

摩尔定律的困难与前景 ——从摩尔第二定律谈起

Difficulties and Prospects of Moore's Law: Beginning with Moore's Second Law

纪磊/JI Lei

西安电子科技大学电子工程学院, 西安 710071

School of Electronic Engineering, XiDian University, Xi'an 710071, China

[摘要] 分析了摩尔定律在制造成本、光刻等关键技术,以及物理基础思想等方面的困难和制约。评述了为维护摩尔定律的基本原理学术界在分子电子学、量子技术等方向上的工作,评析了摩尔定律在未来电脑、网络及微电子装置等前沿高科技产业发展中的启发和引导价值,认为摩尔定律的基本思想目前仍有效且适用。

[关键词] 摩尔定律;摩尔第二定律;困难;价值

[中图分类号] TP304

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2006)07-0089-04

Abstract: Moore's Law has difficulties in key technologies such as production cost and semiconductor microlithography, as well as in basic physical ideas. This paper gives comments on researchers' endeavors to defend the basic rationale in the fields of microelectronics and quantum technology, and examines the instructive value of Moore's Law in the development of high-tech industries such as future computers, Internet and micro-electronics equipments. A most important point is the basic idea of Moore's Law is still effective and applicable at present.

Key Words: Moore's Law; Moore's Second Law; difficulty; prospect

CLC Number: TP304

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2006)07-0089-04

1 从摩尔定律到摩尔第二定律:问题的提出

1965年,《电子》杂志请摩尔预测微芯片工业的前景,此时微芯片工业正处于初创时期,英特尔公司还未创建,当时生产和销售的芯片数量极少,摩尔手头没有多少数据可以用来进行预测。尽管如此,摩尔还是大胆地提出了一个描述集成电路集成度和性价比的基本假说,即处理器(CPU)的功能和复杂性每年(其后期减慢为18个月)增加1倍,而成本却成比例地递减^[1]。摩尔还预见到:电脑不仅可以用来保存数据和作为强大的计算机,而且一旦处理器芯片的功能像大型机一样强劲,价格又非常低时,电脑将会应用于社会的每个领域,如家庭电脑、手持电话等都会问世。信息的集中处理将会被分散处理所取代,未来人们将会生活在电脑无处不在的社会里,从而完全改变产业结构、就业结构和生活方式的社区结构,最终引起社会经济形态的转型。后来的IT也正是朝着这个方向发展。实践证明,摩尔的预言非常地接近现实。这样,摩尔假说变成科学理论,信息产业界称之为“摩尔定律”。经济学家从职业的眼光,从产业和经济成长性上赞同并认定摩尔定律。

20世纪90年代,美国经历了19世纪50年代以来历时最长的经济繁荣,当时经济的稳定增长和低通货膨胀率深受人们的赞许,以至许多经济学家认为国家正在经历着一场根本性的变革。他们说,驱动变革的一个最重要因素就是芯片能力的持续上升。美国西北大学经济学家说:“生产率的不断提高,至少有一半应归功于计算机生产率的提高。”^[2]据斯坦福大学经济历史学家认为:“电力用了20多年时间才对生产率产生影响,计算机也遇到相同时间的延缓。但现在,计算机是改善生活水准最重要的单项技术。只要摩尔定律继续存在,我们会使生活充裕起来。它将使我们子孙后代的生活变得更加美好。”^[2]

作为一名科学家,摩尔并不缺乏批判的眼光,计算机能力的激增对未来已变得如此重要,有关摩尔定律有效性、未来前景和适用性的讨论格外引人注目。摩尔还多次表示,这条规律并非真正的物理定律,“摩尔定律”总有一天会受到人类在集成电路上不断缩小物件的能力限制。同样的,如果受到某些不可抗拒因素,诸如自然灾害、战争等,也同样会阻碍人类在技术上的发展。

摩尔认为,摩尔定律是有极限的。摩尔

表示,在2010至2020年之间,维持每2年增加1倍的这种速度的最大单一因素(通过按比例缩小技术缩小芯片的体积)可能荡然无存。他同时预测,他自己所创造的摩尔定律可能在2010至2020年达到思想和应用上的极限而失效,也就是说,以硅集成电路为核心的电子信息技术所主导的社会经济形态会被另外一种技术经济社会形态所代替。

1995年,摩尔在国际光学工程协会的一次会议上回顾了微芯片的发展进程。他认为,从技术和工艺方面,继续坚持他的定律所预测的道路会有越来越多的困难和障碍;而从经济和成本方面,摩尔第一定律关于制造成本同比下降的假说可能会失效,在未来,制造芯片的成本会不断增加。摩尔指出,资本投入正以比收入快得多的速度增加,“技术进步的速率正受到财务现实的抑制。某些技术创新,不论它们是如何有利,但在经济上也许不可行。”^[3]电子信息学界和业界将芯片成本趋升的预言称为摩尔第二定律。关注成本趋升问题的摩尔第二定律引人注目,但事实上,除了经济学家和摩尔初期所关心的成本问题之外,摩尔定律还面临着工艺技术、理论基础与物理思

收稿日期:2006-02-17

作者简介:纪磊,男,西安电子科技大学电子工程学院,本科生;E-mail: pangwei6868@sina.com

想上的挑战。

有人认为,摩尔第二定律对于从事超音速飞机、磁悬浮列车、高速大运力公共交通工具、大型粒子加速器和许多受到高成本制约的其他高技术的研究人员,也会有预警和启示的作用。在过去 100 年中,工程师和科学家们已反复表明人类的足智多谋,可回避自然法则带来的种种困难。但他们在躲避经济规律影响方面取得的成功少得多。国内有些学者曾对此做出过一些评论^[3]。

2 摩尔定律面临的困惑和问题

2.1 制造成本的技术制约

从技术发展上看,摩尔第二定律并不是摩尔单纯关于技术的理论假说,而是实验室在研发和讨论中产生的一个现实问题。它假设,虽然晶体管可以做得更小,但技术变革变得更加困难,相应地,它会变得非常昂贵。

根据摩尔第二定律,经济因素最终会限制半导体的进一步发展,整个工业将受限于过于昂贵的技术。刻制工艺和技术是集成电路工业的关键技术,光刻机已如此昂贵,但价格还在上涨。上到尖端的航天技术,下到我们天天经历的日常生活,电子芯片对于现代文明的影响可谓无处不在。我们身边,从电话、电视甚至厨房设备,几乎所有需要电力驱动的产品都有着—块电子芯片,而所有的芯片,又无一例外都是光刻工艺的产物。光刻的成本已经占整个晶片成本的 30%。它不仅是组装过程中最贵的一道工艺,而且是半导体生产线上最贵的部分。这关系到每个生产商。同时,由于行业的知识和组织特性,电信业的发展依赖于产品快速成型、短时间地进入市场以及转向灵活,所有这些都使成本趋于上升。另一个成本因素是光刻在芯片上的掩模版所需的花费。掩模版制作类似于照片的缩影过程,但是它要昂贵得多。掩模版的制备在成本因素中可以说是最重要的一部分,而每只晶体管的成本在推动电信业发展的变量中也是非常重要的一个因素。伴随着新一代产品的成功,晶体管一定是尺寸更小、更加紧密地排列在硅片上。所以,制造商不仅要制造出更小的部件,而且必须把部件更紧凑地组装起来,这些因素使掩模版的成本上升。

最近,半导体工业获得了重要的进展,发现利用特殊的光学技术可以光刻细线条,线宽尺寸比光的波长还要小。今天,使用波长为 248 nm 的光光刻 100 nm 的线宽已经是可能之事了。但这个工艺在产业化和实现上存在的一个问题就是,在 2 个部件之间的最小间距是 1 个波长,这是物理学的一个基本定律,不可能轻易克服。只要使用光技术来光刻芯片,2 个部件之间的距离就不能小于光的波长。

预测表明,近年就可以制造出线宽 100 nm 的晶体管。晶体管的成本取决于所占的面积。由于光刻技术本身存在的问题,每个晶体管成本下降的速度并不能达到业界想

要的那么快。

同时,光刻只是在半导体上刻出晶体管器件的结构,以及晶体管之间连接的通路。要真正地实现电路,则还需要掺杂、沉积、封装等系列芯片工艺手段。但光刻是所有芯片产生的第一步,整个芯片工艺所能达到的最小尺寸也是由光刻工艺决定的。集成度越高的芯片越需要更微妙的光刻技术支持。

2.2 纳米尺度的技术限制和作为替代品的碳器件

人类对材料的处理可以归结为对大量分子、原子的“批处理”,原子与分子的尺寸均在纳米量级。长期以来,纳米尺度一直被视为禁忌,因为根据量子理论的测不准原理,原子不能精确地定位于空间某一点,所以不可能对单个原子进行处理。到了 2005 年,芯片制造技术将达到硅的物理极限——那时硅层的厚度可能只有 1 nm,因为再薄将失去导电性^[4]。将来,科研人员和工程师可能会采用像锗之类的半导体或是像金之类的贵重金属,也可能采用玻璃或金刚石来生产芯片。

1991 年科学家发现了“超级纤维”碳纳米管(Carbon Nanotube)。碳纳米管是由石墨碳原子层卷曲而成的碳管,管直径一般为几纳米到几十纳米,管壁厚度不足 1 nm,像铁丝网卷成的一个空心圆柱状“笼形管”。它非常微小,5 万个并排起来才有人的一根头发丝宽,实际上是长度和直径之比很高的纤维。作为石墨、金刚石等碳晶体家庭的新成员,碳纳米管韧性很高,导电性极强,场发射性能优良,兼具金属性和半导体性,其潜在用途十分诱人。碳纳米管可用做半导体,这对集成电路和信息技术无疑是个好消息。用碳纳米管制成器件,其晶体管密度可比当前最先进的 0.13 μm 硅器件高 6 万倍。这意味着碳器件处理器的性能潜力几乎没有极限。于是,在分析了碳纳米管的电子特性以后,人们将会转入到碳器件的开发研究。

IBM 与 NEC 合作,于 1998 年在实验室里用一根半导体性的碳纳米管制成了场效应晶体管(FET)。在这之后,其他研究单位也制成了在原理或结构上有所不同的纳米晶体管。碳器件目前所处的状况与 1957 发明集成电路时的情况类似,其成果的意义主要是原理和概念的验证。何时信息产品能换上碳器件还不能肯定,所能肯定的是,以后碳器件作为硅替代品的可能性最大^[4]。金、金刚石和玻璃将彻底变革摩尔定律——如果采用这些材料生产芯片,摩尔定律就不是在 18 到 24 个月的时间内使芯片的性能提高 1 倍,而是使芯片的性能获得十几倍甚至上百倍的提高。碳器件对于集成电路的影响将使摩尔定律倍增判断失去效力。很快,利用硅来制造体积更小、功能更强大的半导体芯片就会“黔驴技穷”了。

2.3 物理理论和思想上的限制

2.3.1 量子思想的限制

量子密码通信方案的最早提出者之一

贝纳特教授认为,摩尔定律只是从理论上预测到传统硅芯片计算机作为一种趋势会达到它的极限,因为这种极限只有在处理器的特征尺寸到了原子尺度大小时才会出现。毫无疑问,要等到这一天大概需要几十年的时间。但大多数量子科学家则认为,极限不会那么久才出现。最早提出离子阱离子计算等诸多重大新学术思想的奥地利科学家左拉教授给出了一个相对的估计数,他认为大概 10 年后传统计算机的存储器将会遭遇极限。现在比较权威的看法是,根据摩尔定律推测出的 10 年左右的时间就是经典计算机的极限。Intel 公司的一些科学家也赞同这一看法。

从运算速度方面看,经典计算机之所以会遭遇极限,是因为它是一个不可逆的体系,会耗能、发热和限制集成度。如果以现有的功耗处理水平推算,随着芯片集成度的提高,到 2010 年就会达到火箭发射时高温气体喷嘴的水平;2015 年就会与太阳的表面一样热。可见,研制可逆的体系将是微电子学家们追求的新目标,而量子力学体系的演变就是一个可逆的体系,所以目前全球众多科学家正在研究如何充分利用量子力学的性质制造量子计算机。这种计算机所具有的并行处理能力是现在的计算机所做不到的。一种不很成熟的看法认为,“量子电脑”将成为摩尔定律的“终结者”。

2.3.2 物理思想的技术障碍

纵观集成电路的发展历史可以发现,摩尔定律面临的困惑和问题,从基础上看可能会来自物理上的障碍,即集成电路和相关半导体装置的最小特征尺寸无法无限缩小。若尺寸小于一定的限度,集成电路会因量子物理法则而停止工作。因为,在尺寸缩小的同时,芯片中杂质原子的密度会增大,当这些杂质原子增加时,它们会聚集在一起并形成—个不导电束,从而使芯片无法使用。可悲的是,今天的芯片中包含有最大可允许程度的杂质原子,芯片的质量实际上已经到了可接受的极限。同样,对晶体管工作至关重要的门电路氧化绝缘材料已经变得非常薄,甚至已经开始出现外漏电流的情况,即沟道中的电流通过氧化层经栅极流出。当氧化层继续变薄时,它可能会导致电路失效。如果氧化层不能继续变薄,芯片尺寸就不可能继续缩小^[5]。并且芯片越小,产生的热量就越多,耗电量也会大大增加,这对电路本身已造成巨大的危害。

3 拯救摩尔定律的基础理论进展与技术成果

虽然摩尔定律无论在成本和关键技术发展所依赖的物理基础上遇到了众多的问题和困难,但是大多数科学家并不认为它的基本原理已经失效,而是认为可以通过分子电子学等基础理论研究、单个原子处理技术的研制、碳等替代品的开发、量子计算机的方案等,努力把体积小—型化推向前进,找到降低能耗的方法;通过适应、修改,提出辅助

纪磊：摩尔定律的困难与前景——从摩尔第二定律谈起

条件和假说,保证摩尔定律基本原理的有效性。同时,技术研制的现实也说明,在网络、光纤通信、个人计算机方面,摩尔定律的基本原理仍是成立的,是有前途的。

3.1 作为未来摩尔定律可能的理论基础的分子电子学进展

《Science》在2001年12月21日出版的那期刊物上发布了该刊遴选的2001年十大科技突破,“纳米计算电路”高居首位。2001年分子电子学方面主要的3种方案可简述如下^[6]。

1) 美国哈佛大学的C. Lieber等用交叉的纳米线(nanowire)做成二极管和场效应晶体管(FET)。用二极管可做成逻辑电路中的“或门”和“与门”,而FET可适应其他电路的需要。方法是先制备2根材料分别为单晶p型硅和n型氮化镓的,直径为10~25 nm的纳米线,然后用微射流法使它们作交叉放置,再适当加热,使纳米线之间产生很薄的氧化物绝缘体。这样就可自然形成一种纳米尺寸的栅极接点。此外还有一个好处是,这种纳米线既可以做成器件,还可以起到连接线的作用,结构上可特别简单。

2) 荷兰台尔福(Delft)大学的C. Dekker等用纳米碳管制备FET。他们曾经发现在硅基板上吸附在2个金属接点之间的单一半导体碳管可具有FET的性能。但栅极的接点实际上是整个硅片,而且功率增益<1,原因是栅极与碳管之间的氧化硅绝缘体相当厚,使二者之间的电荷耦合不佳。新的改进是在氧化的硅片上蒸上铝膜,用电子束刻蚀法做出个别的局域栅极接点,然后暴露在空气中,使铝表面自动形成很薄的绝缘层(厚度估计为几纳米)。再把直径约1 nm的单壁纳米碳管用dichloroethane悬浮液分布在硅片上,最后用电子束刻蚀金膜做成电极和连接线。这种FET的功率增益可达到10,开关前后的电阻比大于 10^5 。可在室温下使用。预计可用以制备逻辑电路的各种“门”、静态随机存取存储器(SRAM)和振荡器。

3) 美国贝尔实验室的鲍哲南等用有机分子制备FET。先用常用的光刻方法把高掺杂硅片刻成垂直的台阶,作为栅极;然后用厚度为30 nm的二氧化硅作为栅极绝缘层;再在真空中蒸发一层金作为源极;然后在烷硫醇(alkanethiols)中混以共轭有机分子dithiolbiphenylene或dithiolterthiophene,构成的单分子层均匀地形成在金膜上;最后再用金作为漏极。这种器件的特点是沟道的长度决定于每个单分子的长度(约为1~2 nm),而对过去的其他分子器件来说,有效的沟道长度仍由刻蚀来决定,而并非由分子本身的长度来决定。这种材料目前已被用于制成逻辑电路中的“非门”。

这些方案在考虑分子电子器件的同时,还提出一些可能的组装方法,以便最后达到拼装纳米计算机结构的目标。这一点被认为是很大的进展,步上了新的台阶。有人认为,2001年内科学家们把分子组装为

基本电路,使大家对纳米电子学发展的新领域看到了希望^[7]。

应当注意到,虽然这几个方案都取得了很大的进展,特别是从发展的角度来看,允许适应复杂电路中器件多样化的需要;但在工艺徒动现象、短路、非单分子制约等方面还有很多不足之处。由于极强的交叉性和探索性,纳米电子学的实用化还有很长的路要走。

3.2 30 nm 晶体管的研制

最近,Intel公司宣布已研制出一种将大大延长摩尔定律寿命的新技术。利用该新技术,晶体管的体积将由原来的130 nm缩小到30 nm(0.03 μm)。这不仅能够大幅提高芯片的工作频率,而且其能耗也将大大降低,所需的工作电压还不到1 V^[8]。

Intel公司的研究人员采用了超微紫外线(DUV)印刷刻蚀技术制造出了为数不多的30 nm晶体管样品。其下一步的研究是如何采用适于大规模生产的极微紫外线刻蚀技术(EUV)来进行生产。EUV技术来源于哈勃太空望远镜,是为“星球大战”计划而开发的。30 nm到底有多大,恐怕没有几个人知道。用1个直径10 nm的金质微粒,与Z-DNA抗体绑在一起,即可以制造出30 nm晶体管,这个晶体管直径约为那颗金质微粒的3倍。

晶体管表面的涂层物质称为“氧化涂层门关”(gate oxide)。该门关对晶体管之间的交换速度会造成影响。但在30 nm晶体管技术中,该层的厚度仅为0.8 nm。据Intel公司介绍,采用了该氧化涂层门关技术的30 nm晶体管开关速度每秒可达100亿次。更形象具体地说,3 000万个30 nm晶体管垂直排列在一起,其高度也只有2.54 cm左右。

3.3 降低功耗、改善高速性能的努力

为了保持摩尔定律在当今电子产品微型化趋势中的基本角色作用,工程师们通过降低功耗来继续改进数字时代那些微型但作用巨大的电子设备。

芯片的研究机构和制造商正在专门研究的一个领域是如何降低能耗。在功率更小的装置中,晶体管变得体积更小、处理速度更快、价格更便宜。但是,最终的目标是使所有功能部件以基本相同的比率集成到单一设备中,以减小能耗。减小工作电压能加快“体积更小、速度更快、价格更便宜”目标的实现,也就是说,在一个芯片上可以放置更多的晶体管,这些芯片就能更有效地执行复杂及能耗高的任务。功耗的减少实际上有益于电子市场向手持无线设备的方向发展,并且是向体积更小的方向转变。例如便携式电脑,它的大部分功率是液晶显示器消耗的。个人掌上电脑(PDA)这样使用小功率、长寿命电池的电子设备,是每个消费者都希望拥有的移动设备。重复充电的次数越少,性能越好。

在通信业中,现在可以把许多功能处理模块集成到中央处理器中。正在发展的

一项技术是把低功耗的集成电路存储器集成到中央处理器中,而低功耗的集成电路存储器在手持无线设备中的作用非常关键。集成电路制造水平持续提高的最大受益者是无线设备。目前,人们正在设计专门适用于无线应用的内存模块。同时,DRAM和闪存也正被嵌入到其他类型的模块中。制造商最高兴的是所有的功能模块的加工制造都可以在常规的硅生产线上进行,从而降低制造成本。

贝尔实验室和世界上其他研究机构的工作,推动了数字信号处理器的快速发展,并将继续展示它们新的应用。例如,研究人员正集中精力开发它们在超高速和极低电压条件下的应用。第一台工作电压为1 V、频率100 MHz的DSP样机已经问世。就实现超低电压条件下超高速处理的各种应用而言,以上这些技术的进步预示着将来的美好前景。

4 摩尔定律基本思想在产业中的有效性与价值

目前,从与电子信息技术及产业相关的前沿技术与产业的实际进展分析,摩尔定律的基本思想仍然有效,具有明显的应用价值和潜力。对于相关的技术研发和产业发展具有思想上的启发和引导作用。

4.1 摩尔定律与计算机及集成电路产业

毫无疑问,除了增加CPU的集成度之外,高速度、低能耗、高性能和低成本将是未来CPU的发展方向。

目前,Intel和AMD最先进的CPU都已经采用了0.13 μm 技术。就目前的硅芯片而言,减小器件的特征尺寸是提高CPU集成度和速度的关键。那么,按比例缩小的技术能使芯片的特征尺寸缩小到一个什么样的程度呢?作为光学光刻技术的0.1 μm 难关,2006年片上芯片(SOC)的设计将达到这样一些指标:最小特征尺寸0.1 μm ,芯片集成度2亿个晶体管^[9]。如何在光源、材料、物理方法等方面取得突破,攻克这一难关并为0.07 μm 、0.05 μm 工艺开辟道路,是光刻技术和相应基础研究领域的公共课题。IBM开发出了一种基于大马士革工艺的新的芯片互连技术,使用铜互连代替传统的铝连线以连接芯片上的晶体管。由于铜导线可以比铝导线做得更细,从而使芯片上可集成的晶体管数量更多,这就使得芯片的集成度迅速增大,同时也使片子的计算能力得到大幅度提高。铜互连芯片已经成为CPU未来发展的一个方向,目前已经有包括Intel、AMD在内的多家芯片制造商投入到铜互连芯片的研究中。

4.2 摩尔定律的改进与网络发展

20世纪后期,借助IC、PC技术的进步,通信技术进入辉煌时期,通信网业务节点的重要设备电话交换机经历了从人工到自动、从模拟到数字的过程;80年代是时分程控交换机大发展的时期;目前的水平是大容量(达数十万甚至上百万门)、数字化用

户线接口(如可支持 V5 的数字用户线接入)、光纤中继线接口(如 155 Mb/s, 甚至 2.5 Gb/s 光纤中继线接口)、支持 ISDN 和多种补充服务功能及完善的计费维护功能等。

数据通信是随着计算机网络兴起而发展起来的,20 多年来也经历了好几代,从 modem 模拟接入电话网到专线方式的数字数据网(DDN),从电路交换到分组交换,从面向连接到无连接。基于 X.25 的分组交换可以说是分组网的第一代,但随着数据业务量的增加和光纤传输的使用,每个存储转发节点都进行流量控制和误码校正的做法,不但没必要而且效率低,因此省去流控和纠错功能,仅对帧进行中继的存储转发方式——帧中继(FR)便应运而生。目前,把 FR 和 DDN 用作企业租用专线,企业内部则广泛使用以太网。在以太网的应用中,两者之间成平方关系,这就是有名的 Metcalf 定律。这一定律推动了以太网的互连,以太网互连的需要又产生了 Internet。20 世纪 90 年代,Internet 的主机数以指数规律增长,约每年加倍,其业务量则约半年加倍,成为历史上发展最快的一种通信业务。这一业务量和网络发展规律被称为 Internet 定律。当然,随着主机数的基数增加,Internet 用户数增长的速度会变慢,但无论如何用不了 10 年,以 Internet 为代表的业务就会超过电话业务。在 21 世纪,连到 Internet 的主机数有可能超过全世界的人口数。

伴随着 Internet 而建设的 IP 网,不仅仅满足于传送数据,还将用于传送电话。电

话网传送数据的时代即将过去,人们将要面对一个争夺电话业务的数据网时代。当然,为了传送电话类实时业务,现有的 Internet 从扩展性、业务质量和安全性方面都还欠缺,因此就有了下一代 Internet(NGI)的计划。对 Internet 已提出了扩展地址空间(从 IPv4 到 IPv6)、增加安全机制、引入优先权等级及以 diffserv 部分解决服务质量(QoS)问题等的努力方向,各种支持 IP 的传送技术(如 IP over ATM、IP over SDH、IP over WDM)也是当前的研究热点。Internet 提供了一个创新的环境,关于 IP,有层出不穷的创新话题和有待开发的、种类繁多的应用。

4.3 摩尔定律与微电子设备

信息技术的核心是以极高的速度和精度,处理大量数据的微电子电路芯片。自 1970 年以来,微电子技术一直以指数规律发展,符合“摩尔定律”的要求。存储芯片和处理器的功能,或者芯片上的晶体管的数量(集成度)每 18 个月提高 1 倍。微电子学的这种革命性发展使得电子装置和武器平台的尺寸和成本大幅度下降,出现了实时计算、先进导航和电光装置、高精度武器。

以下几条技术途径可以延长“摩尔定律”的寿命。① 将微型芯片转变成“微管”。硅微管是提高晶体管数量最简单的方法,同时还能缩短电子运行的距离,但缺点是产生大量的热,需要昂贵的冷却技术。② 用砷化钾制造的芯片代替硅芯片。用砷化钾制造的芯片,由于电子更容易在这种晶体结构中运行,所以速度比硅芯片快 10 倍,但最终将面临硅芯片同样的物理法则限

制。③ 发展新的制造芯片方法。未来将使用波长更短的 X 射线或电子束代替现在所使用的超紫激光,对芯片进行光刻,但这种技术现在还不成熟。其他方法包括将现在二维的芯片结构升级为三维结构;利用纳米技术设计和建造纳米级的导线、晶体管和其他电子线路、单电子装置。但是,即使将来有了这种技术,最终也会受到物理法则的限制。

参考文献(References)

- [1] MOORE G E. Cramming more components onto integrated circuits[J]. Electronics, 1965, 38(8):114-117.
- [2] 夏华,何雨.拯救摩尔定律[N].中国计算机报,2000-06-26.
- [3] 马群刚,杨建飞,李跃进,等.摩尔定律的思想潜力和极限[J].中国软科学,2002(9):70-76.
- [4] 孙定.硅以后大约是碳[OL]//计算机世界网,http://www.gdyanan.gov.cn/news/IT-NEWS/lk11102/i6k11102.htm,2001-11
- [5] THOMPSON SCOTT. MOS Scaling: Transistor Challenges for the 21st Century[J]. Inter Technology Journal, 1998(3):3-5.
- [6] 华中一.分子电子学的发展形势及其对策[OL]//http://www.snpc.org.cn/paper/zhongyi%20hua.doc.2000.
- [7] 邹贺铨.从摩尔定律展望新世纪电信技术的发展[J].电信快报,2001(1).
- [8] 苏平.影响军事变革的关键技术:信息技术[N].解放军报,2000-01-10.
- [9] 李志坚.ULSI 器件、电路和系统[M].北京:科学出版社,2000.

(责任编辑 黄永明)

· 图片科技新闻 ·

天文学家确定微类星体辐射机制

6月22日,英国《自然》杂志发表的一项研究表明,天文学家首次通过观测确定强磁场是微类星体能量的关键来源。

在宇宙中,存在一些光度非常高的天体,它们在相对很小的空间里能够发出和星系相当的辐射,这些天体就是“类星体”。据估计,自大爆炸以来,宇宙中有 1/4 的辐射来自于类星体。天文学家相信,类星体之所以能够发出惊人的能量,是因为类星体中存在黑洞,黑洞周围的物质在落入黑洞之前发出巨大的辐射。类星体中有一类叫做“微类星体”,它们所占的空间比类星体要小得

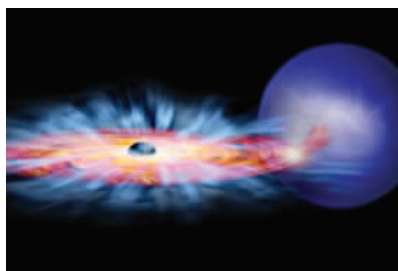
多,但也发出大量的辐射,GRO J1655-40 是一个典型。

美国密歇根大学的天文学家让·米勒(Jon M. Miller)及其同事通过使用钱德拉 X 射线望远镜对微类星体 GRO J1655-40 的观测,发现磁场在其能量机制中起到关键作用。GRO J1655-40 系统中包含一个质量为太阳 7 倍的黑洞和一个质量为太阳 2 倍的年老恒星,恒星物质不断地落入黑洞。物质落入黑洞的过程中会发出大量的辐射。研究发现,仅仅靠引力是不能解释 GRO J1655-40 系统中物质跌落的速率的,必定有某种机制使得物质丢失了角动量。米勒等人发现,黑洞磁场的变

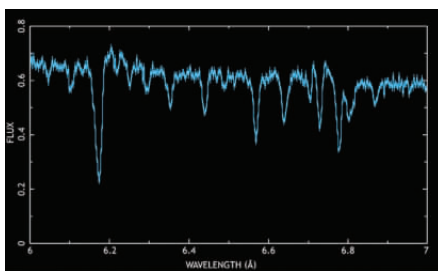
化使周围的气态物质产生摩擦并形成向外吹的风,将角动量向外移动,从而使气体落入黑洞。

实际上,这一解释在 1973 年就已经被科学家从理论上提出,时至今日才被观测首次证实。研究人员估计,除了黑洞周围的磁场外,正在形成中的恒星周围的磁场以及中子星周围的磁场都有可能对天体的演化起到重要作用。对黑洞周围磁场的深入研究也将促进科学家对黑洞其他方面的了解,比如黑洞是如何长大的。

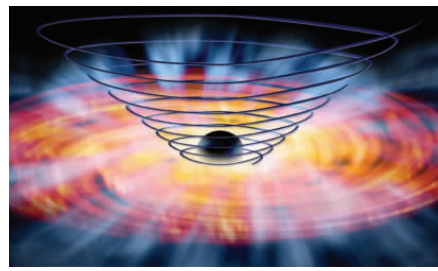
(本刊记者 黄永明)



黑洞和恒星构成的微类星体系统艺术表现图



钱德拉 X 射线天文台观测到的 GRO J1655-40 谱线



GRO J1655-40 磁场的艺术表现图