

从个案研究看我国科技原创力建设*

〔关键词〕 基础研究 科学发现 晶体管 产业革命 〔中图分类号〕 G3

崔志明¹ 浦根祥²

(苏州大学, 教授¹ 215006; 上海银行发展研究部, 博士² 上海 200010)

原创活动既可以发生在最前沿的基础性研究地带, 即高岸区; 也可以发生在最接近产业需求的应用研究地带, 即低岸区; 还可以发生在中间地带。就高岸区的原创活动而言, 它可以直接引发新学科的诞生, 进而诱发新产业的崛起, 直至新经济时代的来临。因此, 围绕着原创活动、原创能力的研究, 尤其是围绕着高岸区的原创能力的研究, 通常被认为是关系到国家科技、经济及社会发展最具战略高度的研究, 特别是当我国已经基本上实现小康目标, 并继续朝着建设全面小康的目标上努力时, 基于最高战略开展对原创力问题研究, 尤其是高岸区的原创力问题研究就显得至关重要。本文在此将从高岸区原创活动的基础研究入手, 探讨晶体管这项原创活动所涉及背景因素、基本条件、特定路径及它在美国, 乃至全球的科技进步、新经济及信息社会发展进程中所爆发出来的巨大能量, 以此表明开展这类课题研究的重要性和迫切性。

* 本文涉及的项目受国家自然科学基金项目 (编号 70273025) 的资助。

应该建设一个什么样的国家这个大问题。在国际共产主义运动发展过程中很多社会主义国家也都在探索自己国家的发展道路和模式, 既有成功的经验, 也有失败和挫折的教训。100 多年来国际共产主义运动的历程有起有落。总的来说, 基本历程是, 马克思将空想的社会主义发展到科学, 马克思的追随者们却将科学的社会主义推向了空想和迷误, 直到邓小平才开始在中国革命和建设的实践中再将空想社会主义回归到科学之路。但科学的社会主义到底是怎样的? 谁也不可能拿出一个现成的样板来, 只有在实践中不断认识和发展。社会主义国家中人和人的关系, 人和社会、人和自然的关系应该是怎样? 也没有现成的模式可套, 同样需要在实践中不断认识和发展。应该肯定, 社会主义并不排斥过去人类的文明, 而是在吸取过去人类一切优秀文明的基础上发展起来的。因此, 过去那种批判一切、打倒一切, 一切要由我们自己从头做起的想法和做法决不是马克思主义的。反思我们过去不少失误, 其原因往往就在于抛弃了一切人类文明的基础, 自以为在进行什么“伟大的创举”, 结果在自然规律面前处处碰壁, 走了不少弯路。

一、从光的本性之争到晶体特性的发现

1. 德布罗意首创波粒二象性原理 20 世纪 20 年代, 科学家们就光是粒子还是波曾展开了一次历史上最为激烈的争论。当时工作在基础研究最前沿的欧洲科学家基本上分成两大阵营: 一方持粒子说; 另一方持波动说。双方均可用经验事实来支持各自所持的学说。不过, 历史学出身的法国科学家德布罗意却大胆推测, 可能存在着波粒二象性原理, 即光既是粒子, 又是波。他借助简单论证就给出了最简捷的表述: 给定波长的物质粒子等于普朗克常数除以该粒子动量。

依照德布罗意这一原创思想, 任何亚原子粒子, 如电子, 应该具有复杂的粒子行为, 在量子水准上可以而且应该振动。德布罗意还给出了观察粒子波粒二象性的方法, 即当电子 (亚原子水准上的任何粒子) 通过狭小的、不超过由他的公式给定波长的狭缝时, 电子就应该表现出衍射现象。可当时欧洲科学家并没有对德布罗意这一原创思想加以实

一个秩序正常的社会理应有全体公民共同遵守的“社会契约”。这种“契约”, 反映了公民的道德共识和行为共则。全体公民应有法可依、有法必依。各级领导应依法办事。人人都受法律监督, 社会就可以走向有序。国家的道德和法律原则上应该保证“等价交换”。过去常把“等价交换”看成是资产阶级商品经济法则加以批判, 其实这是大错特错的。如果“等价交换”不对, 难道“不等价交换”倒对了!“等价交换”批判了, 结果“不等价交换”发展了。现在社会上的权钱交易、假冒伪劣、坑蒙拐骗、贪污行贿等违法行为不都是“不等价交换”的结果吗! 应该承认“等价交换”符合按劳分配的社会主义原则。社会如果能够做到公民的劳动和分配合理, 做到效率和公平兼顾, 做到“善有善报, 恶有恶报”、“善恶不同, 奖惩分明”, 就能在实际生活中促进公民的道德自律和他律, 就能促进社会的和谐有序、持续发展、共同富裕、共同进步。可以预期, 人类社会正在走向理性、走向效率和公平的兼顾, 中国目前存在的包括道德失范在内的众多严重社会问题, 必定会逐步解决, 科技界的道德状况也必然会返璞归真。

(责任编辑 蔡德诚)

验证实，他们的兴趣不在实验层次上，而在于思辩。这就给一向注重实用主义的美国人通过实证证实了德氏的观察方法，并进而成功运用德布罗意这一原创思想走向晶体研究，提供了难得的历史机遇。

2 戴维森的探索性实验 就在德布罗意还对自己给出的方法将信将疑时，美国物理学家，工作在贝尔实验室的戴维森就已经超前开始了旨在揭示物质波动本性的电子衍射系列实验。1920年，他启动了电子靶实验。戴维森的目的就是希望能通过实验观察到电子撞击靶后反弹时的角度分布。实验中他的确观察到了一小部分电子被靶子反弹的现象。为实验结果所激励，戴维森开始了用电子探测原子内部结构的一系列更加精致的实验。但直到1923年底德布罗意首次公布波粒二象性原创思想时，戴维森所获得的仍然是缺乏说服力的结果。

1925年，他和助手戈曼终于观察到了电子倾向于在4~5个特殊角上散射。在不知道为什么的情况下，他们决定对靶子进行检测，结果发现，由于发射了过多的电子，镍箔表面已经形成了光滑的晶体状条纹刻面。他俩经仔细推敲认为，不是原子的内部结构，而是镍原子的排列（晶格点阵）应该对实验结果负责，这也许就是电子本身产生的干涉条纹。此时，他们仍不知道德布罗意的原创思想。

1926年，戴维森夫妇在去英格兰度假期间，有幸参加了在牛津大学举行的量子理论研讨会。使他感到惊讶的是，会上竟有人用他的实验结果来证实德布罗意关于波粒二象性的原创思想。此外，他还接触到了量子力学最前沿的理论——薛定谔波动力学。回到美国后，他立即投入到波动力学研究领域。在新理论指导下，他和助手于次年又进行了一系列实验，直至完全证实电子的确具有波动本性为止。至此，戴维森从非定向的自由探索性研究逐步走向了固体内部原子精细结构的定向研究，固体物理学开始在贝尔实验室扎下根来。

3 原创活动的组织——贝尔实验室 1925年1月1日，美国电报电话公司组建了一个相对松散的研究实体——贝尔电话实验室。它的首任总裁是来自芝加哥大学的物理学教授朱厄特，首任实验室主任则是阿罗尔德。戴维森和戈曼就是在他们的任期内进入贝尔实验室的，他们本来是为公司争夺专利权而开始研究镍箔表面电子散射问题的，后来所取得的进展已经偏离他们的初衷了。他们善于学习，在实验室一大批训练有素的工程师和技术专家的帮助下，他们不仅对当时已统治整个美国，乃至全球的电话、电报业的真空管的所有性能了如指掌，而且还设计并开发出了适合于实验工作的复杂的高真空理想电子设备。

由于贝尔实验室是一个相对松散的研发组织，有自由研究的空间，有相互协作的氛围，从而使得戴维森和戈曼得以成功地做出能够证明物质具有波动本性的电子衍射实验，并于无意间闯入了最前沿的固体物理学，尤其是固体实验物理学研究领域，他们还因此获得了1937年的诺贝尔物理学奖，这也是诺贝尔奖首次授予来自产业研发组织——贝尔实验室的物理学家。它表明工业实验室也可以从事最接近前沿地带的高岸区的原创活动。

在尝到原创活动给公司带来巨大无形资产的甜头后，贝尔实验室开始以前所未有的热情鼓励自己的研究人员密切关注最前沿的基础研究领域出现的热点问题。于是，在贝尔实验室就出现了一些小型的学习组织，定期或不定期地开展学术交流，每次活动都由一名出色的科学家做主题报告。公司为此还作了制度安排，鼓励实验室的科学家就涉及到他们应用研究的前沿课题进行原创性研究或纯基础性研究。即使在大萧条期间，贝尔实验室宁可每周工作日从6天减少到4天，也不愿裁减其雇员。反过来，科学家虽然只领取4天薪水，却自愿地加班加点，不少科学家连星期天也忘记了跟家人团聚。不仅如此，贝尔实验室还继续坚持雇佣一流科学家和杰出工程师。正是在这种“贝尔文化”导向下，肖克利、巴丁和布拉顿等年轻一代的科学家相继加盟贝尔实验室。这就为贝尔实验室从事最前沿的固体物理研究注入了最优质的智力资产。

4 从晶体检波器研究到半导体特性的发现 戴维森的实验为美国科学家打开了通向微电子学的大门，在自由的非定向的探索性研究过程中，在发自科学家的内在驱动力和工业界需求拉力的共同作用下，又将贝尔实验室研究方向聚集到了晶体检波器的研制上来。在晶体（氧化铜）检波器这一特定案例中，铜与铜的氧化层之间存在着物理过程的不对称现象，即如果将负电压加在铜的一边，电子就能轻易逸出并进入氧化层；若相反，则几乎没有什么电子逸出并进入金属铜一边。如果这时有人顿悟到怎样将第三个电极置于低温检波器内，如同真空管中的栅极一样，那么，这个人就拥有一只放大器了。这个人就是布拉顿，他就是这样感悟到的，通向晶体管放大器的原创思想就是由此发源的。

铜的氧化物实际上是一种“半导体”，而硒则是单一元素构成的“半导体”。前一材料实际上介于导体和绝缘体之间。与其他材料相比，它们拥有三大特性：（1）热敏特性——在某些临界点上，它的电阻随温度增加而降低；（2）光敏特性——不同强度的光同时照射在该材料的不同地方，就会在两者之间产生微小电势差；（3）掺杂特性——在纯净物半导体材料中，掺入微量杂质可显著地改变其导电性能。至此，由探索性实验引发新的科学发现，继而引发了一门新学科——半导体物理学的诞生。

二、从原创要素的集聚，到晶体管的首创

1. 顶岸区原创要素向贝尔实验室集聚 由1933年始，德国一流的犹太科学家开始向西漂移。随着希特勒加紧对犹太人的迫害，越来越多的犹太知识分子离乡背井，主要是流向美国和英国。量子力学、固体物理的重心也随之西移。这些最前沿的研究不久就在普林斯顿高级研究院、麻省理工学院等著名学府生根开花，犹太科学家在这里开始招收美国本土研究生。欧洲大陆的怀疑论与美国本土的实用主义相嫁接，培育了一大批科学富翁。肖克利、巴丁和布拉顿就是其中的最大受益者。

当时贝尔实验室新任总裁凯利认识到了这些前沿学科的兴起有可能对他的雇员一直追求的产

业定位研究,以及一部分非定向自由研究将产生重大影响,他早在1936年就开始设想在无线电通讯领域要用固体装置取代成千上万只的真空管。为此,凯利决定雇佣毕业于麻省理工学院、普林斯顿高级研究院、加州理工学院固体物理专业的获得博士学位的年轻科学家。他的理由是:这些人的到来可为实验室输入“高岸区”的、甚至是“顶岸区”的原创资源。凯利将他们安排在固体量子力学领域,从事探索性基础研究。肖克利、巴丁和布拉顿等就是在这样的背景下进入贝尔实验室的。由这些“原创要素”不断注入而引发的“集聚效应”为贝尔实验室固体物理研究,特别是日后晶体管的发明提供了最直接的动力源泉。

2 半导体物理学的崛起 氧化铜检波器的研制和半导体三大特性的发现直接促成了半导体物理学的崛起。这里着重叙述一些影响晶体管原创进程的重大事件:1940年3月6日,硅棒光电效应演示实验在贝尔实验室获得成功,科学家由此将他们的兴趣转向了元素周期表中的第四族元素;1940年3月下旬,硅锭内部呈现出来的“P型”和“N型”结构被发现,“P—N结”遂成为当时科学家们认可的新概念;1940年中期,第四族元素与第三族和第五族元素之间的掺杂关系得到确认,“P型”和“N型”硅晶体的形成机理得以揭示;1941年,杜邦公司开始批量生产纯度为99.99%的硅晶体材料,凯利要求雇员严守实验室“P—N结”制作工艺方面的核心技术;1942年,通用电器公司利用锗晶体研制与开发晶体检测计,并发现了锗晶体因熔点低而易于制作,但对工作环境的温度变化极其敏感;1943年,凯利构思战后研究计划,一是瞄准固体物理、要求贝尔实验室在该领域成为世界领导者,二是扩大规模、组建新实验室;1945年4月,肖克利提出“场效应”原创思想,这是走向研制“场效应晶体管(该晶体管成为集成电路时代的标准晶体管)”的关键;1945年中期,凯利要求科学家和工程师迅速投入到基础型研究中去,将战争损失的时间夺回来。他认为科学和工程师如长期远离基础研究前沿,就会在日后的生涯中逐步丧失其原创能力。

3 锗晶体管的首创 根据凯利的战后计划安排,贝尔实验室成立了3个研究小组。肖克利掌管其中的固体物理小组,主要成员有巴丁、布拉顿及其他一些科学家和工程师。肖克利思维敏捷,善于提出极具创意的思想;巴丁专注于探索“场效应”的形成机理,并给出了“表面态理论”的解释;布拉顿专注于实验设计和操作;技师们则忙于材料的筛选和提纯,致力于仪器的改进和制作。这种分工严密,又相互协作的组织形式为走向晶体管的定向研究提供了保证。

1947年12月23日,巴丁和布拉顿终于研制出了世界上第一只点触型锗晶体管放大器。他们后来将其中一个点叫“发射极”,另一个叫“接收极”,第三个叫“基极”。肖克利为晶体管的工作原理给出了“少数载流子”观的解释。1948年最初几个月内,技师们又围绕着晶体放大器的外部包装材料、包装工艺进行了一系列研制工作。1948年5月,晶体放大

器命名工作开始,在征求意见基础上,最终采用了皮尔士的建议,即将之命名为“Transistor(晶体管)”。1948年6月30日,贝尔实验室召开新闻发布会,正式向外界公布晶体管首创成功,并当场做了演示实验。

在接下来的日子里,贝尔工程师们将其工作重心转向单晶培育,包括拉晶机的工艺设计与改进。及至1949年中期,贝尔实验室已经生产出了3700只A型晶体管。

1951年7月4日,贝尔实验室又一次举行了记者招待会,宣布一种全新的、性能卓越的“面触型晶体管”问世。当然,它仍属于锗晶体管。但不管是哪种型号,只要是锗晶体材料制作的,都有共同的缺陷,那就是它们都不能适应高温、高频的工作环境,尤其是军方经常面对的野战环境。

1951年,德克萨斯仪器公司将自己的发明目标定位于硅晶体管,他们决定放弃锗晶体材料,而改用硅晶体材料。他们的意图就是要培育出单晶硅,生产出能够在任何环境下,包括能够接受野战环境考验的小型硅晶体管。1954年,世界上第一只硅晶体管终于在德克萨斯仪器公司问世。

随着硅材料提纯工艺的不断革新,硅管取代锗管已是大势所趋,它成了继锗晶体管全面取代电子管后的又一次全面替代。同时,受军方和民用市场巨大需求的拉动,再加之东西方冷战的不断升级,半导体工业以难以置信的速度在美国本土及其他国家扩张。由晶体管的原创而引发的信息科学革命及信息产业革命,由此迅速向世界各地蔓延。

三、上述案例的启示及我们可能的选择

从锗晶体管的原创到硅晶体管发明的过程中,硅材料的广泛应用应该说是起到了承上启下的作用,但与锗晶体管相比,它不过是属于工艺创新和产品创新及材料工艺改进的范畴,并不是原创性质的发明,故人们对它的评价就不像锗晶体管那样高了。这可以从肖克利、巴丁和布拉顿因发明晶体管而获得1954年的诺贝尔奖,而发明硅晶体管的德克萨斯公司仅仅获得了美国的专利保护的事实中得到验证。

1. 从晶体管原创成功的案例分析来看,可以将之归功于如下几方面的努力 (1) 核心管理层具有的高瞻远瞩、全球工业领袖气质及其对世界科技发展态势的预见能力。(2) 多学科实现交叉、智力资源互补,核心研究小组与精英科学家的个人作用,及其间的相互协作的氛围。(3) 包括原始创意的内在兴趣催生和市场需求拉动,原创者的个人冲动和高岸区的科技驱动。(4) 原创要素的集聚效应,其中包括智力、仪器设备、研究经费、材料与工艺的集聚。(5) 原创成果的保护战略,尤其是关键技术与核心工艺的专利保护。(6) 原创优势的维护,包括后续创新、产品标准制定与市场的有限度垄断。(7) 注重实用的文化背景和宽容失败的创业环境。

2. 从案例分析中我们可以得到如下几点启示

(1) 高岸区的原创机会是极其稀缺的,美国的半导体物理学、微电子学的崛起得益于他们的实用主

企业内部价值网络与技术创新*

〔关键词〕 内部价值网络 突破性技术创新 产品平台创新 生命周期

〔中图分类号〕 G3

赵明剑 司春林 佟 石 马 玲

(复旦大学管理学院 上海 200433)

一般来说,关于价值网络的讨论焦点主要集中在企业外部,重点研究企业与上游供应商、下游用户之间的相互价值关系,描述它们之间“关系”的“关系”。企业内部也存在价值网络,这个内部的价值网络比外部价值网络要细微、复杂得多,它涉及企业内部各个方面因素,并且与外部价值网络相匹配、作用,共同支持企业的技术进步。

企业的技术管理活动需要通过一定的流程和组织来实现。这种流程和组织在企业技术管理活动中得到了不断的磨合、融会和改进,最终在企业内沉淀形成一种类似企业文化的价值观,构成企业内部员工普遍认可的内部价值网络。企业内部价值网络对整个企业的创新管理活动形成强有力的支撑,使企业创新按照一定“范式”发展,所产生的“偏差”可以自动得到纠正。因此企业内部价值网络对企业认可的技术创新方向提供保障。如果创新方向是明确的,如何建立内部价值网络(例如思想教育、提倡企业文化等),以发挥其在技术创新中的积极作用,就是企业管理中的一个重要课题。但是,如果创新与根深蒂固的企业内部价值网络发生冲突的时候,这种创新有可能会被视为“异端”、“另类”,而被“纠正”,即被压制、扼杀。特别当这种创新具有极大的潜在价值,甚至对原有技术具有替代性影响

* 国家自然科学基金资助项目(70072005);上海市科技发展基金博士生软科学论文2002年资助项目

义文化,以及善于向欧洲学习、赶超一流国家的进取精神和世界一流的工业实验室;也得益于新兴产业界领袖的开拓精神和杰出工程师个人把握机会的能力和爆发力。(2)原创机会是可求而不可遇的,对未来科学与技术发展走向进行超前预见是非常必要的。(3)应注重原创成果的专利保护,激发原创者或研发小组的原创热情。

3. 结合本案例分析,我国有如下可能的选择
(1) 高岸区的原创机会虽然稀缺,但在特点领域还是存在的,为发挥国家或地区在尖端领域的作用,可将资源集中投入在少数或个别领域。只要我们把握好某些机会,我们就可能在某些领域促成高岸区。(2) 在不具备或失去原创机会条件下(绝大多数情况下皆如此),应将跟踪型研究机构和产业界的兴趣焦点超前地、有预期地转移到(通常会转移,但多是反应不够敏捷,甚至严重滞后)识别、选择原创技术的后续创新上来,其主要目标就是要充分利用原创技术的初发优势。(3) 应加强技术预见工作,尤其要强化能反映市场需求的或直接面向高科技产业群的技术预见工作,以增加科技界和产业

的时候,如何“打破”原有的内部价值网络,重建新的内部价值网络,就是非常关键性的了。

本文首先诠释企业内部价值网络概念,分析它在企业技术创新中的积极作用;然后指出面对所谓突破性技术创新,企业既定的内部价值网络又如何阻碍创新活动的进行。最后借助产品平台创新与基于平台的产品创新概念提出企业内部价值网络的生命周期理论。

一、内部价值网络及其影响要素

伴随着企业中一项新兴技术的管理活动的开始,与技术管理相关的流程与组织开始建立、调整与改进,最终以“例常化”为标志形成成熟的“结构化”流程运作。^{[1][2]}流程的“例常化”促进企业内部文化的沉淀;企业文化的形成、固化反过来又渗透在技术管理的全过程,作用于技术管理活动的各个方面。^[3]因此,我们可以定义内部价值网络即为由人们的价值判断所构成的网络。内部价值网络有类似企业文化理念的一种凝聚力、整合力和定向排斥力,具体反映在企业的价值流程以及接纳与既定流程相异的新标准规范的程度。

1. 内部价值网络形成过程

每个企业都有自己独立的内部价值网络。由于外界因素与内部不同的群体、个人的影响,价值网

界对原创技术的捕捉机会。(4) 本案例将原创力的诸多要素概括为:智力(智商、仪器)环境,研究经费、原材料和技艺,科学组织,社会与经济环境;将原创能力概括为:科学家的思维爆发力,机会的预见、识别和驾驭能力,还包括原创成果的保护能力、专利战略运用能力等。我们应从原创力构成要素着手,为增强我国科技界原创性创新能力作出实实在在的制度安排。

主要参考文献

- [1] 迈克尔·莱尔登,莉莲·霍德森.浦根祥译.晶体之火——晶体管的发明及信息时代的来临.上海科技出版社,2002
- [2] Hughes, T·P, The Evolution of Technological Systems. In The Social Construction of Technological Systems. New Dimensions in the Sociology and History of Technology, Cambridge: MITpress, 1989
- [3] Noyce, R·N, Microelectronics. Scientific American, No, 3, 1977
- [4] Morton, J·A and W·J·Pietenpol, The Technological Impact of Transistors. Proceedings of the IRE(June), 1958

(责任编辑 蔡德诚)