变和艰巨挑战。有趣的一点是，日本政府一板一眼，依规定只分配给他一栋普通的公务员住宅。由于他的国外朋友多，接待不便，而且一些家具无处安放，于是他拿出诺贝尔奖金，自费盖了一栋“校长宿舍”。从此开启了他的另一段长达30多年的精彩教育家人生。

撰写本文时，意外得知2025年3月12日是江崎的100岁生日。又，BCS理论于1957年发表之后，广受许多实验物理学家欢迎，但众多理论学家则抱持着怀疑的心态。幸而江崎和贾埃弗的明确实验证据，及约瑟夫森的理论预测很快也被实验证实，遂令BCS理论随即确立了它的不朽地位，也让笔者称之为“隧穿三雄(The Tunnel Trio)”很快地赢得了诺贝尔奖桂冠。

香港科技大学沈平认为，对实验者而言，贾埃弗的隧穿实验是一个“理想的”实验，因为它是一个很简单实验，却带来了很丰富的结果并蕴含着重大物理信息。的确，贾埃弗在他的诺贝尔奖颁奖演讲文中，对其实验的“简单性”有很流畅的呈现与明晰的讨论，读者请自行参考阅读[11]。沈平又提及，江崎和巴丁(John Bardeen)的演讲都很难理解。江崎常常一个句子没讲完，就跳接到下一个句子了，不知是他的一种演讲(不良)习惯，还是由于使用英语毕竟未能达到畅所欲言的程度，或者他的思路是跳跃式的。巴丁(面对公众时)可能有些语言障碍或口吃，不仅他的演讲听

众，修他的课以及问他问题的学生，都反映巴丁常常对着黑板喃喃自语，或只是一再重复他已说过的几个字词，不能清楚回答学生，帮助厘清疑惑。(其实，江崎和汤川都曾自述，说他们进大学之所以选择科学领域的主要原因之一是因为可以不必与人多交谈。)

贾埃弗及江崎的精彩自传，请参考伊瓦尔·贾埃弗著，邢紫烟、邢志忠译，《我是我认识的最聪明的人：一位诺贝尔奖得主的艰辛旅程》(上海科技教育出版社，2018年)，及江崎玲于奈著，姜春洁译，《挑战极限：诺贝尔物理学奖获得者的传奇人生》(北京中信出版社，2012年)。

**致谢** 感谢辅仁大学吴至原副教授、天津大学李志青教授和德国马克斯·普朗克固体化学物理研究所张海婧，在本文发表前的仔细阅读及提供修正意见。

## 参考文献

- [1] 林志忠. 物理, 2017, 46(10): 697
- [2] Giaever I. Phys. Rev. Lett., 1960, 5: 147
- [3] 林志忠. 物理, 2023, 52(5): 361
- [4] 林志忠. 物理, 2024, 53(12): 848
- [5] Ivar Giaever, Discovery of Superconducting Tunneling. <https://mediatheque.lindau-nobel.org/recordings/31257/discovery-of-superconducting-tunneling-2008>
- [6] A Story of Research: Ivar Giaever-1982. <https://www.youtube.com/watch?v=dEzR-fWM9gXo>
- [7] Esaki L. Phys. Rev., 1958, 109: 603
- [8] 林志忠. 物理, 2017, 46(6): 396
- [9] Esaki L. Rev. Mod. Phys., 1974, 46: 237 (江崎诺贝尔奖颁奖典礼演讲文)
- [10] 林志忠. 物理, 2008, 37(12): 875
- [11] Giaever I. Rev. Mod. Phys., 1974, 46: 245(贾埃弗诺贝尔奖颁奖典礼演讲文)