



诺贝尔奖离我们并不遥远*

——从集成电路发明获 2000 年诺贝尔物理学奖谈起

王 阳 元

(北京大学微电子学研究所 北京 100871)

摘 要 J. S. Kilby 在 42 年前发明了集成电路,给人类生活方式和生产方式带来了巨大的改变.现在,它已成为当代各行各业智能工作的基石.集成电路的发明过程告诉我们:只有立足于创新,才能有所发明、有所创造.而集成电路与其他学科的结合所诞生出的新的学科和产业增长点,都向我们提供了宽广的创新空间.我们应本着创新和献身精神对人类社会的发展起到积极的推动作用.

关键词 集成电路,系统研究,技术创新

THE NOBEL PRIZE IS NOT FAT FROM US

——AN INSPIRATION FROM THE INVENTION OF INTEGRATED CIRCUITS

WANG Yang-Yuan

(*Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract The integrated circuit (IC) invented by J. S. Kilby 42 years ago has changed our way of life and production and has become the basis of intelligent operation in many fields. The history of the invention of ICs tells us that the invention depended on innovation. The combination of ICs with other sciences has created new research areas and industries giving us even further frontiers for innovation. We should do our best to push the development of society in the spirit of creativity and contribution.

Key words integrated circuit (IC), research, technology innovation

1 引言

集成电路的发明,作为一项技术发明,改变着人类生活方式和生产方式,对社会的进步起到如此重大的作用,充分体现了“科学技术是第一生产力”这一科学论断的正确性.正如最近美国工程技术界评出 20 世纪最伟大的 20 项工程技术成就中第五项电子技术谈到:“从真空管到半导体,集成电路已成为当代各行各业智能工作的基石.”集成电路之所以成为信息社会的基础产品,是由其本质所决定的.社会信息化的程度取决于对信息的掌握、处理能力和应用程度,而集成电路正是集信息处理、存储、传输于一个小小的芯片中.从 1958 年发明集成电路以来的 42 年间,集成电路产业产值的年增长率 $\geq 15\%$,在

技术上,集成度以年增长率 46% 的速度持续发展,世界上还没有一个产业能以这样的速度持续地发展.2000 年以集成电路为基础的电子信息产业成为世界第一大产业.集成电路的原料是地球上除氧以外含量最丰富的元素——硅,原始材料为硅石(silica)这样一块黑褐色小片,肉眼看上去,没有任何令人注意的地方,但经过人们的创新设计和一系列创新的工艺技术加工制造,成为集成电路芯片,将人类的智慧与创造固化在硅芯片上,因而是知识创新的载体,价值千金.这是典型的“点石成金”.它如水银泼地,无处不在,改变着社会的生产方式和人们的生活,不仅成为现代产业和科学技术的基础,而且正在创造着代表信息时代的硅文化(silicon

* 2000-12-04 收到

culture)。因此有科学家认为人类继石器、青铜器、铁器时代之后现正进入硅石时代。

集成电路产业对国民经济的战略作用首先表现在当代食物链关系上。现代经济发展的数据表明,国民生产总值每增长 100 到 300 元,需要 10 元左右电子工业产值和 1—2 元集成电路产值的支持。而且随着经济发展,这个数字在变化。据美国半导体协会(SIA)预测,到 2012 年,集成电路全行业销售额将达到 1 万亿美元(接近于 2000 年我国国民生产总值),它将支持 6 万亿到 8 万亿美元的电子装备和 30 万亿美元的电子信息服务业,后者相当于 1997 年全世界国民生产总值的总和。根据我们对美国、日本、韩国和我国国民生产总值、电子工业和集成电路(IC)增长率的数据统计^[1],发达国家在发展过程中都有一条规律,即集成电路产值的增长率(R_{IC})高于电子工业产值的增长率(R_{EI}),而电子工业产值的增长率又高于 GNP 的增长率(R_{GNP}),一般有一个近似的关系, $R_{IC} \approx 2R_{EI}$, $R_{EI} \approx 3R_{GNP}$ 。我国在 20 世纪 90 年代也符合这一规律。21 世纪经济是信息经济,目前发达国家信息产业产值已占国民经济总产值的 40%—60%,国民经济总产值增长部分的 65%与集成电路有关。集成电路产业已成为促进国民经济持续发展和保证国家安全的战略性的基础产业,是经济发展的基石。

1998 年,美国半导体协会发表了题为《美国半导体工业是美国经济增长的驱动器》(《America Semiconductor Industry Turbocharging the U. S. Economy》)一书,指出:“半导体是一种使其他所有工业黯然失色,又使其他工业得以繁荣发展的技术,半导体在本质上驱动着所有电子产品的进步。半导体工业在整个美国已是一个领先的制造业。”

2 集成电路发明过程

J. S. Kilby 在 42 年前发明集成电路不是偶然的。1923 年 11 月 8 日,他出生于美国 Jefferson 城。早在中学时代,通过与他父亲一起从事电话和无线电通信方面工作而对电子学发生了浓厚的兴趣。1947 年和 1950 年分别在伊利诺伊(Illinois)大学和威斯康星(Wisconsin)大学获得学士和硕士学位。从 1947 年开始,他参加了 Milwaukee 的 Globe-Union 公司的 Centralab 部门工作,这是一个从事无线电、电视机部件和助听器方面的制造厂。他作为设计和制造工程师,主要负责助听放大器和 RC 网络的工

作。

早在第二次世界大战期间和此后的朝鲜战争时期,军事上对电子装备的小型化及其可靠性提出了迫切的需求。当时一架 B-29 轰炸机要求上千个真空管和几万个无源元件。它的成本、体积和可靠性成为一个电子系统发展的制约因素。这就使众多部门,例如美国国家标准局(NBS)以及美国空军和海军都支持电子装备小型化的研究与开发工作。J. S. Kilby 在 Centralab 承担小型化的任务。随着 1948 年晶体管的发明,微型模块(micro-module)发展起来。

关于集成电路的概念的最早描述,应该说是由英国皇家信号和雷达机构(Royal Signal & Radar Establishment)的 G. W. A. Dummer 于 1952 年 5 月在电子元器件会议上提出的,但是在英国未能予以实现^[2,3]。

1952 年 J. Kilby 的工作单位 Centralab 从 Bell 实验室获得了制造晶体管的许可证,并被派往 Bell 实验室总部 Murray Hill 参加了两周的晶体管讨论班,回来后开始锗合金结晶体管的研制工作。利用晶体管开始音频电子装备的袖珍化工作,并负责建立了用于助听放大器和其他应用的小型生产线。

1954 年, Bell 实验室的科学家发明了用硅作晶体管材料,更有利于集成和小型化,而且军方的迫切要求提供了发展硅晶体管的重要机遇。由于 Centralab 并不具备从事硅的工作,而 Kilby 希望从事前沿性创新的工作,于是在 1958 年 5 月,他转到了德克萨斯仪器公司(TI)工作。TI 公司当时也从 Bell 实验室取得了晶体管制造的许可证。在那里,他仍然负责电子装备的小型化工作。在他对小型化 IF 放大器的仔细分析,特别是进行了成本分析后,他认为用传统的微型化模型的工作方式是解决不了问题的。解决问题的出路在于全半导体化——一个新的方法。因此他试图将电阻、电容等无源元件和有源元件都放在同一块半导体材料上。进一步的分析认为,有可能将这些元件同时“在位”制备在一起,并用互连形成电路。这时, Kilby 实际上已完成了集成电路的创新思维过程。他很快就画出了关于触发器(flip-flop)的构思,用硅的体电阻做电阻器,用 P-N 结形成电容器(1959 年 7 月 24 日的实验室笔记),如图 1 所示。

接下来是实验过程。1958 年 8 月 28 日,他用分离硅元件和生长晶体管等搭成了一个全半导体化的实验装置,证实是可行的。接着他着手制作一个单片集成电路。图 2 是他提出的相移振荡器电路和触发

Idea for phase lock which would need the best capacitors,

$$C = 1.36 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{f_{osc}}{10000}} \approx 1.25 \mu\text{f/in}^2$$

at 1 Volt f. 120

The following circuit element could be made on a single slice:

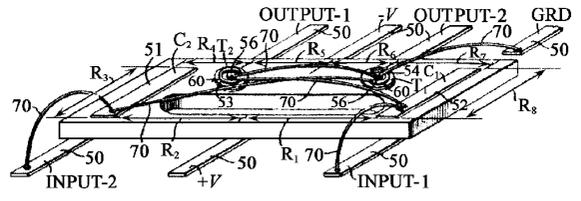
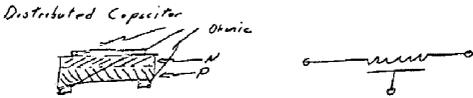
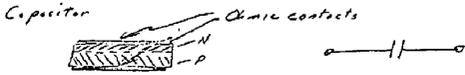
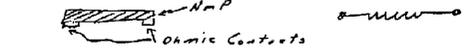


图3 应用了台式晶体管、体电阻、扩散电容和空气隔离的锗触发器的结构图^[2]

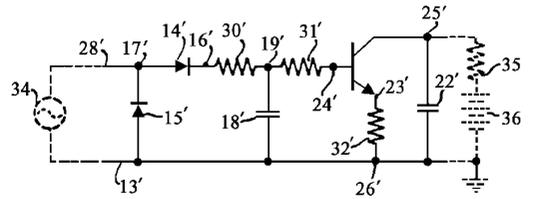
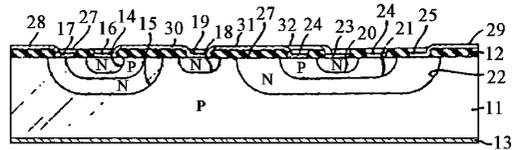
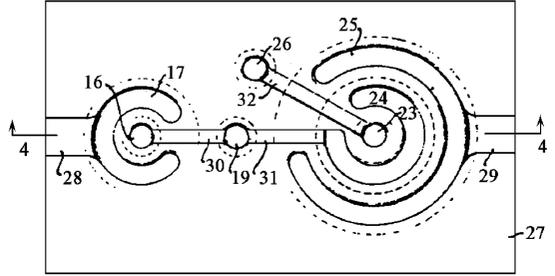


图4 Robert Noyce 基于硅平面工艺集成电路设计图 (用铝作互连)^[2]

电阻、扩散电容和空气隔离的锗触发器的结构图。

5个月以后,即1959年7月30日,仙童公司(Fairchild Co.)的Robert Noyce 申请了基于硅平面工艺的集成电路专利(专利号为No.2981877),以铝为互连.其设计图如图4所示.它更适合于大批量生产.

1962年,由于军事上的大量订单和部分商业应用,集成电路进入工业化生产阶段.

此后,Kilby一直从事集成电路的军事、工业和商业应用的开拓性工作,作为学术梯队的负责人,他研制成功了一个军事应用系统和第一个集成电路计算机.作为发明人之一,他发明了掌上计算器和用于袖珍数据终端热打印机.1970年,他离开TI公司作为独立发明人,探索硅太阳能电池,但仍以部分时间担任TI的顾问.1978年至1985年,他成为 Taxes

图1 Kilby 在1958年7月24日在实验室笔记中第一次记载了如何将电阻、电容和晶体管集成在一个硅片上^[3]

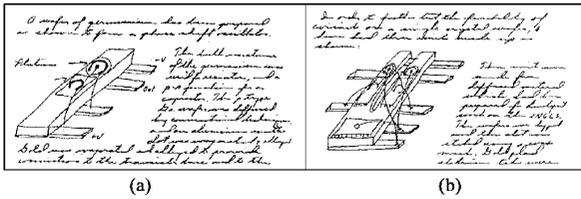


图2 Kilby 关于相移振荡器(a)和触发器(flip-flop)(b)的构思的实验室笔记^[2]

器电路.基于当时的TI生产条件,这些都还是基于锗晶体管基础上的,文献2描述了它的详细制作过程,并分别于1958年9月12日和9月19日完成.9月12日第一个集成电路振荡器在实验室进行了演示,标志着集成电路的诞生.

由于J. W. Lathrop 在光刻技术方面的帮助,1958年10月他开始研制新的锗触发器,并于1959年初完成.1959年2月,TI公司为此申请了小型化的电子电路(miniaturized electronic circuit)专利(专利号为No.3138743),其中包括图2中的相移振荡器和图3中的触发器.1959年3月6日,TI公司在纽约举行的IRE展览会的记者招待会上公布了“固体电路(solid state - circuit)”(集成电路——integrated circuit)的发明,图3是应用了台式晶体管、体

A&M大学资深教授。他共掌握有 60 多个美国专利。1970 年获得美国国家科学奖章并与福特(Henry Ford)、爱迪生(Thomas Edison)和怀特兄弟(Wright Brother)并列,进入美国国家发明家名人堂。他是美国工程院院士。他获得一系列奖励。在集成电路发明 30 周年时,TI 公司在他工作过的实验室附近专门为他建立了历史纪念馆。

在谈到 Kilby 对集成电路发明的伟大贡献的时候,我们不应忘记 Noyce 博士的贡献。Kilby 主要是原始创新的思想,而 Noyce 对集成电路制造有重大改进,使之能进入产业化,从而成为今天集成电路产业的基础。Kilby 和 Noyce 同时获得集成电路发明的不同专利,都获得了美国国家科学奖章,共同进入了美国国家发明家名人堂。

3 集成电路发明对我们科学研究工作的启示

Michael F. Wolff 在文献 [3] 中提出了一个令人深思的问题:尽管早在 1952 年英国 Dummer 已经提出了集成电路的概念,但是为什么集成电路的发明不在英国而在美国?他总结了下面几条:

(1) Kilby 和 Noyce 都强调广泛的半导体技术基础的重要性。1952 年的英国并不存在这个客观基础,但美国却存在。许多科技工作者及其所在的公司早期在技术上的贡献包括扩散、光刻、薄膜蒸发等都是集成电路发明的基础。

(2) 对小型化的客观需求,特别是军事上应用提出的迫切需求,促进了集成电路的发明。基于同一理由,军队需求成为集成电路的最早用户,促进了集成电路的工业生产。

(3) 集成电路发明不是偶然的事件,相反地,它是对客观存在问题的一系列解决方案研究的结果,是技术发展的客观必然。

(4) Kilby 和 Noyce 所在的两个公司 TI 和 Fairchild 公司都是年轻、成长中的公司,这里的管理者都营造了良好的有利于创新的氛围。而 Dummer 认为这正是当时的英国所缺乏的。

Dummer 还特意强调^[3],美国公司所以具有创新的精神,还有下列一些条件:

(1) 电子工程师往往用自己的资金或用风险基金创业,因而工作勤奋;

(2) 政府支持(政府给予合同)往往帮助他们起步;

(3) 国内市场需求是一个成功的重要因素;

(4) 在美国,鼓励员工在公司中持股,给予员工一个激励的机制。

Dummer 认为,一个企业的成功总是有赖于一些人的创新和献身精神。

这些总结和归纳虽然发表在 20 多年前,但对当前的科学研究工作和科技成果的产业化仍有着深刻的指导意义。

此外,我在这里还想强调两点:

(1) 在针对客观需求开展系统研究工作的时候,我们决不能亦步亦趋地沿着已有的技术路线走下去,必须立足于创新,才能有所发明、有所创造。这在集成电路发明过程中表现得十分突出。1958 年初,在小型化的发展过程中,当时有三个方面工作,一是军队支持信号公司(Signal Corps)从事微型模块的工作(micro-module),在已有陶瓷芯片基础上做元器件的小型化和集成;二是海军重点支持薄膜技术;三是空军支持称为“分子电子学”的集成工作。Kilby 原来所在的公司 Centralab 继续在高介电常数的基片上用小型元器件制造低成本的 RC 电路。每年生产达到 1.4 亿块。但 Kilby 没有沿着原有技术路线走,他在仔细分析现有模块的基础上认为,出路在于全半导体化,在于创造一个全新的工艺。因此科学研究工作者的思维方式,应当是从分析现有方法的矛盾入手,提出在本质上有创新的思路去解决需求和现实的矛盾。无论是 Kilby 还是 Noyce,根据他们“上司”的回忆,他们都具有创新精神,充分利用已有成果,但并不拘泥于现状。这一点对我们人才培养不无意义。

(2) 科学研究需要团队工作,而团队工作需要多学科的合作。Kilby 博士在谈到集成电路发明经验时说,50 年代参加集成电路研制工作的人员,具有宽广的、不同的背景,有物理学家、电子工程师和设计师。这与今天专业化发展不同,专业化趋势是目前发展的需要,但有可能使革新和发明变得更加困难,而多学科科学家和工程师参加,虽然需要一个互相了解工作的过程,但却会带来创新的观念和思想。这与晶体管发明过程的经验是相同的。这一点对我们基础研究工作和创新工程的组织有着重大的参考价值。

4 21 世纪赋予我们重大的创新空间

集成电路发明是这样一个客观的必然过程,使

我们从事这一行业的科技工作者感觉到它离我们很近。诺贝尔奖从偏重基础研究的创新到今天,承认一项 42 年前的技术发明对人类社会进步的推动作用,而授予诺贝尔物理学奖,这对我们从事信息领域的科技工作者,特别是青年科技工作者,无疑是一个重大的鼓舞。

21 世纪硅微电子技术发展有以下三个主要方向。

4.1 继续缩小器件的特征尺寸

基于市场竞争,不断提高产品的性能/价格比是微电子技术发展的动力。缩小特征尺寸从而提高集成度是提高产品性能/价格比最有效手段之一。在新技术的推动下,集成电路自发明以来的 40 年间,集成电路芯片的集成度每三年提高 4 倍,而加工特征尺寸缩小 $\sqrt{2}$ 倍。这就是由 Intel 公司创始人之一 Gordon E. Moore 博士在 1965 年总结的规律,被称为摩尔定律。图 5 表示它的发展趋势。

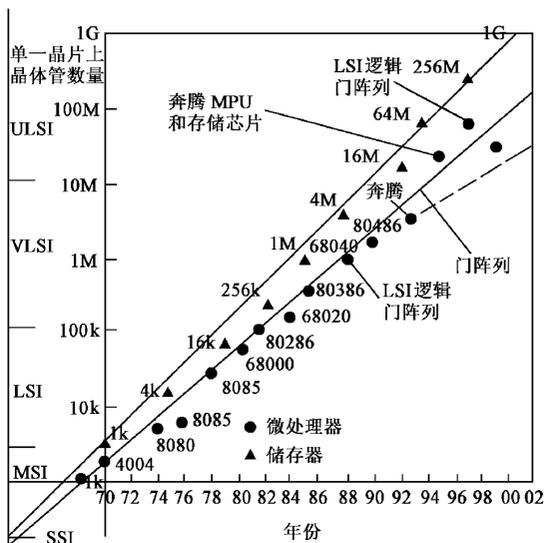


图 5 集成电路技术的发展趋势

集成电路技术是近 50 年来发展最快的技术,实际最小特征尺寸从 1959 年以来 40 年间缩小了 140 倍,而平均晶体管价格降低了 10^7 倍,作一个形象的比喻,如果小汽车也按此速度进步,那么现在小汽车的大小只有 1.8cm,而价格只有 1 美分。

表 1 是美国半导体协会等机构于 1999 年预测的半导体技术加工特征尺寸及相应代表产品的发展里程碑表。按其预测,2003 年将开始有 4G DRAM 进入生产,它的集成度达到 4.4 亿个元器件,这相当于可储存 1 年半的报纸信息量(19000 页)或 47min 的动画或 6h 的语音。

随着特征尺寸的不断缩小,器件尺度进入纳米

量级,时间尺度为飞秒量级的新器件将遇到器件结构、关键工艺、集成技术和材料体系以及理论基础等方面的一系列问题,越来越接近其物理限制,这就呼唤我们去创新,去探索新的电子功能材料体系和基于新的物理原理基础上的新器件。

表 1 半导体发展进程预测表(SIA 1999 年版)

年份	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2008	2011	2014
DRAM 半径距/nm	180	165	150	130	120	110	100	70	50	35
ASIC 栅长/nm	180	165	150	130	120	110	100	70	50	35
MPU 栅长/nm	140	120	100	85—90	80	70	65	45	30—32	20—22
存储器引入阶段产品代	1G		2G		4G		8G		64G	
存储器生产阶段产品代	256		512M		1G		2G		16G	
MPU 芯片功能数(百万晶体管)	23.8		47.6		95.2		190	539	1523	4308
MPU 引入阶段芯片面积/mm ²	340		340		372		408	468	536	615
ASIC 百万晶体管/cm ² (自动布局)	20	28	40	54	73	99	133	328	811	2000
ASIC 上升阶段芯片最大面积/mm ²	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
硅片直径/nm	200	200	300	300	300	300	300	300	300	450
在引入阶段 DRAM 封装后单位比特价(百万分之一美分)	42		21		11		5.3		0.66	
在生产阶段 DRAM 封装后单位比特价(百万分之一美分)	15		7.6		3.8		1.9		0.24	

1997 年,我们去参观朗讯公司和贝尔实验室时,他们正在大力开展这方面的研究工作,包括基础器件和工艺技术等方面。一位主管的副总裁告诉我们说,贝尔实验室的科学家已有 6 位获得过诺贝尔奖,第 7 位获得者应当从这个领域出现。

4.2 系统集成芯片(system on chip)

随着系统向高速度、低功耗、低电压和多媒体、网络化、移动化的方向发展,系统对电路的要求越来越高,传统集成电路设计技术已无法满足性能日益提高的整机系统的要求。同时,由于 IC 设计与工艺技术水平提高,集成电路规模越来越大,复杂程度越来越高,已经可以将整个系统集成成为一个芯片。目前已经可以在一个芯片上集成 10^8 — 10^9 个晶体管,而且随着集成电路制造技术的发展,21 世纪的微电子技术将从目前 3G 时代逐步发展到 3T 时代,即存储容量由 G 位发展到 T 位,集成电路器件的速度由 GHz 发展到 THz,数据传输速率由 Gbps 发展到 Tbp(注:1G = 10^9 ,1T = 10^{12} ,bps 为每秒传输数据位数)。

正是在需求牵引和技术推动的双重作用下,出现了将整个系统集成在一个集成电路芯片上的系统芯片(system on chip,简称 SOC)概念。

系统芯片(SOC)与集成电路(IC)的设计思想是不同的,它是微电子设计领域的一场革命。21世纪,要求移动、实时处理信息,随时随地获取信息、处理信息成为把握先机而制胜的武器。所以与Internet结合的可移动(mobile)、袖珍的(portable)实时信息处理的系统集成芯片将是一个重大的发展方向,有大量的创新工作需要我们去。

4.3 微电子与其他学科的结合诞生新的学科和产业增长点

微电子技术的强大生命力在于它可以低成本、大批量地生产出具有高可靠性和高精度的微电子芯片。这种技术一旦与其他学科相结合,便会诞生出一系列崭新的学科和重大的经济增长点,作为与电子技术成功结合的典型例子便是MEMS(微机电系统)技术或称微系统技术和生物芯片等。前者是微电子技术与机械、光学等领域结合而诞生的,后者则是与生物工程技术结合的产物。

微电子机械系统是微电子技术的拓宽和延伸,它将微电子技术和精密机械加工技术相互融合,实现了微电子与机械融为一体的系统。MEMS将电子系统和外部世界联系起来,它不仅可以通过感受运动、光、声、热、磁等自然界的外部信号,把这些信号转换成电子系统可以认识的电信号,而且还可以通过电子系统控制这些信号,发出指令并完成该指令。从广义上讲, MEMS是指集微型传感器、微型执行器、信号处理和电路、接口电路、通信系统以及电源于一体的微型机电系统。MEMS技术是一种典型的多学科交叉的前沿性研究领域,它几乎涉及到自然及工程科学的所有领域,如电子技术、机械技术、光学、物理学、化学、生物医学、材料科学、能源科学等。

MEMS的发展开辟了一个全新的技术领域和产业。它们不仅可以降低机电系统的成本,而且还可以完成许多大尺寸机电系统所不能完成的任务。正是由于MEMS器件和系统具有体积小、重量轻、功耗低、成本低、可靠性高、性能优异及功能强大等传统传感器无法比拟的优点, MEMS在航空、航天、汽车、生物医学、环境监控、军事以及几乎人们接触到的所有领域中都有着十分广阔的应用前景,例如微

惯性传感器及其组成的微型惯性测量组合能应用于制导、卫星控制、汽车自动驾驶、汽车防撞气囊、汽车防抱死系统(ABS)、稳定控制和玩具;微流量系统和微分析仪可用于微推进、伤员救护;同时MEMS系统还可以用于医疗、高密度存储和显示、光谱分析、信息采集等等。现在已经成功地制造出了尖端直径为 $5\mu\text{m}$ 的可以夹起一个红细胞的微型镊子,可以在磁场中飞行的像蝴蝶大小的飞机等。

上述三个方向都向我们提供了宽广的创新空间。信息与能源、材料一起,作为人类社会的重大资源,对它的利用还仅仅是开始。不管是科学发明还是技术发明,只要对信息的采集、传输、处理、存储、执行或显示有重大革新,都会使人类对信息资源的利用有重大飞跃,从而对人类社会的发展起着积极的推动作用。从一定意义上来说,这些都是有可能获得诺贝尔奖的领域,因而它离我们并不遥远。

参 考 文 献

- [1] 王阳元主编. 集成电路工业全书. 北京:电子工业出版社, 1993. 1088—1094 [WANG Yang-Yuan. Integrated Circuit Industry Collected Works. Beijing: Electronics Industry Publishing House, 1993. 1088—1094 (in Chinese)]
- [2] Kilby J S. IEEE Trans. on ED, 1996, ED-23(7): 648
- [3] Wolff M F. IEEE Spectrum, 1976(8): 45



作者简介

王阳元,男,1935年1月生,1958年毕业于北京大学物理系。现为北京大学教授、博士生导师、中国科学院院士,北京大学微电子学研究所所长,中国电子学会常务理事,《半导体学报》和《电子学报》副主编,《微电子学科学丛书》主编,国家产业政策专家咨询委员会委员,信息产业部科技委委员(电子),国际固态电路会议(ISSCC)远东程序委员会委员, IEE Fellow 和 IEEE Fellow 等。现从事微电子学领域中新器件、新工艺和新结构电路的研究,发表科研论文130多篇,出版著作5部,现有16项重大科技成果,获全国科学大会奖、国家发明奖、国家教委科技进步一等奖、光华科技基金一等奖等共13项国家级和部委级奖励,是享誉中外的著名微电子学家。