

纳米技术与光子学的联姻——纳米光子学

鲍 森

有科学家预言，“光子技术将引起一场超过电子技术的产业革命”，并“将给工业和社会带来比电子技术更为巨大的冲击”，光子学已成为改变世界技术力量的重要杠杆之一，在今后世界各国经济实力与国防实力的较量中将会起到重要作用。随着以光信息为代表的信息化社会的飞速发展，光子学的进步和纳米技术的广泛应用，诞生了一门新兴的热门学科——纳米光子学，该学科的发展以及技术的应用必将对人类生活产生巨大影响。

一、光子的概念及光子学的产生

1905年，爱因斯坦发表了《关于光的产生和转化的一个启发性的观点》的学术论文，有力的支持了普朗克的“能量子”假说。按照麦克斯韦理论，对于一切纯电磁现象因而也对于光来说，应当把能量看成是一个连续的空间函数，但这个理论会导致与实验相矛盾。如果用光的能量在空间不是连续分布的，而是由能量子组成的这种假说来解释，似乎更好理解。按照此假说，从点光源发出的光束能量，在传播中不是连续分布在越来越大的空间中，而是由个数有限的、局限在空间各点的能量子所组成，这些能量子能够运动但不可分割，而只能整个地被吸收或发射出来。爱因斯坦在这里明确提出的“能量子”又被称为“光量子”，后来人们简称为“光子（photon）”。

汤姆孙 1897 年发现的电子和 1905 年爱因斯坦提出的光子，作为信息和能量的载体，受到科学界的高度重视，但限于科学技术水平和人类认知等方面原因的限制，使人们对光子的认识不足，导致光子学的理论和应用技术发展缓慢，而电子学的理论及其应用技术却得到了长足发展。

1917 年，爱因斯坦又提出原子系统中光子的发射不仅有自发辐射，还有受激辐射，而受激辐射则是激光的理论基础。直到 1960 年第一台红宝石激光器的诞生，才使光子概念得到足够的重视。激光作为一种新颖的、高相干度光源，为古老的光学增添了革命性动力，使光学派生出许多新的分支学科，如：非线性光学、信息光学、集成光学、光化学等等，而光学技术的应用在科学研究、精密测量、信

息传输甚至日常生活等方面，都得到迅速发展。

光学的发展使人们更加重视光子，并对光的本性有了更加全面的认识。1970 年，荷兰学者波德沃尔特在美国的一次国际高速摄影会议上提出了“光子学（photonics）”概念，并定义为是以光子为信息主要载体的一门系统学科。光子学概念提出后，在世界各国科学家中引起了一系列连锁反应，他们完善了光子学研究的内容和范畴，许多学术团体、刊物和学术会议纷纷更名，例如，1992 年在意大利举行的国际非线性光学会议正式更名为国际非线性光子学会议，美国光学学会的会刊《光学通讯》改名为《光学与光子学通讯》，另一个杂志《光谱》改名为《光子学集锦》等等。就连美国的光学学会也受到多方压力，试图更名为光子学会。在我国，1992 年，出现《光子学报》（由《高速摄影与光子学》杂志改名），1993 年，原名《应用激光联刊》改名为《光电子·激光》杂志，1994 年在上海召开了《全国光子学专题研讨会》。1995 年，原来的《国外激光》杂志也改名为《激光与光电子学进展》。一些专家认为“光子学是电子学、光电子学发展的高级形式，是科学发展的必然飞跃”。

二、纳米光子学的产生

随着人类社会进入 21 世纪，人类对信息的需求越来越多，对信息的传输、处理和存储提出了越来越高的要求。随着光通信、光计算等大容量高速信息处理的发展，信息传输中需求的通道数也越来越多（通道数从目前的 8×8 到未来的 $10^3 \times 10^3$ ），存储密度越来越大（从 Gbit/in^2 到 Tbit/in^2 ，是目前 DVD 存储密度的 100 倍），处理速度越来越快（从 Gbit/s 到 Tbit/s ）。因此，要求单元器件的尺寸越来越小，最终突破衍射极限的尺寸，器件的空间距离也越来越小（小于 100nm）。为了实现上述目标，日本学者 Ohtsu（大津元一）提出了一种全新的技术——纳米光子学（nano-photonics）。纳米光子学指的是利用光学近场作为信号载体，纳米粒子作为器件材料的基本单元进行制造和运作系统的技术，是对近场光学（near-field-optics）应用方面的一种发展。理论分析显示，现在的微机电光学系统（MEMS）的开关

时间为 μs 量级,所需的驱动能量为 $10^{-17}\sim 10^{-18}\text{J}$,而同样的开关系统如果用纳米光子技术实现,其开关时间可以短至 100ps ,所需的能量可以小到一个光子的能量。

纳米光子学是 21 世纪的两大主要技术——纳米技术和光子技术的结合,主要优点是能在局域电磁相互作用的基础上实现许多全新的功能。在纳米光子学中,传统的干涉、衍射的概念不再适用,取而代之的是一些全新的概念。在近场条件下,单元器件的大小为几十纳米量级,相应能量传输所需的时间是几十皮秒,这些参数指标对比于目前的电子集成技术来说无疑是个飞跃。自 1999 年以来,基于表面等离子体激元、近场光学的纳米光子器件集成技术得到了飞速的发展。日、美、法、德等发达国家先后投入了巨大的人力、财力来研究该前沿课题,以实现 21 世纪信息时代的“3T 目标”(传输速度达到 1Tbit/s ; 计算速度达到 1Tbit/s ; 存储密度达到 1Tbit/in^2)。

三、几种典型的纳米光子学材料与纳米光子器件

纳米颗粒 又称纳米尘埃或纳米尘末,指纳米(10^{-9} 米)量级的微观颗粒。它被定义为至少在一个维度上小于 200 纳米的颗粒。小于 10 纳米的半导体纳米颗粒,由于其电子能级量子化,又被称为量子点。图 1 是 4 幅纳米颗粒的扫描电镜图。

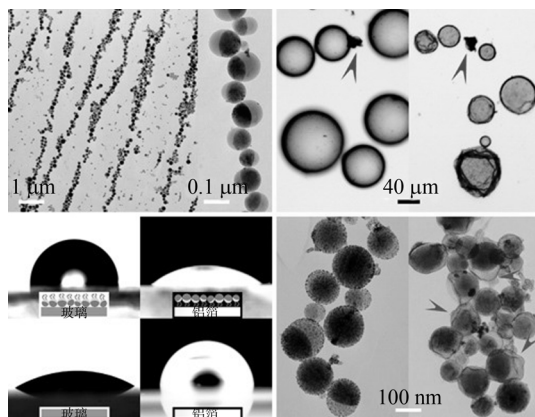


图 1 纳米颗粒的扫描电镜图

纳米颗粒具有重要的科学研究价值,它搭起了大块物质和原子、分子之间的桥梁。大块物质的物理性质通常与大小无关,但是在纳米尺寸上却通常并非如此。一些和尺寸相关的物理性质被观测到,例如:半导体纳米颗粒的量子束缚,一些金属纳米颗粒的表面等离子共振,磁性材料的超顺磁性等。

近年来,金属纳米颗粒的制备研究引起了人们的广泛兴趣,与相应的块体材料相比,金属纳米颗粒具有独特的化学和物理性质,可应用于电学、催化、磁性材料、光催化、生物染色剂、药物输送等许多领域。

纳米管 纳米管(图 2)比人的头发丝还要细 1 万倍,而它的硬度要比钢材坚硬 100 倍。它可以耐受 6500°F (3593°C) 的高温,并且具有卓越的导热性能。纳米管既可以用作金属导体,比金的电导率高得多,也可以用作制造电脑芯片所必需的半导体。纳米管在极低的温度下还具有超导性。

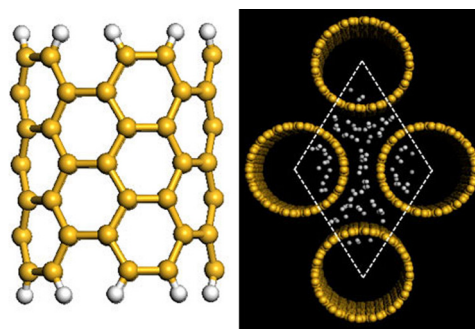


图 2 纳米管

在纳米管应用于电脑运算的发展进程中,一个重要的里程碑就是把纳米管制造成电脑中所用的开关或晶体管。1998 年,IBM 公司所属威特森研究中心的一个研究小组即以此为目标进行了研究。研究人员证明单个的纳米管可以具有晶体管的作用,而且提高了其晶体的导电性能。

纳米棒 纳米棒由于其结构不对称,会出现两个吸收峰:横向吸收和纵向吸收。纵向吸收对颗粒的形状、尺寸以及环境因素等的响应相当灵敏,可用于传感分析并受到越来越多的重视。

美国普度大学最近发展了一种新型超灵敏的医学成像技术。它借助于一束近红外波长的激光照射皮肤,来检测注射到血液中使之发亮的微小金纳米棒,如图 3。在利用老鼠所做的实验中,纳米棒所产生的影像大约比通常的荧光染料(包括广泛用于研究细胞和分子中生物成像所使用的罗丹宁)要亮 60 倍以上。从而使纳米棒有可能发展成一种先进的医学成像工具,用于癌症的早期检测。

另外适当调制纳米棒的形状能够制备一种具有光谱选择性的涂料。这种涂料的设计可以透过较多可见光而较少透过红外线,从而能够作为窗玻璃的

阳光控制膜；也可以根据棒的各向异性光学性质，制造一种有角度选择性的窗户涂料。

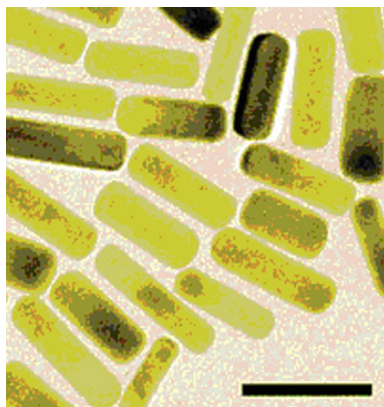


图 3

纳米线 纳米线是一种纳米尺度的线。换一种说法，纳米线可以被定义为一种具有在横向上被限制在 100 纳米以下（纵向没有限制）的一维结构。这种尺度上，量子力学效应很重要，因此也被称作“量子线”。图 4 是由氧化锌纳米线构成的向日葵结构。



图 4 氧化锌纳米线构成的向日葵结构

典型的纳米线的纵横比在 1000 以上，因此它们通常被称为一维材料。纳米线具有许多在大块或三维物体中没有发现的有趣的性质。这是因为电子在纳米线中在横向受到量子束缚，能级不连续。这种量子束缚的特性在一些纳米线中（比如碳纳米管）表现为非连续的电阻值。这种分立值是由纳米尺度下量子效应对通过纳米线电子数的限制引起的，这些孤立值通常被称为电阻的量子化。在电子、光电子和纳电子机械器械中，纳米线有可能起到很重要的作用。它同时还可以作为合成物中的添加物、量子器械中的连线、场发射器和生物分子纳米感应器。

纳米团簇 从很多性质上来讲，纳米团簇是一种人造“原子”。如果纳米团簇能够像晶体中具有内

在特定原子序数的原子一样，具有自己特定的大小并自发地排列成周期排列的有序结构，这就构成了一种自然界不存在的新的凝聚态物质形式（如图 5 所示）。中科院物理所表面物理国家重点实验室巧妙地利用周期纳米模板上的幻数原子成簇现象，制备出了几乎完美的这类二维人造晶格。

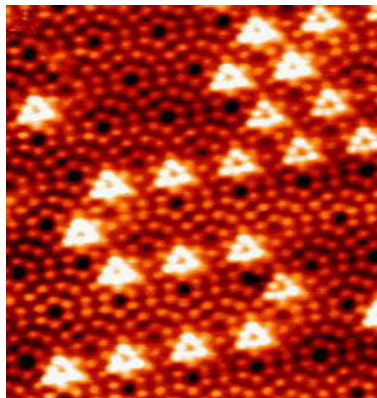


图 5 新的凝聚态物质形式

目前计算机芯片材料所采用的最小尺度单元为 0.1 微米，即 100 纳米，若希望缩小使用尺度，使计算机变得更小，就应该增加其容量，采用高密度的材料。在技术上，有两条传统路径。一条是自上而下的光刻，由于受到波长的限制，若想再小下去，只有寻找更短波长的光源，如 X 光，但 X 光穿透性很强，在一般的物质上难以发挥光刻的作用，可谓已走到尽头。另一条路是由小到大，即用分子或原子组装功能纳米材料，因为在纳米尺度上，几个原子的多少或大小，将可改变物质的性质。纳米团簇这类新的物质形式在纳米电子学、超高密度信息储存、纳米催化、量子计算和信息处理等很多方面有着潜在的重要应用价值。

光纳米开关 光开关是新一代全光网络的关键器件，主要应用在光交换设备中，实现全光层次的路由选择、波长选择、光交叉连接、自愈保护等功能。在目前也是一个相当热门的研究领域。目前大多数的开关是通过电子来进行开关的动作，为了满足高存储密度以及高数据处理速率的要求，未来纳米级光子器件将需要使用光子来进行开关。IBM 的研究人员最近制作出目前世界上最小的纳米光开关（图 6），这种是以耦合共振光波导结构为基础的器件，可望实现光学芯片上的内部连接。这项研究使科学家朝着超紧密光子器件与全光学计算的方向

又迈出重要的一步。

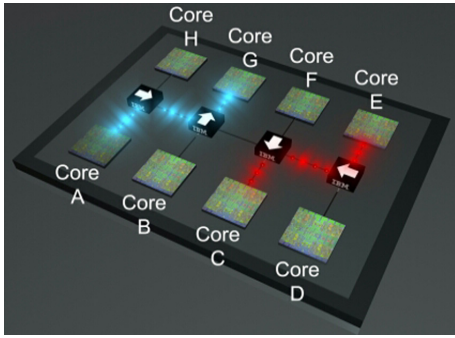


图 6 纳米光开关

另有报道，加州大学伯克利分校的研究者目前使用光来控制纳米级的生物分子和蛋白质。他们认为这能够帮助开发治疗眼疾的新方法，比如说致盲的最大原因是视网膜上光探测器的丢失。他们预想在视网膜的神经细胞上加入纳米光开关，能够恢复由于黄斑变性导致眼盲患者的感光度。但是这项技术离真正应用还有一段距离。

纳米透镜 光学显微镜的性能内在受限于阿贝衍射极限。不管一个成像系统在光学性能上怎样接近完美，它都无法分辨超过这一自然极限的两个物体，该极限取决于所观察到的光的波长及其角分布。几种方法曾被用来超越衍射极限，但 these 方法一般都需要深奥的激发方案，所以都还不实用。

最近，韩国 Lee 教授等人制备了一种新纳米球面透镜（图 7 所示），这些透镜由被称为“杯芳烃”的杯状有机分子由下向上自组装而成。以这种方式产生的透镜有非常短的焦距，可以产生超过衍射极限的近场放大效果，使其特征分辨率达到 200 纳米的数量级。这些透镜可被随意放在一个表面上，而且还可用来减小深紫外光刻特征的大小。

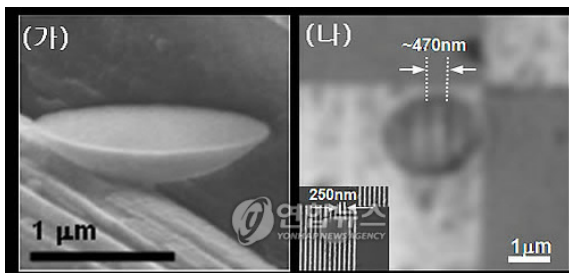


图 7 纳米球面透镜

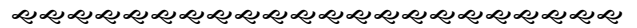
纳米光子器件最重要的特点是不再如传统光学器件中使用远场光传播，而是纳米局域的近场光。正是因此突破了传统远场光学的瑞利准则和光学分

辨率的衍射极限，实现了纳米光学分辨率。

纳米光子学是一门结合纳米技术与光子技术的新型交叉学科，不仅涉及到物理、化学，还同材料、生物等多学科紧密联系，在此基础上又派生出生物光子学、微波光子学等学科领域，致使其将会影响到我们的各个方面。纳米光子学的潜在市场机遇包括：进一步提高亮度发光二极管(LEDs)的光能量输出；降低太阳能电池的加工制造成本；发现能更好解决各种流体传感器所存在问题的方法和新型显示器技术的商品化等。

尽管目前纳米光子技术仍处于早期发展阶段，不过由于其具备更高的能效、热阻以及工作寿命等特性，使得纳米光子有望进入主流市场。根据最新一份名为“纳米光子——先进技术和全球市场预测（2009—2014）”的调查报告，预计到 2014 年全球纳米光子市场的规模将达到 36 亿美元，其中亚洲将占全球总体收入近 74% 的市场份额。而 LED 市场将是纳米光子市场中最大的细分市场，估计到 2014 年采用纳米光子技术制造的 LED 产值将达到 27 亿美元，年复合增长率将达到 91.3%。光放大器和全息照相存储器市场在未来 5 年也分别将出现 239% 和 234% 的增长。

（南京晓庄学院 210017）



科苑快讯

破解家蚕基因之谜

最近，位于深圳的北京基因组研究所传出消息，该所王俊和同事通过绘制中国各地桑园的 11 个野蚕和 29 个家蚕品系的基因图谱，对比发现家蚕竟有 83% 的基因变异。王俊说，家蚕独特的基因结构使其与野蚕差异巨大，这说明家蚕只经历了短期驯化。他们确定了与家蚕幼虫特征变化有关的 354 个基因，包括吐丝、生殖和代谢等调控基因。

通过家蚕基因的深入研究，可以了解家蚕的驯化是何时何地发生的。王俊说，家蚕基因图谱研究有助于提高家蚕饲养密度、蚕丝产量和生产特殊性能蚕丝，甚至让家蚕在实验室中生产特定蛋白质。

目前与他们合作的西南大学已在重庆合川建立产业转化基地，实现转基因蚕的规模育种，由当地农户养殖，生产彩色蚕丝。

（高凌云编译自 2009 年 8 月 27 日 www.sciencenews.org）