

半导体的世界

姬 扬

(中国科学院半导体研究所 100083)

越重要的东西,平时就越感觉不到。洪应明在《菜根谭》里说,“鱼得水逝而相忘乎水,鸟乘风飞而不知有风”。鱼在水里游,却不知道自己在生活在水里;鸟在空中飞,却不知道自己在生活在空气里。他们“不识庐山真面目,只缘身在此山中”。水之于鱼,风之于鸟,是这样;半导体之于我们,也是这样。我们生活在半导体的世界里,半导体在我们的身边无处不在,与生活 and 生产息息相关,可是很多人却感受不到它。今天就来介绍这个“半导体的世界”。

前几年,普通人对半导体的了解还仅限于半导体收音机。我在中国科学院半导体研究所工作,经常有人问我:“半导体收音机早就淘汰了,你们半导体所还研究什么呢?”我总要费一番口舌解释,效果还不一定好。这几年的情况不一样了,因为美国进一步发动对中国的高技术封锁,包括制裁中兴通讯公司、封堵华为公司,加拿大扣押华为公司的高管孟晚舟,使得越来越多的人认识到半导体科技在我们生活中的重要性。现在我们经常说,美国总统特朗普是近年来最杰出的科普大师,他以一己之力让很多中国人乃至全世界的人认识到,半导体科技是高科技的重要组成部分。

各式各样的“机器狗”不仅能给小朋友当玩具,还能表演跑步、跳舞等高难度动作,甚至可以驮着军用物资、翻山越岭,这些都是因为有半导体传感器帮助它感知周围的环境,有计算机芯片控制它的运动。直接观测引力波,是最近几年的一项重大科学发现,很快就获得了诺贝尔物理学奖(2017年)。激光干涉式引力波观测站是几公里长的干涉仪,能够测量引力波导致的非常微弱的信号(能够检测的最小值达到 10^{-18} 米,这是质子直径的千分之一,而

质子直径只有氢原子大小的十万分之一),让我们了解距离地球几十亿光年远的地方的发生的碰撞事件(两个黑洞的融合),能够测量这么微弱的信号,当然离不开半导体器件。2019年,一些天文学家把地球当做一个巨大的天线,测量离我们8500万光年远的黑洞周围的微波信号,得到了第一张黑洞照片,他们的成功也离不开半导体。

当然,过去几年里最重大的科技发现还不是上面提到的这些巨大成就,而是一只狗,一只非常聪明的狗。“阿尔法狗”(AlphaGo)战胜了围棋世界冠军,在围棋这个最古老也最复杂的游戏里,人类再也赢不了机器,只能俯首称臣。其实,阿尔法狗是一台计算机,一台大型的计算机,由1202个CPU和176个GPU构成,后面有100多个科技人员组成的技术支持团队。现在有很多人工智能的计算机围棋程序(比如说“绝艺”和“星阵”)依托于“云计算平台”(其实就是大型计算机集群),随便谁也赢不了手机,谁拿着手机都可以赢世界冠军(图1)。

现在每个人都知道,我们真的已经进入了信息时代,信息技术彻底改变了我们的生活。这个道理,专业人士早就知道了,但是我们普通人只有模模糊糊的了解:机器革命把人从体力劳动中解放出来,而信息革命把人从脑力劳动中剥离出来。未来的世界将会怎样呢?

计算机当然离不开半导体科技。电子计算机的历史很短,第一台通用电子计算机ENIAC在1946年投入使用,使用了大约2万根真空三极管,占用了一间大房子(167平方米),耗电150 kW,计算能力仅为每秒钟进行5000次加减法(20位的十进制数)(图2)。在70多年后的今天,随便一个配置低廉

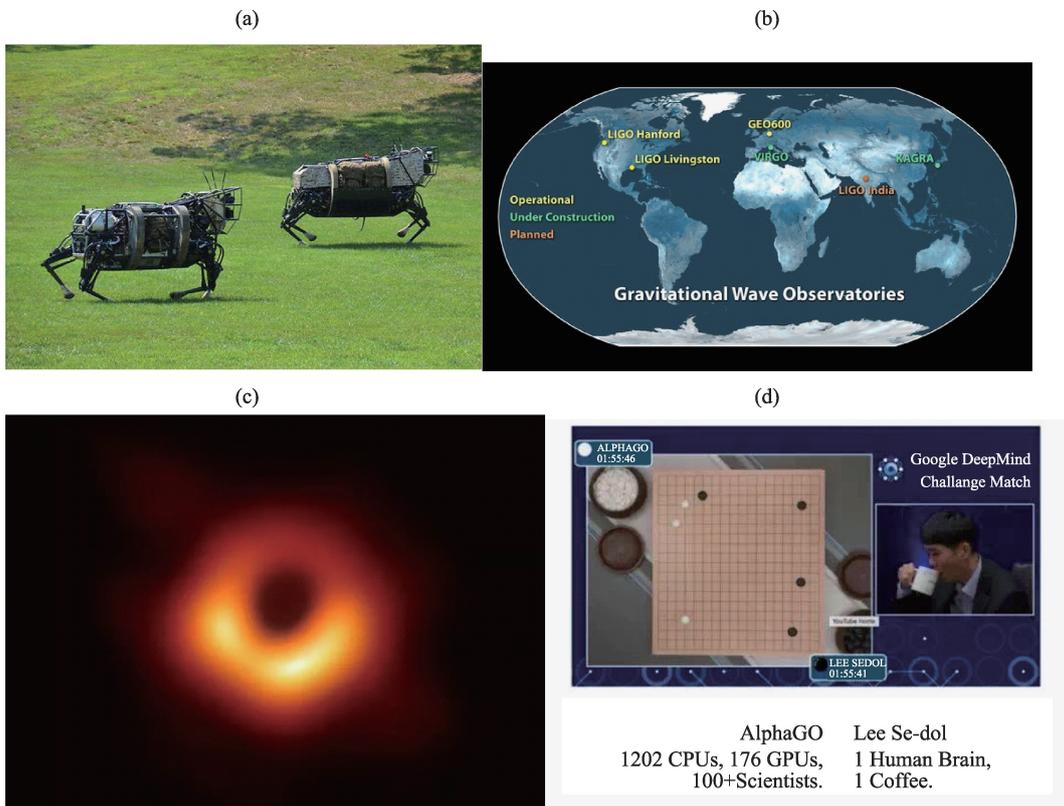


图1 近年来一些重要的科技进展都离不开半导体的贡献
(a)翻山越岭的机器狗;(b)引力波的探测;(c)第一张黑洞照片;(d)阿尔法狗大战围棋世界冠军李世石

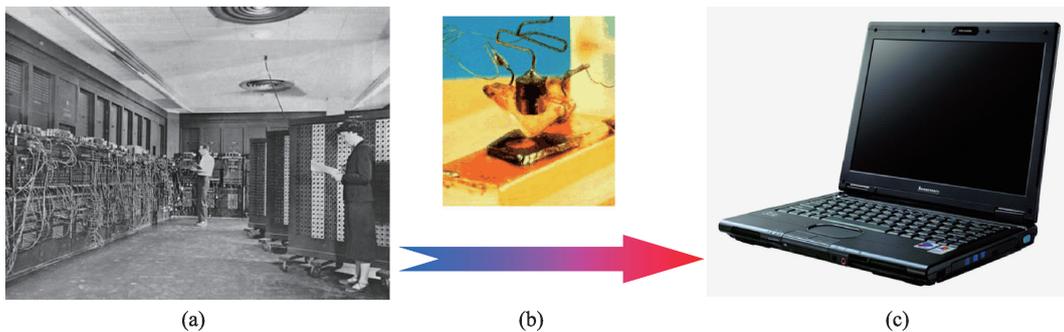


图2 半导体科技带来了计算机革命(a)1946年第一台通用电子计算机ENIAC;
(b)1947年发明的第一个半导体晶体管;(c)今天已经司空见惯的笔记本电脑

的笔记本电脑,计算能力也要比ENIAC强了成千上万倍,同时,体积和价格也下降了成千上万倍,为什么呢?当然是因为1947年贝尔实验室的三位科学家(巴丁、布拉顿和肖克利,图3)发明了半导体晶体管,开辟了半导体科学技术的新时代。

在过去的200年里,半导体科技的发展经历了三个重大阶段:从19世纪初到1879年是摸索阶段,

科学家们从自己的兴趣出发,通过各种实验逐渐了解半导体(当时还没有这个名字)的基本性质,并在1879年发现了著名的霍尔效应;从1879年到1947年是奠基阶段,20世纪初的物理学革命(相对论和量子力学)使得人们认识了微观世界(原子和分子)的性质,随后这些新的理论被成功地应用到新的领域(包括半导体),固体能带理论为半导体科技奠定



图3 1956年,肖克利(William Bradford Shockley, 1910~1989)、巴丁(John Bardeen, 1908~1991)和布拉顿(Walter Houser Brattain, 1902~1987)因为发明了半导体晶体管而获得诺贝尔物理学奖

了坚实的理论基础,而材料生长技术的进步为半导体科技奠定了物质基础(半导体材料要求非常纯净的基质材料,非常精准的掺杂水平),终于在1947年第一次实现了具有放大功能的半导体器件,基于锗的点接触晶体管。从此,半导体器件在生活中的应用越来越多,对经济的影响就越来越大。

半导体科技有三个相辅相成的要素,材料、器件和物理。有了好的材料才能发现其中的物理(“巧妇难为无米之炊”),理解了其中的物理才能制作新的器件(“知其然又知其所以然”),从而进一步推动材料和物理的发展(“哲学家只是用不同的方式解释世界,重要的是改造世界”)。单个半导体器件固然很有用,但是把很多个具有相同或不同功能的半导体器件集合起来(集成电路),就能够发挥更



图4 集成电路的发明人基尔比(Jack Kilby, 1923~2005)和诺伊斯(Robert Norton Noyce, 1927~1990)

大的作用。1958年,德州仪器公司的基尔比制作了第一个锗片上的集成电路,用一个晶体管、三个电阻和一个电容构成了一个简单的RC振荡器(1.3MHz)。1959年,仙童公司的诺伊斯(他后来创立了英特尔公司)提交了平面工艺的专利,用铝作为导电条制备集成电路。从此,集成电路的时代开始了(图4)。当基尔比因为发明集成电路而荣获诺贝尔物理学奖的时候(2000年),在一个直径为30厘米的片子上,已经可以集成几百万乃至几千万个晶体管。

半导体计算能力越来越大,平摊在单个晶体管上的成本却越来越低,这就是摩尔定律(仙童公司的摩尔在1965年提出的):集成电路上可容纳的元器件的数目,约每隔18~24个月便会增加一倍,性能也将提升一倍。这个定律本来是描述此前半导体产业发展的经验公式,竟然奇迹般地揭示了此后五十多年信息技术进步的速度(图5)。

在半导体科技的推动下,计算机的计算能力突飞猛进。第一台通用电子计算机ENIAC每秒钟只能做可怜的5000次的加减法,使用大约150 kW的功率。1954年,贝尔实验室开发了第一台晶体管化的计算机TRADIC,使用了大约700个晶体管和1万个锗二极管,每秒钟可以执行1百万次逻辑操作,功率仅为100瓦。1955年,IBM公司开发了包含

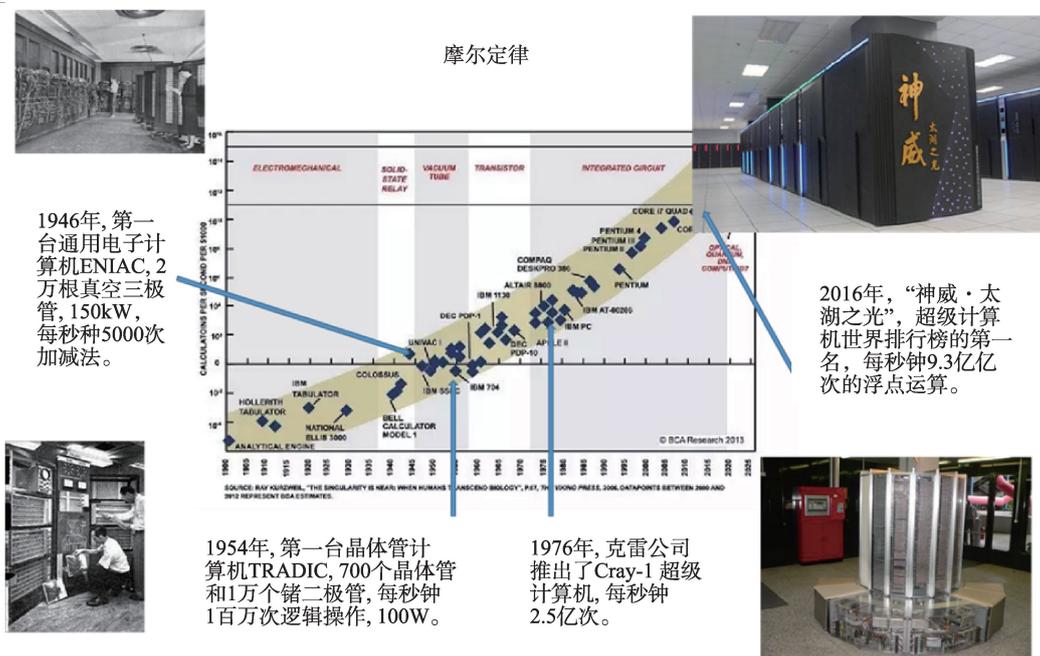


图5 摩尔定律的威力: 半导体计算能力越来越大, 平摊在单个晶体管上的成本却越来越低。1965年这个定律本来是描述此前半导体产业发展的经验公式, 竟然奇迹般地揭示了此后五十多年信息技术进步的速度

2000个晶体管的商用计算机。在1971年, 利用几平方厘米大的Intel 4004微处理器, 可以达到ENIAC相仿的计算能力, 2300个晶体管只消耗几瓦功率。1976年, 克雷公司推出了Cray-1 超级计算机, 运算速度达到了惊人的2.5亿次。2016年, “神威·太湖之光”夺得超级计算机世界排行榜的第一名, 每秒可以实现9.3亿亿次的浮点运算。2018年, 美国橡树岭国家实验室宣布, 超级计算机“顶点”(Summit)的浮点运算速度为每秒20亿亿次。同年5月17日, 在天津举行的第二届世界智能大会上, 国家超算天津中心对外展示了“天河三号”原型机, 这将是新一代的百亿亿次超级计算机。2019年, 美国宣布建造两台每秒百亿亿次浮点运算的超级计算机, 分别是阿贡实验室的“极光”(Aurora)和橡树岭实验室的“前沿”(Frontier), 预计将在2021年交付。“前沿”的浮点运算能力将达到惊人的每秒钟150亿亿次。我国的“天河三号”超级计算机预计也将在2020~2021年实现百亿亿次浮点计算的能力(图6)。

除了大型计算以外, 半导体还在其他很多方面发挥作用。

1970年4月24日, 我国成功发射第一颗人造地球卫星“东方红一号”卫星, 开创了中国航天史的新纪元。这颗卫星播送《东方红》乐曲时用的无线信标机, 就是半导体器件。“东方红一号”靠电池供电, 所以工作时间不长(只有28天)。1971年3月3日发射成功的“实践一号”卫星采用了硅太阳能电池供电系统, 因而在太空正常运行了8年多的时间, 这当然也是半导体科技的功劳。

“敢上九天揽月”。嫦娥奔月是妇孺皆知的神话传说, 寄托了中国人民的很多梦想, 包括飞天梦。中国探月工程(“嫦娥工程”)引人瞩目, 即将把嫦娥奔月的神话变为科学技术的现实。“玉兔号”月球车是探测月球奥妙的重要工具, 它的8个分系统都离不开半导体(无论探测、控制还是供能): 移动、导航控制、电源、热控、结构与机构、综合电子、测控数传、有效载荷。特别是有有效载荷分系统里的全景相机和红外成像光谱仪, 跟我们手机上的摄像头很类似, 只是更高级也更可靠, 能够在月球表面的恶劣环境下长期工作。2018年嫦娥4号首次在月球背面软着陆, 带上了更多的更强大的半导体的探测



图6 向“E级超算”冲刺的超级计算机:每秒钟可以进行100亿亿次浮点运算的“极光”、“天河三号”和“前沿”超级计算机 预期将在2021年交付使用

器,用来研究月球表面的信息。

“敢下五洋捉鳖”。仅仅飞天还不够,我们还要下海,找龙王爷要宝贝。地球上三分之一的表面是陆地,三分之二的是海洋,海洋里有无穷的宝藏,海洋的最深处马里亚纳海沟大约有11000米深,把世界第一高峰珠穆朗玛峰(大约8800米)填进去都还远远不够。太阳光只能进入到水面以下最多几百米的地方,大海的深处非常黑,我们要有探照灯,需要各种各样的探测器,才能了解大海深处的奥秘,这些都离不开半导体。2012年6月15日,我国的“蛟龙号”载人潜水器在马里亚纳海沟进行了第一次试潜,最终成功潜入水下6671米。2020年6月8日,我国“探索一号”科考船完成马里亚纳海沟深渊科考任务后顺利返港,全海深自主遥控潜水器“海斗一号”完成了首次万米海试与试验性应用任务,在马里亚纳海沟实现了4次万米下潜,最大下潜深

度达10907米。

“骏马奔驰在辽阔的草原”。半导体科技还在一些意想不到的地方发挥着重要的作用,比如说高铁。高铁为什么离不开半导体?我们知道铁路是经济发展的命脉,高铁的出现大大加快了物流运输的速度。高铁要跑得快,至少有两个基本要素:既要有动力,而且路要平。在建设高铁的时候,都要用全球定位系统(GPS和北斗)来辅助建设,在几公里的距离里,测量的误差小于几个毫米,这些都要依赖半导体芯片才能够实现。高铁需要的强大的动力,电源需要开需要关,巨大的电流要按照需求打开或关断,这些也需要以半导体晶闸管为代表的许多种半导体器件。

各种用于标识的证件,包括商品的标签、出入的门卡、食堂的餐卡,当然还有我们的身份证,都是半导体芯片做的。各种各样的条形码帮助我们做快递的分拣任务,更别说我们的手机了——每个人都离不开手机,各种各样的事情都要用手机来操作。我们的日常生活里有很多很多的电器,但是他们以前互相通讯是不方便,现在可以用手机把它们全部控制起来,这样把做成智能房屋,我们想干什么就干什么,操作自如。

“开源节流”对于经济发展非常重要。生活和生产都离不开能源,能源是经济发展的基本要素。“节流”措施的典型代表是发光二极管,“火树银花不夜天”,以前要靠火把或者油灯实现,只有在重大节日的晚上才能看到。现在到处都是、随时可见,因为各种颜色的LED半导体二极管即便宜又好看,而且使用起来非常方便。“开源”措施则有太阳能电池。现在大规模的太阳能发电已经成为了日常的操作,以前的戈壁滩,一片荒凉,什么事也干不了,现在我们可以在哪里建设太阳能发电厂,变废为宝,可以提供很多的电,甚至还能够改善环境——太阳能面板下面可以种草,甚至发展畜牧业。

我们的生活很幸福,但偶尔也可能会得病。在医疗方面,半导体科技也有许多重要应用。比如说,以前想知道患者是否有肠道性的疾病,需要用胃镜

从食道很插进去,很不舒服也很不方便。现在用半导体技术做的小型照相机,把这个药丸大小的照相机让患者吞下去,几个小时走过整个消化系统,把里面的情况看得清清楚楚。真是医生的好帮手啊。

简单的说,生活中到处都是半导体。此外,它对科技发展也是有很大的帮助,因为篇幅的关系,这里只能以点带面,用一个重要的科技奖项简单说明一下。大家都听说过诺贝尔奖,它是从1900年开始颁发的。在过去的100多年里,诺贝尔物理学奖有十几次是颁发给跟半导体科技直接相关的东西,比如说我们现在手机上用的这个摄像头,很多就是采用的CCD技术,就是在2009年获得了诺贝尔物理学奖。下面简单罗列一下:

半导体领域首次获奖的是1909年的布劳恩(Carl Braun),他因为无线电报的发明而与马可尼一道获得了诺贝尔奖,布劳恩的贡献包括半导体整流效应的发现,对于信号检测非常重要(图7)。

1956年,巴丁(John Bardeen)、布拉顿(Walter Brattain)和肖克利(William Shockley)因为发明晶体管而获奖。

1973年,江崎(Leo Esaki)因为发现和解释半导体中的隧穿效应而获奖。

1977年莫特(Nevill Mott)和安德森(Philip Anderson)因为非晶半导体的理论而获奖。

1985年,克利青(Klaus von Klitzing)因为发现量子霍尔效应而获奖。

1998年劳克林(Robert Laughlin)、斯托默(Horst Stormer)和崔琦(Daniel Tsui)因为发现和解释分数量子霍尔效应而获奖。

2000年阿尔弗雷夫(Zhores Alferov)、克罗默(Herb Kroemer)和基尔比(Jack Kilby)因为光电子学(半导体异质结激光器)和电子学(集成电路)方面的贡献而获奖。

2009年,博伊尔(Willard S. Boyle)和史密斯(George E. Smith)因发明电荷耦合器件CCD图像传感器而获奖。

2010年盖姆(Andre Geim)和诺沃肖洛夫(Kon-

stantin Novoselov)因石墨烯获奖。

2014年,赤城勇、天野浩和中村修二因为对蓝光二极管的重要贡献而获奖。



图7 半导体领域第一位诺贝尔奖获得者布劳恩(Karl Ferdinand Braun, 1850~1918), 1909年因为无线电报的发明而与马可尼一起获奖, 布劳恩的贡献包括半导体整流效应的发现, 对于信号检测非常重要

科技进步离不开半导体,不管是基础研究(例如引力波的探测)还是军事应用(机器狗搬运物资),都离不开半导体。但是,随着科技的不断发展,我们越来越接近物理和工艺的极限(所谓的“瓶颈”),“摩尔定律”有可能已经快到尽头了,接下来怎么办呢?科学家和工程师们在想各种方法来突破这个瓶颈。

前面说了,经济发展离不开半导体,我国的经济更是如此,2018年,我国仅仅进口集成电路就突破了2万亿元。我们国家一直以来都非常重视半导体产业,比如说,2014年就颁布了政策,设立一个1000亿元人民币的基金来推动半导体产业的发展。我们找人、买设备、建基地,希望加速提高我国的半导体科技的水平。但与此同时,整个国际环境也发生了变化。

美国、欧洲和日本对我国的半导体发展进行反制。我们说美国总统特朗普是最杰出的科普大师,

不是因为他帮助我们,而是因为他限制我们。实际上,在他当选总统后不久,还在他正式任职以前,美国的总统科技顾问委员会就发布了《确保美国在半导体领域长期领导地位》的白皮书,目的就是要阻止中国发展半导体科技。再比如说,五角大楼要求解释中国解释对硅谷的投资行为,以安全为理由阻挠我们正常地收购德国和日本的企业。这些事情都让我们认识到,关键技术是买不来的。

借此机会,我也稍微介绍一下我国半导体科技的发展历史。自新中国成立以来,党和政府就非常关心和支持半导体科技的发展。1956年初,就举行了一次半导体物理讨论会。1956年制定《十二年科技远景规划》的时候,把半导体科技列为57项任务之一,国家新技术4大紧急措施之一。1956年8月至1958年10月,我国创办了第一个五校联合半导体专业,开始自己培养半导体科技人才。为了创建我国半导体科学技术的研究发展基地,中国科学院半导体研究所于1960年9月16日成立,是我国第一个从事半导体科学技术的综合性研究所(图8)。

在我国半导体科技发展的各个历史阶段,半导体所都做出过突出的贡献:第一根锗单晶、硅单晶、砷化镓单晶;第一只锗晶体管、硅平面晶体管、固体



图8 旧貌和新颜:1960年创立的中国科学院半导体研究所迎来了建所60周年

组件;第一颗人造地球卫星“东方红一号”关键配套组件;第一只半导体激光器及我国第一代激光通讯机;第一代计算机所需的全部晶体管和固体组件;第一台硅单晶炉、区熔炉;第一只GaN蓝光激光器;第一只1.30微米GaInNAs量子阱激光器;第一只1.33微米InAs量子点室温连续激射激光器;等等。这些还属于填补国内空白、追赶世界潮流的工作。自21世纪以来,一些工作已经能够做到世界领先,比如说:世界第一只1.58微米GaInNAsSb量子阱室温连续激射激光器;世界第一只1.55微米GaInNAs量子阱RCE探测器;等等。

2001年,著名科学家黄昆获得了中华人民共和国最高科技奖(图9)。我们国家的半导体科学技术的发展,依赖于黄昆这样的理论学家、林兰英这样的材料专家和王守武这样的器件专家,以及以他们为代表的几万几十万科技工作者(图10)。

科技发展要响应国家的号召,要面向国民经济主战场。比如说,用于光纤到户的平面波光分路



图9 2002年2月1日,人民大会堂隆重举行全国科学技术奖励大会,江泽民主席亲自为黄昆先生颁发“中华人民共和国最高科学技术奖”



图10 几位先驱者:林兰英(1918~2003),黄昆(1919~2005),王守武(1919~2014),谢希德(1921~2000)。中国半导体科学技术的发展离不开以他们为代表的广大科技工作者的贡献

器,就是半导体所和河南省合作的一个高科技企业,经过几年的努力,占到了市场份额的50%以上,而且获得了多项奖励,2017年获得了国家科技进步二等奖。GaN发光二极管的研究也获得了国家科技进步发明二等奖,而且“高光效长寿命的半导体照明关键技术和产业化”获得了2019年度国家科技进步一等奖。半导体所还和江苏省合作,发展和应用高功率全固态的激光制造技术,建立了高科技公司,用来辅助汽车制造和高精密电路的制作,等等。

当然,也不能一味地为了发展经济而发展经济,还要注重基础科技的研究。在过去的几十年里,半导体所在这方面也做了很多工作,一个代表性的例子就是提高磁性半导体GaMnAs的居里温度,以便把半导体的性质跟磁性性质结合起来,从而有可能制作新一代的信息处理器件。

现在是最坏的时代,也是最好的时代。一方面,半导体科技跟我们的生活息息相关;另一面,我国的半导体科技距离世界先进水平还有一些距离,还在很多方面受到打压。

但是,中国在前进。在德国汉诺威工业博览会上,中国的机械手吸引了很多人的关注。国产的FPGA(一种常用的重要的半导体芯片)也取得了突破,中国不再受制于人,虽然它还达不到世界最先进的水平,但是差距已经大幅度的缩小,能够满足我们的日常生产生活的需要。以盾构机为代表的国产设备里,用了越来越多的国产器件和技术,所以才能够降低生产成本,让越来越多的城市里能够搞得起大规模的地铁建设,就些是因为半导体科技的贡献。以复兴号为代表的这个高铁,以及其他一系列科技手段,标志着半导体技术与我们的日常生活密切相关。在享受高科技的同时,我们也要进一步发展高科技,更不能忘记初心,应该牢记使命,为中华文明的伟大复兴做贡献。

简而言之,前途是光明的,道路是曲折的,欢迎大家来到半导体的世界。

(本文在2020年公众科学日的视频公开课的基础上修改而成。)



科苑快讯

以甲醇为动力的微型机器人

机器人往往由电池和插头供电。但是这个叫做RoBeetle的机器人却有些不同。这个昆虫型的微型机器人(重量小于1克的机器人)靠甲醇运行,甲醇是溶剂和防冻剂中常见的一种醇类。

甲醇这样的液体燃料,每单位体积能够比电池储存更多的能量,尤其是在小尺度上。这意味着,以甲醇为动力的微型机器人不需要额外的外部电源,如电线或电磁场。因此从理论上讲,在保持微型尺寸的情况下,它们相对于电动机器人有更大的自主性。

在新的研究中,研究人员设计了微型人造肌肉,可以收缩和放松——就像真的肌肉一样。该系统使用镀有铂粉的镍钛合金线,能够加速甲醇蒸汽的燃烧。这样产生的热量,会导致机器人腿上的电线变短,冷却后再延长,从而驱动RoBeetle移动。

研究组在《科学·机器人》(*Science Robotics*)期刊上报告,仅重88毫克的RoBeetle可以拖动重量达2.6倍自重的物体。它还可以额外携带95毫克的燃料,最多可为机器人提供2小时的电力。它还能爬上斜坡,并能在各种不同材质的表面移动,包括玻璃、泡沫睡垫和混凝土人行道。

科学家需要想方设法给机器人补充燃料,以使它能够在更长时间内持续供电。如果研究人员能够对RoBeetle进行编程,使其与人类操作者交流,这种以甲醇为动力的微型机器人,有朝一日就能充当人工授粉者或协助医生完成复杂的手术。

(高凌云编译自2020年8月19日 www.sciencemag.org)