

• 人物评传 •

赤崎勇：以赤诚点亮蓝光LED的幸运者

Isamu Akasaki:

The Fortunate Pioneer Who Lit the World with Blue LEDs Through Unwavering Dedication

宋怡 /SONG Yi^{1,2} 徐飞 /XU Fei¹ 魏荣 /WEI Rong^{1,2}

(1. 中国科学技术大学人文与社会科学学院科技哲学系, 安徽合肥, 230026;

2. 中国科学技术大学马克思主义学院, 安徽合肥, 230026)

(1. Department of Philosophy of Science and Technology, School of Humanities and Social Sciences,
University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui, 230026,

2. School of Marxism, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui, 230026)

摘要: 赤崎勇是日本的工程学和物理学家, 以其在半导体材料, 尤其是氮化镓 (GaN) 基蓝色发光二极管 (LED) 领域的开创性研究荣获了2014年诺贝尔物理学奖。赤崎勇从普通家庭起步, 在工业界和学术界历经辗转, 却矢志不渝直至最终做出蓝光LED重要发明。分析其创新探索之路, 对于理解如何将个人兴趣与社会需要相结合, 以不懈努力成就幸运发现高光时刻的科学探索机制, 无疑具有标本剖析的价值。

关键词: 赤崎勇 蓝光LED 氮化镓 科技创新

Abstract: Isamu Akasaki is a Japanese engineer and physicist who was awarded the 2014 Nobel Prize in Physics for his pioneering research in semiconductor materials, particularly gallium nitride (GaN)-based blue light-emitting diodes (LEDs). Isamu Akasaki started from an ordinary family and went through twists and turns in the industrial and academic fields, but remained steadfast until he finally made the important invention of blue LED. Analyzing his innovative exploration path and understanding how to combine personal interests with social needs through unremitting efforts to achieve the scientific exploration mechanism of lucky discovery of highlights undoubtedly has the value of specimen analysis.

Key Words: Isamu Akasaki; Blue LED; Gallium Nitride (GaN); Scientific and technological innovation

中图分类号: K811; O4-0 DOI: 10.15994/j.1000-0763.2025.12.011 CSTR: 32281.14.jdn.2025.12.011

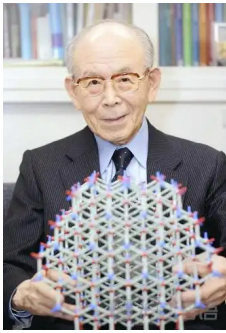
基金项目: 国家社会科学基金重点项目“强化现代化建设科技人才支撑的实现路径与对策研究”(项目编号: 23AZD040); 安徽省新时代育人质量工程重点项目“和谐研究生导学关系的构建路径研究”(项目编号: 2024jyxggyjY032); 中国科学技术大学新文科基金项目“基于价值导向的科技人才评价机制变革研究”(项目编号: FSSF-A-250303)。

收稿日期: 2025年9月3日

作者简介: 宋怡 (1980-) 女, 安徽肥东人, 中国科学技术大学科技哲学系博士研究生, 中国科学技术大学马克思主义学院副教授, 研究方向为科技哲学与科学史、科学技术与社会。Email: imena80@ustc.edu.cn

徐飞 (1961-) 男, 江苏扬州人, 中国科学技术大学科技哲学系教授, 研究方向为科技哲学与科学史、科学技术与社会。Email: xufei@ustc.edu.cn

魏荣 (1972-) 女, 安徽临泉人, 中国科学技术大学科技哲学系教授, 中国科学技术大学马克思主义学院教授, 研究方向为科学技术与社会。Email: hfweirong@ustc.edu.cn



赤崎勇

2014年10月7日，瑞典皇家科学院宣布将当年的诺贝尔物理学奖授予日本科学家赤崎勇（Isamu Akasaki）、^[1]天野浩（Hiroshi Amano）、以及美籍日裔科学家中村修二（Shuji Nakamura）以表彰他们在蓝光LED（蓝色发

光二极管）开发领域做出的划时代贡献。评选委员会在获奖成就的新闻稿中指出：“如果说白炽灯照亮了20世纪，那么21世纪将被LED灯照亮。”^[2]三位科学家中，赤崎勇和天野浩是师徒关系，师生两人同时获诺贝尔奖这在日本当时还是第一回。获奖时赤崎勇已经85岁，他自己也没有预期过会获得这样的荣誉。

蓝光发光二极管的研发究竟有多难，何以能获诺贝尔奖？为何最终是赤崎勇做出这样的贡献，是什么让他能够不离不弃坚持走在他人纷纷放弃的道路上，直到做出重大创新？回顾赤崎勇的生涯路，既无闪亮的教育背景，早年还在企业和大学间多次转业，这几乎就是大多数芸芸众生漫漫人生路的翻版，几近乏善可陈，然而，赤崎勇却以赤子之心的坚守和别具一格的求索，最终将21世纪的第一盏蓝光LED灯成功点亮。

一、蓝光LED为何难以点亮？

赤崎勇在回忆他开始蓝色LED工作时说：

在我开始对半导体发光元件进行研究时，蓝色LED实用化的前景十分渺茫。当我意识到这一情况时，却油然而生一种直觉：‘这就是我要做的事。’当然，这确实是一次巨大的‘赌博’。但当时我并没有考虑成功与否，而是下了决心，走前人未走过的道路。（[3]，p.2）

蓝色发光二极管（LED）的研发困难，主要来自以下几个技术难题和科学挑战：

其一，材料的选择与发光效率：发光二极管的基本原理是通过半导体材料在电流激发下

发光，而要实现蓝光发射，首先要找到合适的半导体材料。早期的红色和绿色LED研发相对较为简单，因为这两种颜色的发光波长可以通过常见的砷化镓铝（AlGaAs）和磷化镓（GaP）等材料实现。然而，蓝光波长较短，且具有较高的能量要求，这意味着必须找到新的材料才能产生蓝光。

其二，氮化镓的缺陷：氮化镓（GaN）是一个理想的蓝色发光材料，但其晶体结构的缺陷严重影响了其性能。氮化镓晶体在生长过程中，由于其与硅等传统半导体材料的晶格不匹配，往往产生大量缺陷和不规则的晶格结构，这些缺陷不仅影响了材料的光电转换效率，还增加了生产难度。因此，要使氮化镓能稳定高效地发光，克服晶体缺陷是一个巨大的技术挑战。

其三，高效蓝光源的开发：相比于红光和绿光，蓝光的发射需要更高的驱动电压，这使得开发一个高效且稳定的蓝色LED变得更加复杂。要实现这种高效能的发光，除了合适的材料外，还需要新的制造技术，包括高质量的氮化镓薄膜、精确的层间结构控制以及合适的电流注入技术。

赤崎勇等科学家的贡献正是在这些技术难题上取得了以下显著进展：

其一，氮化镓薄膜的成功生长：赤崎勇和天野浩的突破性贡献在于开发出能够在蓝色LED中使用的高质量氮化镓（GaN）薄膜。通过采用金属有机化学气相沉积（MOCVD）等先进技术，成功克服了氮化镓晶体生长中的缺陷，显著提高了GaN的发光效率。

其二，p型氮化镓的发现：氮化镓的另一个关键技术突破是p型氮化镓的成功实现。在半导体中，p型和n型材料的结合是实现发光二极管的基础。由于氮化镓的物理特性，长期以来难以实现其p型掺杂，限制了其应用。然而，赤崎勇和天野浩通过巧妙的掺杂技术成功制造出了p型氮化镓，使得蓝光LED得以高效工作。

其三，电流注入与光效率的提升：通过不断优化LED结构，特别是在电子和光子注入效率方面的提升，赤崎勇等人的团队使得蓝光

LED的发光效率大幅提高。这使得蓝光LED不仅具备了发光能力,还具备了实用性,能够在商业上得到广泛应用。

其四,量产与应用方面:突破这些技术瓶颈后,赤崎勇与天野浩等科学家为蓝色LED的量产奠定了基础,为未来的高效白光LED、显示技术、照明系统等领域的应用开辟了新的方向。^{[4], [5]}

因此,赤崎勇等人的成功不仅仅是技术上的突破,更是解决了“氮化镓的高效生长”和“p型氮化镓的掺杂”这两个关键性难题,从而使蓝色发光二极管得以商业化应用,最终实现了照明和显示技术的革命。

二、赤诚少年对好奇探索的无尽向往

1929年1月30日,赤崎勇出生于日本鹿儿岛县知览町。他的父亲经营一家佛具店,少言寡语不善社交,平时挂在嘴上的口头禅是:“能做喜欢的事就好了”。([3], p.15)母亲面带微笑、心地善良,对任何人都很亲切,总是对孩子们说:“只要不给人添麻烦,就勇敢地走自己喜欢的道路!”。([3], p.16)少年赤崎勇好奇心特别强,他着迷于矿石,对于晶体生成变化的形态和不同矿石展现出的各种各样性质充满兴趣。这一爱好似乎无意中指引了他未来的研究方向。

1929年正逢世界经济危机,他的小学和中学时代又是第二次世界大战最激烈的时期。少年生活异常困苦,但他对知识的渴望却愈发强烈。战争让他很难有时间系统学习,但他抓住一切机会,贪婪地阅读借来的书籍。父母尽管条件有限,但总是尽最大努力支持他。哥哥也是他在科学探索之路上的榜样。对赤崎勇而言,家庭的影响无形中奠定了他对生活的态度,“勇敢做自己喜欢的事”这一信念深刻地影响了他的整个人生。

从小学到高中,赤崎勇一直对数学和理科充满兴趣。当他了解到京都大学有着自由的研究氛围,便参加了该校理学系的入学考试。1949年,赤崎勇进入京都大学,那年恰逢汤川

秀树教授获得诺贝尔物理学奖,^[6]这让他倍感自豪,也坚定了他从“小事做起,勇敢尝试新的事物”的决心。京都大学为学子们提供了丰富的学术交流机会,学生们常与各种类型的教职人员进行深入讨论。赤崎勇在大学二年级加入了物理化学研讨班,开始阅读大量原版书籍,拓宽知识面。他还听取工程学相关课程。荒胜文策老师的《物理学通论》讲座给他留下了深刻印象。老师将理论与实验比作两只交替上升的手掌,并讲到:“有时是理论先行,再通过实验验证;有时是实验结果先行,促使理论的出现。”([3], p.34)这句话对赤崎勇的科研生涯产生了深远影响。特别是在研究氮化镓的过程中,他常常回想起这段话,并总结出自己的信念:与其思考做不到的理由,不如动手去做。

1952年,赤崎勇从京都大学毕业。当时的就业形势非常严峻,但大多数理科生都怀有强烈的使命感,希望通过科学振兴日本的工业。神户工业,时称“神户工业大学”,吸引了大量优秀的理工科人才,且有着自由开放的学术氛围,强烈地吸引着赤崎勇。因此,他选择加入神户工业股份公司,并被派往明石大久保制作所,开始他的职业生涯。

三、良师助力对技术攻关的不懈坚持

1952年的神户工业股份公司第一技术部人才济济,汇聚了包括1973年诺贝尔物理学奖得主江崎玲于奈^[7]和成田信一郎(后任大阪大学教授)等至少15位杰出的材料学学者。第二技术部(明石)则有高木俊宜、佐佐木昭夫(后为京都大学教授)、三杉隆彦(后任富士通研究所所长)等学者。([3], p.37)这不仅说明了赤崎勇所处的环境中高手如林,也反映出日本科学技术在这一时期的高速发展。赤崎勇的成长和进步,也深受这些优秀人物的影响。

赤崎勇最初被分配到神户工业的第二技术部(明石),负责研究大型真空管、发射X射线的特殊真空管等金属材料。他的任务是找出电子发射效率低的原因。1953年,日本进入电视时代,神户工业将显像管的国产化列为当务

之急，赤崎勇从1954年起参与显像管的研发工作。最初阶段，团队对制造过程几乎一无所知，实验接连失败。但赤崎勇从未放弃，这一方面是因为他具有坚定不移的探索精神，另一方面也反映了当时社会和企业界对科技探索失败结果的宽容和支持。在这个过程中，赤崎勇第一次接触到了“冷光”现象，即发光过程中不伴随热量的现象。这次与“冷光”的邂逅彻底改变了他对物理学的认知。尽管初次接触这一现象时，他沉浸其中，甚至有时会独自在暗室中继续观察，但他当时并未意识到，这一现象将伴随他一生。与他搭档一起开发电子枪的是前辈中村正。中村后来成为世界上开发出低电压发光的荧光显示屏‘Itron’的第一人。赤崎勇一直十分怀念那些被中村督促着进行荧光屏研发工作的日子。（[3]，p.41）研发高品质荧光屏的过程中，赤崎勇突发奇想，想到了制作荧光屏单晶体薄膜的方案。尽管最终未能成功，但这一想法为他后续的结晶外延研究奠定了基础。荧光屏的研发完成后，他转向了闪烁检测器的开发，进一步加深了与半导体发光元件的关系。

20世纪50年代后期至60年代，日本经济进入高速增长期，电子工程学时代也随之到来。8所大学设立了电子工程学科，重点开展半导体理论与技术的教学与研究。名古屋大学工程学系基于原有的电气学科，成立了电子工程学科，而赤崎勇的上司有住彻弥教授被任命为该系半导体工程学讲座教授，他邀请赤崎勇一同前往。赤崎勇尚在犹豫是否辞去神户工业的职务转向单晶体研究，不想在有住教授的安排下入职手续迅速办妥，他也只能接受这一结果。回顾此事时，赤崎勇对能去名古屋大学深感感激，因为这为他追求制作单晶体（尤其是“发光”单晶体）的理想提供了契机。这一时期，日本的高等教育为科学技术发展提供了强有力的基础支撑，高校人才选拔相对宽松，使得许多有志于科研的人才能顺利获得机遇，开展科学探索，同时也从一个侧面说明，科技创新与产业创新间始终具有十分紧密的融合关联。

1959年，赤崎勇来到名古屋大学，开始研

究锗单晶体，这一材料对当时半导体领域至关重要，他利用这种材料制造了锗晶体管。在进行半导体研究时，赤崎勇确立了以下几项基本原则：

1. 自己亲手制作高质量的单晶体；
2. 研究制作方法对晶体性质的影响，确保研究结论自己能够信服；
3. 实现晶体在器件中的最佳应用。

这些原则贯穿了赤崎勇整个科研生涯，也在研究方面奠定了成功的基础。

真正开始气相外延生长的研究，始于赤崎勇与当时还是研究生的西永颂一起做的工作。来到名古屋大学半年后，神户工业的后起之秀和田隆夫作为助教也加入了进来。他是电路专业的，没有直接参与结晶生长的研究，但赤崎勇与他经常讨论半导体物质特性方面的问题。新婚的和田夫妇还常常邀请赤崎勇去吃晚饭，也令他感激和怀念。（[3]，p.50）1960年11月，赤崎勇结婚。他的妻子性格开朗，并深受赤崎勇学生的妻子们尊敬。赤崎勇几乎独自完成了实验室的设备配置、材料采购以及结晶相关实验，每天都忙得不可开交。即便休息日只有新年三天假期，星期天也不休息，连续工作。直到1964年3月，赤崎勇在名古屋大学的五年间，从助教一路晋升为讲师、副教授，这一阶段被认为是他作为研究者的起点。从他全情投入工作的状态可以推测出家庭的稳定为科研工作提供了重要的支持。

当人们问赤崎勇何时产生了成为科学家的想法，他回忆道，也许是在名古屋大学时。从零开始搭建实验室，和研究生共同探讨课题等，都成为他宝贵的经验。此外，他还积极参与其他学科的讲解和讨论，并向其他理学系教授请教了大量问题，赤崎勇曾经从宇宙物理学的权威早川幸男那边借来了测量微量放射线量的装置“脉冲高度分析器”（pulse height analyzer）。他一直对早川老师能将这么贵重的装置借给他心怀感激。（[3]，p.52）大学的这种特有的技术资源氛围往往是促成科技创新的重要条件。直到后来在松下电器工作，赤崎勇依然得到了名古屋大学老师们的特别关照。

四、社会需要对技术突破的强力召唤

半导体元件最前沿的研究与开发需要大量的设备和资金支持。20世纪60年代后,日本企业逐渐承担起这一重要任务,迎来了企业设立中央研究所的浪潮。松下电器产业于1953年设立了中央研究所,并在1960年设立东京研究所并作为关东地区的科研中心。松下电器创始人松下幸之助曾明确表示:“为了应对未来的技术革命,必须积极推进电子工程学的基础研究。”([3], p.58)这反映了当时日本企业领导者对技术革命的前瞻性理解,同时也凸显了基础科学研究在技术应用中的重要性。

如何才能实现技术突破呢?东京研究所的管理模式与传统有所不同。东京研究所由所长领导,研究室负责人主要是来自全国各大学的年轻副教授,代表了新一代的科研力量,涵盖了东京大学、名古屋大学等知名高校及日本电信电话公社电气通信研究所(现NTT武藏野研究开发中心)等科研机构。各研究室之间既有竞争意识,又注重学术交流,致力于推动世界一流科研成果的实现。与传统的企业研究所不同,东京研究所的管理模式选择了外聘大学优秀副教授作为研究室长,而非依赖松下内部的人才。这一管理科技创新与产业创新在实践层面融合的模式尤其强调人才的科研能力,而非资历。创新的组织结构和自由氛围吸引了大量优秀科研人才。赤崎勇因其在名古屋大学任职期间的表现受到小池所长关注,于是受邀加入松下电器东京研究所。

就像之前他从神户工业到名古屋大学一样,这次转业依旧是在他人极力邀约和支持下促成的。1964年4月,年仅35岁的赤崎勇成为松下电器东京研究所最年轻的研究室长。首次与所长会面时,他明确表达了自己的研究方向:“发光半导体,特别是Ⅲ-V族化合物半导体。”([3], p.62)研究课题随即确定。这一过程不仅反映了赤崎勇的科研能力被高度信任,同时折射其技术攻关方向符合当时的社会需求,也体现了当时的企业研究所科研启动相对容易,

为后续的创新工作开了好头。

赤崎勇的首个重大科研项目是制作砷化镓(GaAs)单晶体,特别是提高其纯度。20世纪60年代,关于高纯度砷化镓结晶的研究才刚刚起步,世界范围内尚未形成成熟的技术。他的研究团队采用了布里奇曼法(Bridgman Method)制作的块状单晶体作为基板,通过自制装置使用气相外延法(VPE)成功生长出了高纯度的砷化镓单晶体,杂质浓度降到了 10^{14} 以下。该成果在1968年莫斯科半导体物理国际会议上发布后,获得了广泛的好评。高纯度的砷化镓单晶体不仅展现出极高的材料质量,还表现出与常规砷化镓截然不同的物理性质。赤崎勇深刻体会到,半导体材料作为“结构敏感”物质,其物理特性受杂质、缺陷种类及数量的影响极大。正是这一认识,成为他后续研究氮化镓(GaN)单晶体的理论基础与内在动力。由于制作出了高品质的砷磷化镓单晶体,赤崎勇与和他一起研究的浅尾一郎联名获得了小池所长亲自颁发的“东京研究所第1号”奖状。为了制作块状磷化镓单晶体,他与有贺弘三和桥本雅文一起研究了液体密封产生高压的方法(LEC法)。1969年,首次在日本成功运用了这种方法。([3], pp.70-71)他还与桥本、小野拓弘一起,使用同样的红色LED,制作出了双向发光的装置。([3], p.72)从1966年开始,他与桥本一起对之前就在关注的氮化物半导体之一氮化铝进行了研究。([3], p.74)由此可见,良好的团队合作能力也是科技创新不可欠缺的基本素养。

1973年,赤崎勇决定将研究重点转向蓝光LED,因其所需的材料带隙能量至少为2.6电子伏,而氮化镓作为具有3.4电子伏带隙能量的半导体,自然成为制作蓝光LED的理想材料。一旦蓝光LED的研究取得重大突破,那么人类便打开了通往全彩LED显示时代和高效白色照明时代的大门。

然而,尽管全球研究者在氮化镓蓝光LED的研发上投入大量精力,但由于结晶质量始终难以提升,且无法成功制备出p型结晶,许多研究者逐渐放弃了这一领域。但赤崎勇却决

心要将蓝光LED的研究作为自己的“毕生事业”。这种赤诚既可溯源到他自小受到的家庭教育——“勇敢做自己喜欢的事”，也与早期科技创新工作中持久地“在失败中坚持”的精神息息相关。赤崎勇的坚持不仅是科学家的责任感，更是对社会需求和技术进步的深刻理解。由于当时缺乏专门的设备，赤崎勇对用于红色LED电极制作的真空蒸镀装置进行了改造，并开始独自开展实验。他选择了分子束外延法（Molecular Beam Epitaxy, MBE法），使用金属镓和氨气作为原料，首次尝试用MBE法制作氮化镓单晶体。在小林敬幸的帮助下，他成功克服了重重困难，并最终制作出了不完全均匀的氮化镓单晶体。通过电子线照射后，他确认这些结晶为氮化镓。

1974年初，赤崎勇凭借这一创新方法成功制作出了世界上首个MBE法制备的氮化镓单晶体，虽然这项成果仅向日本通商产业省报告，并未立即公开发表。在研究蓝光LED的同时，赤崎勇与大岛正晃、桥本、松田信英一起，还研究了可视激光。1979年10月，他们运用液相外延生长法制作了砷化磷化镓红色激光震荡在日本获得成功。但这项技术的成功比美国伊利诺伊大学晚了几个月。（[3]，p.74、81）

进入20世纪70年代，松下电器的经营环境日益严峻，公司对基础材料研究的支持逐渐变得困难。但赤崎勇依然坚持完成蓝色发光元件的目标，尤其是制作氮化镓pn结的蓝色LED。1974年，通商产业省（现日本经济产业省）启动了“未来革新技术”研究项目，赤崎勇迅速提出了以《实现氮化镓蓝色发光元件》为题的申请，并在审查会后再次带着数据访问了通商产业省，或许正是这些数据的说服力使得他的项目获得了批准。作为通商产业省的核心项目，“蓝色发光元件研究委员会”成立。1975年，为期三年的“与蓝色发光元件开发相关的应用研究”开始启动，并成立了包括两家民营企业的产学研联合研究团队。这种跨界合作模式在当时的日本尚属罕见。接下来的三年里，除了新加入的大木芳正、丰田幸雄外，还有身兼其他项目的小林、大岛、松田等年轻研究者也参

加了进来。（[3]，p.83）团队进行了一系列实验，虽然多次失败，但他们始终没有放弃。他们同时采用了MBE法和HVPE法。1978年，利用HVPE法，他们成功开发出比以往更加明亮、发光效率更高的蓝光LED，其亮度足以在白天明亮的房间内依然可见。这一成果标志着项目的初步成功。从1979年开始，赤崎勇重新探索氮化镓单晶体的制作方法。尽管结晶仍然不均匀，但他首次通过MBE法成功制作出了氮化镓单晶体。

松下电器东京研究所设立之初是从总公司脱离出来，完全独立的。资金100%由总公司拨款，研究所的研究员可以什么都不考虑，埋头科研，研究气氛相当自由。但随着消费者运动的高涨、石油危机等的影响，松下电器自身的经营环境变得越来越严峻，东京研究所也不可避免地受到影响。1971年，研究所组织变更为“松下技研股份有限公司”，研究所的方针发生了巨变。对于不能很快实现商品化的基础研究，要求研究人员自己寻求资金。（[3]，p.88）在此期间，赤崎勇重新收到来自名古屋大学电子电气工程专业的邀请，但他最为放不下的是，辞职后，与他一同苦乐相伴的研究团队中的成员将被如何安排。

1981年夏天，赤崎勇决定回到名古屋大学。松下电器使用的旧实验设备以折旧价格转让给名古屋大学，赤崎勇得以继续深入探索氮化镓的研究。1987年，在当时“新技术开发事业团”（现为科学技术振兴机构，JST）的协调下，^[8] 丰田合成股份公司与名古屋大学开展了产学研合作，共同启动了蓝色发光二极管的研发项目。

在那个时期的日本，大学与企业之间的合作尚属少数，许多人对这种产学协作模式持怀疑态度，认为“大学不应成为企业的附庸”。在名古屋大学，也有一些研究人员对这种合作形式表示否定。然而，赤崎勇和他周围的人，包括当时的工程学系主任丸势进教授，都认为，产学协作的关键在于合作方式。如果能在尊重各方立场的基础上，发挥各自的特长，协同合作，最终推出新的研究成果，这种合作形式就是值得推崇的。

五、得于偶然成于必然的内在逻辑

结晶生长会随着温度、气流等各种条件的变化而改变。在名古屋大学进行锗的外延生长研究时,对结晶生长表面的观察是赤崎勇每天的必修课。孩童时就喜欢观察矿物的他,对于结晶有着无尽的兴趣。1977年至1978年间,一有时间他就与大木君一起在荧光显微镜下观察用HVPE法制作的氮化镓结晶。在充满了缺陷的结晶中,偶尔会出现非常微小的纯洁结晶。这种现象说明氮化镓就算极其微小也还是能够“形成纯洁的结晶”的,也就是说可能性“不是0而是1”。当时深入思考“如此小的结晶如何扩展到整个结晶整体(晶元)”时,他决心再次返回结晶生长学的原点。([3], p.85)这不仅对赤崎勇的氮化镓研究,而且对世界范围内处于闭塞状态的氮化镓研发都是一个重大的分岔路口。如果那个时候他放弃了,也许氮化镓的研究又将推迟许多年。

1981年8月,赤崎勇开始了第二次在名古屋大学的研究工作。全面支持他进行这一计划的丸势进、内山晋教授等主持的名古屋大学电气系研究室向当时的文部省说明了设置洁净实验室的必要性,最终洁净室设置和赤崎勇的设计提案都获得了认可。给予他的研究室很多关照,并积极推进结晶生成相关实验室的实际准备工作的,是当时的名古屋大学副教授泽木宣彦。泽木甚至还在居住上给了赤崎勇很多帮助。除了从松下电器东京研究所那里带来的装置外,他还收集了西永颂教授以前使用过的旧装置的零部件,并从科研集团和民间财团的赞助那里筹措资金制作了实验装置,他的项目被编入了名为特定研究的科研经费预算中。([3], pp.95-96)在校方和政府的支持下,他着手设计建设了洁净实验室,带领团队成员(包括和他同获诺奖的学生天野浩以及当时攻读博士课程一年级的出康夫)凭借自己的力量制作出了改良型机器——MOVPE一号机。由此可见,在大学从事技术开发,不但需要体制的支持,更需要多方的协作。

在设计MOVPE装置时,赤崎勇已经考虑到未来的研究方向,包括含氮化铝的氮化铝镓混晶以及含氮化镓的氮化镓混晶,因此在设计中预留了相应的空间。天野浩在加入研究室时便提出要参与氮化镓研究,并很快开始了氮化镓结晶的实验。天野工作迅速且手法娴熟,与赤崎勇一样对蓝光LED充满热情。虽然实验团队日夜不停地努力,但实验结果却始终不尽如人意。由于晶格常数差异极大,氮化镓结晶无法在蓝宝石基板上进行二维生长,即无法附着在蓝宝石上。为了缓解界面能量,他们设想在蓝宝石基板与氮化镓生长层之间加入一个缓冲层。1983年,赤崎勇首次将这一构想告诉天野浩,并选择了氮化铝、氮化镓、氧化锌和碳化硅四种材料作为缓冲层的候选材料。但是实验进展依旧不顺利。到了1992年,氧化锌作为缓冲层被成功应用于HVPE法中,制备出了高质量的氮化镓单晶体衬底。天野浩不分昼夜进行实验,毫不松懈。通过提高气流速度,他们成功制备出质量远超之前的氮化镓单晶体。这一成果的突破性意义不仅在于氮化镓单晶体质量的提高,更重要的是,低温缓冲层技术的应用为异种基板上氮化镓外延生长开辟了新的方向。

天野浩成功完成缓冲层实验的时机恰逢电气炉状态不佳。那时,赤崎勇的实验室几乎成了“不夜城”,实验设备因过度使用而频繁出现故障。电气炉有时无法正常升温,温度反而意外地达到了他所设想的低温条件。天野浩几乎每天都在点燃MOVPE装置,至少完成了超过1500次实验。当结晶最终被取出并观察时,表面异常整洁且闪闪发光。天野浩曾怀疑:“是不是忘了投放原料了?”([3], p.106)他将结晶放置在阳光下,尝试从倾斜的角度观察表面反射光,竟然看到其表面泛出像彩虹般的七色干涉光。在显微镜下仔细观察,结晶结构清晰可见。天野浩激动不已,立即将这个结晶带到赤崎勇那里。他指示天野浩,必须对这颗氮化镓结晶的结晶学特性进行详尽的分析,包括X射线反射性、电子运动特性以及残留杂质浓度等电气特性,最为关键的是要仔细测量“化学

发光”等光学特性。经过细致的调查，确认所有重要特性均有显著提升，这颗结晶比以往的氮化镓材料有了巨大的进步。赤崎勇最终确信，“新的氮化镓结晶诞生了”。（[3]，p.107）这种前所未有的氮化镓结晶，不仅能作为半导体发挥作用，而且在外观和实质上都达到了他长年追求的理想。

在赤崎勇与天野浩密切合作、通力协作的过程中，他们共同攻克了氮化镓结晶研发的难题。二人始终没有因一丝一毫的进展而喜形于色，而是耐心且严谨地对所有重要特性进行逐一确认，最终实现了成功。1986年，他们发表了相关论文，^[9]并以名古屋大学的名义申请了专利，获得了美国和日本的专利权。

长期以来，氮化镓被认为是“无法制作出p型半导体”的材料。即使在他们成功制作出高品质氮化镓结晶之后，几乎没有人认为能够实现这一目标。1981年，他发表了相关的研究论文。与松下时期的实验相比，这次结晶的品质有了显著提高，能够发出更加明亮的光。然而，尽管结晶的发光性能增强，电阻率却提高了，仍然无法得到p型结晶。为了进一步研究锌杂质与发光光谱之间的关系，赤崎勇联系了NTT武藏野研究开发中心的石井芳一室长，委托其进行相关研究。同时，他通过企业实习的机会让天野浩也加入了这一研究。

临近实习结束时，天野浩给赤崎勇打电话。

“老师，有些情况很奇怪。在使用低能电子射线照射并测量时，发现发光强度逐渐变化。”

赤崎勇不假思索地问道：“发光强度是增大了还是减小了？”

天野浩回答：“增强了。”

赤崎勇立即继续问：“形态怎么样？”（这里的“形态”指的是光谱的形态。）

天野浩答道：“光谱形态没有改变。”（[3]，p.111）

听到这个回答，赤崎勇的期待逐渐增加。光谱形态没有变化，但发光强度增强，这暗示着“费米能级”发生了变化。赤崎勇立刻产生

了一个想法：如果杂质周围的电子状态发生变化，结晶的“费米能级”位于能隙的下方，那么可能形成了p型半导体。但测量结果显示，结晶并非p型半导体。此后，赤崎勇和天野浩一直在思考，为什么无法制作出p型半导体？如何找到突破口？

一个月后，他们终于有了交流的机会。天野浩提出：“如果把锌换成镁试试呢？”恰好赤崎勇也有类似的想法，“是啊，试试镁吧！”（[3]，p.113）1988年末，他们进行了镁添加实验，与添加锌的实验类似，他们用低能电子射线照射镁添加的高品质结晶，发现镁相关的蓝光发光强度在光谱不变的情况下，显著增强了80倍。随后，他们用这种结晶制作了二极管，并测量其电流、电压特性。尽管这仍然是间接的验证方法，但结果强烈暗示p型结晶已经成功了。这一切发生在1989年3月。然而，由于尚未进行霍尔效应测定，无法确证其为p型半导体，因此他们决定谨慎地进行进一步的检测，确保结论准确无误。

同年9月，化合物半导体国际会议（现为ISCS）在轻井泽召开。为了在该会议上发表他们的研究成果，赤崎勇和天野浩在4月末提交了预稿。然而，在预稿中，他们并未明确指出已经制成了p型半导体，而是在摘要中写道：“综合电流、电压特性等结果，强烈暗示p型半导体已形成。”（[3]，p.115）当时，赤崎勇也是评选委员会的成员，由于无法亲自出席会议，他请求允许天野浩代为出席。但他们的论文只被收录为海报展示论文。事后，赤崎勇收到了评选委员会的详细评分报告，阅读后令人十分失望——大多数委员给出的分数都很低。询问会议讨论的情况时，部分委员提出了“氮化镓无法制作出p型结晶”的意见，其他委员似乎也被这一观点所影响。

尽管如此，他们的论文作为海报展示引起了较大的反响，特别是国外的研究者对此表示了浓厚的兴趣，纷纷要求了解更多细节。与轻井泽会议形成鲜明对比的是，1989年5月的洛杉矶学会上，他们的论文引起了巨大反响，几乎全场起立鼓掌。那时，尽管论文中并未明确

提出“pn结”这一概念,但他们提到:“蓝色发光二极管充满魅力,而我们才刚刚看到了这种美丽、无色透明的氮化镓结晶。”([3], p.116)许多人对他们的成果给予了高度评价。轻井泽会议后,他们继续对添加镁的高品质结晶进行低能电子射线照射。结果表明,蓝色发光强度显著增强,同时,他们通过霍尔效应确认了结晶转变为p型半导体的成果。他们随即开始着手制作pn结的蓝光LED。当手工制作的元件完成时,从LED发出的、前所未见的鲜明蔚蓝光芒映入眼帘。那一刻,赤崎勇激动不已,终生难忘。看到这道钴蓝色的光,他终于确信自己已经成功地制作出了pn结,长久以来的愿望得以实现,心中充满了成就感和喜悦。

这一成果于1989年12月在《应用物理学会欧文志》(*JJAP*)上刊登,^[10]引起了全球该领域研究者的广泛关注。成功实现氮化镓pn结型LED,可以说是氮化镓蓝光元件开发的第二次重大突破。然而,在赤崎勇团队成功制备氮化镓p型传导(pn结)后的2至3年间,一些外国杂志在介绍这一研究成果时,带有“赤崎团队发现‘p型氮化镓是一种偶然的发现(serendipity)’”的语气。([3], p.119)这个说法一度成为许多研究讨论的主题。Serendipity一词并非描述有意的探索,而是指“偶然与重要事物的邂逅”,这种说法常用于形容像伦琴发现X射线等重大科学突破的情况。

最初,赤崎勇也曾这样认为。然而,经过深思熟虑后,他认为这项成果并非偶然,而是通过“追求高品质美丽结晶的极致”,以及在半导体中通过“最适受主杂质添加”控制电子浓度(至少高于10倍)等科学方法实现的。这些都是必然的结果,而非偶然的发现。

或许,正如许多科学家所说,“幸运女神只会微笑着向那些不断探索并做好准备迎接她的人们。”尽管如此,可以称之为“机缘巧合”的,是天野浩在用电子射线照射添加锌的高品质结晶时,偶然发现了发光强度增大的现象(LEEBI效应)。然而,LEEBI效应的出现,并非完全依赖偶然,而是得益于低温缓冲层技术的应用,使得高品质结晶得以在此条件下显现出来。所

以,这也可以说是必然的。在某种意义上,成功有时正是从偶然的发现中找到必然的结果。^[11]赤崎勇团队的成功,除了他们能抓住偶然的机遇,更多的是在日复一日重复的工作中默默坚守,不抛弃、不放弃,珍惜每一次科研直觉和灵感的爆发,积极争取各方的支持力量,让他们迎来了最终的成功。

六、赤崎勇幸运发现背后的精神力量

北京大学周程教授曾撰写论文分析赤崎勇的成功因素。他认为,赤崎勇能够获得诺贝尔奖,首先与他攻克的高效蓝色发光二极管研制难题具有广泛的应用前景和巨大社会需求密切相关;其次,他能够屡次取得重大科技突破,源于他对化合物半导体研究的浓厚兴趣,并且始终坚持在这一领域辛勤耕耘;此外,赤崎勇能够率先研制出高效蓝色发光二极管,关键在于他自己搭建了主要的实验装置;另外,两次意外发现也为他最终成功研制高效蓝色发光二极管奠定了重要基础。^[12]这些分析不无道理,但通过对赤崎勇自传和研发历程的再梳理,还可发现若干值得关注的新因素。

首先,赤崎勇自幼便是一个好奇心极强的少年,其家庭教育在激发和支持他的好奇心和求知欲方面发挥了重要作用。尽管他的父母并非显赫人物,但他们却传授了极具价值的人生理念,即“勇敢去做自己喜欢的事”的人生态度。科学的动机中首要的情感心理动机是好奇心或惊奇感,还有对自然和科学的兴趣、爱好和热爱。^[13]赤崎勇的家庭教育为他的科学探索奠定了良好的心理基础。

其次,赤崎勇在求学和就业期间,长期处于一个学习和研究氛围开放自由的环境,同时也恰逢日本经济高速发展的时期。这样的环境和时代,促使许多人怀有为社会做贡献的使命感,整体社会环境积极向上,促进了许多优秀科技人才的涌现。尽管赤崎勇在科研过程中经历了多次失败,但除了他本身具备坚持不懈的意志品质外,他还非常重视与他人的合作,纵观赤崎勇求学和科技创新的历程中,无不积极

与身边的人交流合作，无论在企业还是学校他都有非常多的合作者，且不但在科技创新上共同努力，甚至关切彼此的生活。尤其是与学生天野浩之间亲密无间、互相信任、全情投入的通力合作，外部环境对其失败的宽容和良师益友的支持对他的成功也起到了至关重要的作用。

而且，赤崎勇始终保持对同领域其他科技研发进展的积极关注，比如，氮化镓蓝色发光元件的研发，以1969年马鲁斯卡等开始制作单晶体为契机，一段时间里发展迅速。但由于结晶的品质一直得不到提高，而且因无法制作出p型结晶（pn结），1974年以后很多有实力的研究者退出了这一领域，转向研究硒化锌等其他材料，20世纪70年代后期至80年代前期，发光元件等器件的研发处于停滞的状态。直到赤崎勇团队的创新成果不断涌现。以这些成果为诱因，世界上许多研究者投入到了氮化镓及蓝色发光元件的研发中。1991年，日亚化学工业股份公司的中村修二发表了关于成功利用氮化镓缓冲层制作出高品质氮化镓单晶体的论文。1993年12月，日亚化学发表了氮化镓系蓝光LED商品化的成果，受到了全世界的关注。进而，各研究机构逐个研发各种氮化镓系半导体器件，其论文的数量也以几何级数式急速增长。（[3]，p.108、123）这再次说明，科技创新虽然需要意志坚定和恒久坚持，但也绝不能只是闭门造车。科技创新的持续推进不但需要社会的持续努力，更离不开科研人员对于创新的渴望。

此外，社会需要是技术突破的强力召唤，但满足社会需要实现技术突破的过程中，研究者们需要强大而且连续的支持力量。产业、学术和政府之间的合作为赤崎勇的长期探索提供了接续动力。跨领域的多方力量接续协同才使得一项旷日持久且充满未知的科学技术探索得以持续。但学院式研究和企业式研究存在一定不同，比如，第一次到了名古屋大学工作之初，赤崎勇就想到锗的气相外延生长法，马上向有住老师提出希望允许他做试验的请求，但有住老师一直没有同意。因为制作单晶体锗的工艺

一到八的步骤都是由赤崎勇一人完成，有住老师可能认为在这样情况下，赤崎勇是腾不出手来做其他的实验的。但他每次遇到，都会再次提出请求。最终得到许可已经差不多过去一年时间。（[3]，p.49）而他到了松下电器东京研究所后，明确表达了自己的研究方向：“发光半导体，特别是Ⅲ-V族化合物半导体。”立刻就得到了小池所长的同意，推进很快。但后期松下电器自身的经营环境变得越来越严峻，研究所的支持资金不足后，研究人员就面临着无法继续自由开展自主意愿的研究。而再次回到名古屋大学后，赤崎勇获得了校方和政府多方支持。总体来说，学院式研究的核心目标是更多是为了追求新知识、理解原理和发表成果，而企业式研究的核心目标则是解决实际问题、创造商业价值、开发产品/技术；学院式研究的主要驱动力是科学好奇心、学术声望和基金资助，企业式研究则更注重市场需求、竞争优势和利润回报；学院式研究的时间可以较长，强调深度和严谨性，但企业式研究的时间通常较短，强调速度和结果。在当前大力强调科技创新与产业创新融合的时候，回顾赤崎勇的成功之路，无疑将获得许多宝贵的方法论启示。

最后，赤崎勇的科研探索之路看似不乏偶然因素的加持，但恰恰是赤崎勇和天野浩始终对偶发结果具有高度敏感性，从未看作无用或者干扰，正是基于不断积累的科研直觉和不懈努力，才使得赤崎勇等抓住了偶发结果中的细节，最终达成了“得于偶然是对成于必然的最佳诠释”。全世界很多人都看到了这个研发的价值，但因为长期难以突破，绝大多数人都放弃了，他们的失败不在于没有看到价值，而是失败于放弃。赤崎勇首先赢在了几十年如一日在平淡的技术探索中坚守。但坚守也未必就能成功。赤崎勇是兼具了天时地利人和三者，即机遇（天时），符合社会需求（地利），合作（人和），三者皆备，成功才水到渠成。很多关键节点上的尝试来源于科技工作者长期探索带来的科研直觉，没有长期的坚持，就到不了关键节点，到了关键节点缺乏科研直觉也不可能成功，正是全部的影响因素整合到一起，才使赤

崎勇成为氮化镓蓝光LED研发的坚守者与最终发现的夺冠人。

[参考文献]

- [1] “21世纪将被LED灯照亮”[J]. 大众科学, 2014, (11): 16-18.
- [2] 'The Nobel Prize in Physics 2014'[EB/OL]. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/press.html. 2014-10-07.
- [3] 赤崎勇. 蓝光之魅: 诺贝尔奖得主赤崎勇自传[M]. 方祖鸿译, 方明生 审校, 上海: 学林出版社, 2016.
- [4] Akasaki, I. 'Key Inventions in the History of Nitride-based Blue LED and LD'[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2007, 300(1): 2-10.
- [5] Bright, T. O. 'Efficient Blue Light-emitting Diodes Leading to Bright and Energy-saving White Light Sources'[R]. Scientific Background on the Nobel Prize in Physics, 2014, 1-9.
- [6] 'The Nobel Prize in Physics 1949'[EB/OL]. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1949/press.html. 1949-11-03.
- [7] 'The Nobel Prize in Physics 1973'[EB/OL]. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1973/press.html. 1973-12-10.
- [8] Ota, K. 'Toyoda Gosei's History of R&D on Blue LEDs with Professor Isamu Akasaki'[J]. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2019, 9(1): 015020.
- [9] Amano, H., Sawaki, N., Akasaki, I., et al. 'Metalorganic Vapor Phase Epitaxial Growth of a High Quality GaN Film Using an AlN Buffer Layer'[J]. *Applied Physics Letter*, 1986, 48(5): 353-355.
- [10] Amano, H., Kito, M., Hiramatsu, K., et al. 'P-type Conduction in Mg-doped GaN Treated with Low-energy Electron Beam Irradiation (LEEBI)'[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1989, 28(12): L2112-L2114.
- [11] 鲍海飞. 半导体蓝光二极管的发光之路[J]. 现代物理知识, 2014, 26(6): 42-55.
- [12] 周程. 个人兴趣与社会需求共同驱动型科技突破——赤崎勇何以能获得2014年诺贝尔物理学奖[J]. 科学与管理, 2014, 34(5): 3-9; 2.
- [13] 李醒民. 科学探索的动机或动力[J]. 自然辩证法通讯, 2008, 30(1): 27-34.

[责任编辑 王大明 柯遵科]