

编者按：英国华裔科学家高锟因其在“有关光在纤维中的传输以用于光学通信方面”取得的突破性成就，获得 2009 年诺贝尔物理学奖一半的奖金；美国科学家威拉德·博伊尔和乔治·史密斯因发明半导体成像器件——电荷耦合器件（CCD）图像传感器，分享 2009 年物理学奖的另一半奖金。本刊特请上海交通大学陈益新教授、中国科学院光电技术研究所朱耆祥副研究员分别撰写了光纤及 CCD 图像传感器方面的文章，以飨读者。

光纤：通往光信息时代的彩虹

——赞华裔科学家高锟荣获 2009 年诺贝尔物理学奖

陈益新

2009 年诺贝尔物理学奖的其中一半授予华裔科学家高锟。高锟的伟大贡献是为光纤技术的正确发展指明方向，光纤的诞生为构建现代信息高速公路奠定了基础，今天几乎所有的文本、图像、语音和视频信号都通过光纤网络传播到全世界各个角落。有了光纤，你足不出户不仅可以知道天下情况，而且几乎还可办理所有日常事务，光纤让世界和生活变得更美妙。本文首先简要回顾光纤问世的历史背景，而后介绍和评述高锟教授对光纤和光纤通信的杰出贡献以及由此给世界和生活带来的重大影响，对纤维光学的现状和未来发展也略作讨论。

导光起源

只有通过阳光我们才看到了世界，可以说人和光是与时俱来。然而，人们却经历了漫长的岁月才做到对光的控制，并最终将它通过波导来传播。

说到导光，自然会联系到导电。用金属导线让电流通过，是很容易的事。可是要使光沿着任意路径传播，那就不简单了。1889 年世界博览会在巴黎举办，庆祝法国大革命 100 周年。艾菲尔铁塔理所当然成为这次展览盛名的纪念碑。然而，出色的灯光表演竟成为另一幕令人难忘的少有场面，演出将多彩灯光引入喷泉的水流中，从而散发出五彩缤纷的耀眼光芒。这灵感来自于稍早时丹尼尔和廷德尔等物理学家的简单试验。

他们的“光管”实验如图 1 所示：当水从上面的容器喷出时，把一束阳光导入水流通道，可以观察到光线由于其全内反射现象而遵循某特定的路径，这就是光通过波导进行传播的首次研究。

从 20 世纪 30 年代，医学界就开始利用结构简单的光纤。凭借成束的细玻璃纤维，可以对患者的胃部进行成像和诊断，也可作为牙科手术的照明。然而，纤维的互相接触会造成光的外泄，也很容易

破损。将较低折射率的玻璃包层被覆在裸光纤外，可以明显地改善上述问题。到 20 世纪 60 年代，这样的光纤使纤维胃镜和其他医用仪器的工业生产成为可能。

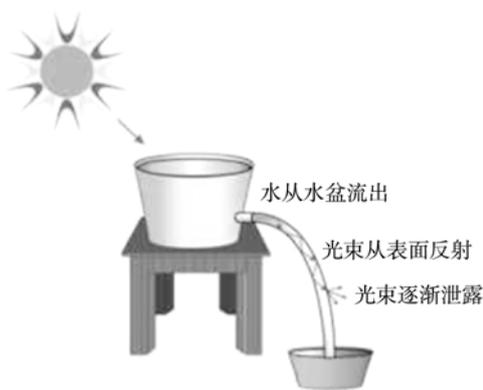


图 1 廷德尔“光沿水流传播”原理的实验

但是，这些玻璃纤维对长途通信来说是没有用的；此外，也很少有人对应用光来通信真正感兴趣，当时的电子和无线电技术足以对付通信需要。1956 年，第一条跨大西洋的电缆敷设成功，具有 36 个电话同时通话的能力。不久，卫星开始用来满足日益增长的通信需求。随着电话用户急剧增加，电视播送甚至要求更高的传输容量。相比于无线电波，红外线或可见光能够承载的信息容量将比它高出千万倍，此时，光通信的巨大潜力再也不被人们忽视。

激光器在 20 世纪 60 年代初的发明，是光通信发展决定性的一步。激光是一种光源，能发射高光强和高聚焦的稳定光束，并可以泵浦进入很细的光纤。第一个激光器发出的是红外光，并需要进行冷却。1970 年左右研制出能实用的半导体激光二极管，可在室温下连续工作。这是促进光通信实用化的重大技术突破。

所有的信息可以被转换和编码成高速的光脉

冲，以数码 0 和 1 来传输。然而，如何将这些信号传输更长的距离仍然是个问题。当时，进入玻璃纤维的光束经过仅 20 米的传播，光的强度就只剩下不到 1%，玻璃纤维的高损耗成为其在通信领域应用的不可逾越的障碍。

“光纤之父”

在当时，学术界普遍认为用玻璃导光信号衰减非常大，所以很多人都放弃了这方面的研究。可是高锟却不这样认为，降低玻璃纤维的光损耗就成为他富有远见的挑战，他把它称为“梦想计划”。

高锟 1933 年出生于上海，1948 年他与家人一起移居香港。他中学没有读完就前往英国留学，先后于 1957 年和 1965 年在伦敦大学分别获得电机工程学士和博士学位。1960 年，高锟进入国际电话电报公司 (ITT) 设于英国的欧洲中央研究机构——标准电信实验有限公司 (STL)。1964 年 12 月，他接手了 STL 的光通信研究项目后，决定改变其前任主管所进行的薄膜波导研究方向。高锟与他的年轻同事乔治·霍克哈姆 (George A. Hockham) 一起转向致力于单模光纤的研究。他们的目标是，光束进入玻璃纤维并经过 1 千米传播后，其强度必须至少有百分之一能保留下来。他在那里工作了 10 年，正是在这段时期，高锟对光纤从理论到实验的一系列创新研究成果，使他成为光纤通信领域的先驱，被全世界公认为“光纤之父”。他先后共发表论文一百多篇，获得专利三十余项。



图 2 高锟博士在实验室

在 1966 年 1 月，高锟发表了具有开创性的论断。他在一篇题为《光频介质纤维表面波导》(Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies) 的论文中指出，问题主要不在于纤维结构的不完善，光在光纤中的传输损耗主要来源于材料中的杂质，玻

璃必须加以提纯。他说明高纯度的石英光纤传输损耗可以下降到很低，并具体计算了光在这种光纤中的传输距离，完全可能达到 100 千米以上。

制造一种前所未有的透明玻璃，他认为这将是可实现的，虽然当时还不清楚具体应该怎样做。高锟的信心和热情激发了许多研究人员来分享他对纤维光学未来巨大潜力的理念，并最终促使超低损耗光纤的问世和从此引发了一场通信技术的革命。

沙子变宝

玻璃是石英即二氧化硅 (SiO_2) 制成的，二氧化硅是沙子的主要成分，地球上拥有最丰富的资源。普通的日用玻璃为了容易在比较低的温度下进行加工，往往在其生产过程中加入如苏打和石灰石等不同的添加剂。然而，为了生产出世界上最纯净的玻璃纤维，高锟指出可以使用不加任何添加剂的熔融石英，即俗称石英玻璃。熔融石英区别于石英晶体是有相同的 SiO_2 的四面体结构单元，在硅 (Si) 原子周围有氧 (O) 原子四面包围的短程 (局部) 有序，如图 3 所示，但没有长程有序的晶体结构。石英玻璃的熔融温度近 2000°C ，在这样的高温下加工成纤维并保持材料的高纯度和精确均匀的纤维直径，其制造工艺在当时几乎是不可能的。

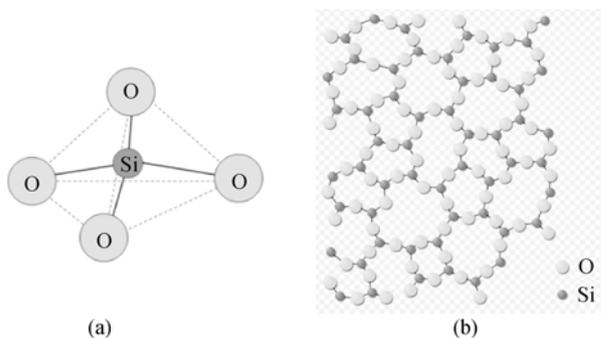


图 3 石英 (SiO_2) 的四面体结构单元 (a) 和石英玻璃的非晶结构 (b)

四年后，1971 年，美国康宁玻璃工厂，一个拥有 100 多年经验的玻璃制造商的科学家和工程师们，率先使用化学工艺制成了 1 千米长的熔融石英光纤。不久，又有几家实验室和公司相继采用不同工艺研制出低损耗石英光纤。

玻璃做成的超细纤维看起来很脆弱。但是，当玻璃正确地拉制成一个很长的细丝时，其属性发生变化。它具有强度高，重量轻，柔软等优良性能，这是光纤能经受被埋地，在水下或沿角转弯的一个

先决条件。与铜电缆不同，玻璃纤维对闪电不敏感，也不像无线电通讯，它不受恶劣天气的影响。

光纤奥秘

光纤是圆柱形的介质光波导，光纤的结构包括中心的纤芯部分和外面的包层部分，纤芯和包层具有不同的折射率。为了把光信号限制于纤芯，包层的折射率必须小于纤芯的折射率。当光线从折射率较高的介质入射到折射率较低的介质界面时，假若这入射角（光线与边界面的法线之间的夹角）的角度大于某临界角的角度，则这光线会被完全地反射回去，这称为全反射（图 4）。光纤就是通过纤芯-包层界面的内全反射效应，使光线在界面处反射过来又反射过去，从而限制了光线的传播路径。由于光线入射于边界的角度必须大于临界角，这是产生内全反射的必要条件。只有在某立体角范围内射入光纤的光线，才能满足此条件通过整个光纤，而不致泄漏损失掉。这角度范围就是光纤耦合的接受角，如图 4 所表示，这角度由纤芯和包层折射率的差值来决定，在接受角范围内的光都能耦合进光纤。

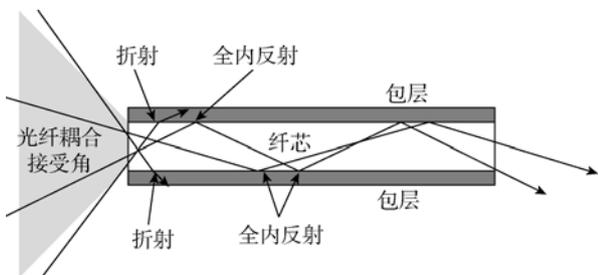


图 4 光纤耦合接受角及全内反射示意图

光通信应用的光纤种类按其传播的模式主要可分为多模光纤和单模光纤，单模光纤中只有一种模式的光允许传播，而多模光纤中将出现许多模式同时传播。按光纤折射率分布的不同，有渐变折射率光纤和突变（阶跃）折射率光纤的区分，前者的折射率分布从中心到包层，是逐渐地减小的；而后者在纤芯-包层边界区的折射率是突变的。图 5 表示多模光纤和单模光纤的基本结构和尺寸、渐变和阶跃折射率分布，以及传播模式和输入输出信号波形的示意。

通信光纤的色散，也是一个重要参数，它反映了光纤中不同波长的光传播速度的差别。光纤的色散大，输出光脉冲造成较大展宽，使传输速率和传输距离受到限制。从图 5 可以看出，单模光纤由于

色散小，输出光脉冲的不易展宽，能应用于高速和长距离传输的场合。

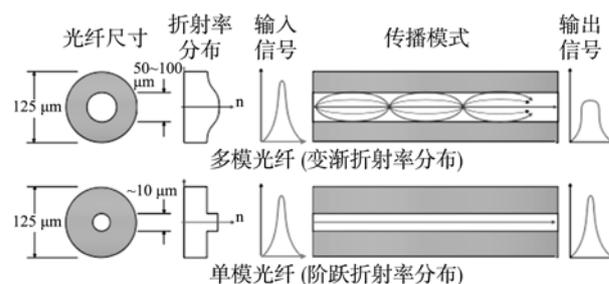


图 5 表示多模光纤和单模光纤的基本结构尺寸及传播模式

现代光纤的制造过程一般分两步，第一步是制成预制棒，即直径为数十毫米或更大的玻璃圆柱体。预制棒有内外二层，内层是具有较高折射率的芯棒，它构成光纤的纤芯，预制棒的外层构成光纤的包层。有多种制造工艺可选用，例如改进的化学气相沉积法（MCVD）、等离子体化学气相沉积法（PCVD）、棒外气相沉积法（OVD）和轴向气相沉积法（VAD）等等。第二步是在光纤拉丝机上把预制棒一端熔融后高速抽拉成光纤。

今天，石英单模光纤的传输损耗已降低到每千米 0.2 分贝，即光信号在光纤中经过一公里的传输后，仍然能保留 95% 以上的光功率，这已大大超过高锟当时提出传输一公里能保留 1%，被认为极富野心的指标。

光纤彩虹

由于互联网的出现，通信网络的传输容量爆炸式增长。除了电话通信外，计算机系统的数据传输流量已大大超过语音业务。另外，高清电视、网上游戏和多媒体等视频信息的容量尤为巨大，原有的通信网络已远远不能满足实际需要。

为提高光网络的带宽和容量，一系列新技术不断涌现并迅速应用。不仅是光纤本身的结构设计、制造工艺和测量方法有了许多发展和创新，在光器件开发和光网络自动化和智能化方面都取得了飞跃的进步。光纤放大器（EDFA）的采用可以克服原来在传输过程中，电子信号和光信号不断变换所带来的弊端；高速光模块的应用使光纤的传输速率从每秒数十兆比特（Mbit）增加到千兆比特（Gbit），再到如今的百千兆比特；波分复用（DWDM）技术的发明，可以将许多不同波长（即不同颜色）的光束同时在一条光纤中传播，大大提高了光纤的利用率

和传输容量，被美誉为“光纤中的彩虹”，现有的技术水平已能在光纤中传送一百多个波长，理论上还可以继续增加。

光纤的诞生引发许许多多关联技术和器件，在全世界的大学和实验室像雨后春笋般的冒出来，在百花争艳的光电子花园中又增添了多少娇美奇葩，这需要园丁们付出多少辛劳和贡献，多少智慧。记得有一次在光纤通信的国际学术会议上，来自世界各方的科学家们围着“光纤之父”高锟和他打趣说，“要不是你那个光纤，我们那会有这么多的麻烦事，忙得连头发都早白了！”

在强烈的社会需求驱动下，从上世纪末到新世纪以来，几乎所有的通信网包括海底的、陆地的骨干网和城域网等都已实现光纤化。近年来，所谓“最后一公里”的接入网，其光纤化的进程，即“光进铜退”和“光纤到户”(FTTH)，也正在加速实施，成为光网络建设又一新高潮。

由于历史和商业运作的原因，长期以来形成电信网、广播电视网和计算机通信网三网共存的局面。通到每家的有电话线、计算机联网的宽带线和有线电视的同轴电缆，不仅资源浪费，而且传输带宽和信息容量有限制。实现光纤到户，并将现有的三个网整合成为统一的信息通信网络，每个家庭建成一个完整功能的数字宽带网，就能充分享受光信息技术带来的福祉。

如今，传递电话、视频和数据通信巨大流量的石英光纤网络，总长度已超过 10 亿千米。如果这么多数量的光纤用来围绕地球，将可以环绕它超过二万五千圈(图 6)，而且光纤的数量每小时都在继续增加。

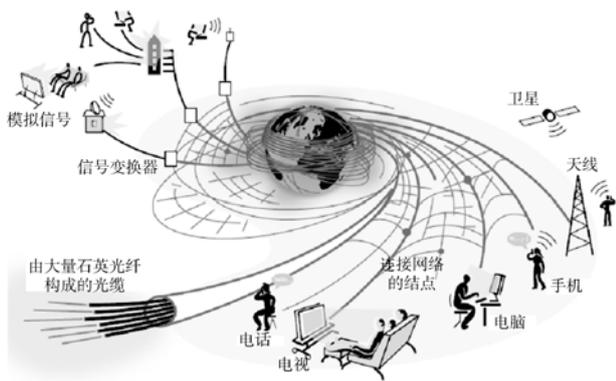


图 6 石英光纤构成了我们信息社会的循环系统。敷设的光纤足够围绕地球超过 2 万 5 千圈

展望未来

应该看到，光纤已远远不仅是一种孤立的产品，经过半个世纪来理论探索和技术开发，在近代光学中已形成一个重要分支学科——纤维光学(fiber optics)，不但建立了完整的理论体系，并在技术和应用方面有许多重大的创新和发展。

除了用于通信网络光信号传输外，光纤还可以做成许多光器件，例如光纤耦合器、光纤光栅、光纤激光器、光纤放大器、光纤传感器和光纤陀螺等。近年来光纤和光纤器件的非通信应用发展迅速，在生物医学、测量仪器、铁路交通、工业加工、环境保护和航空航天等领域有广泛应用。

不同的应用要求引发了许多特种光纤的诞生，包括新的光纤材料、新的结构设计以及新的功能要求。诸如：便于制造和使用的塑料光纤；软玻璃材料的高非线性光纤；用于有源光纤器件的稀土金属掺杂光纤；纤芯有特殊结构的偏振保持(保偏)光纤；适用于光纤激光器的双包层光纤等。

值得一提的一种新型光纤，光子晶体光纤又被称为微结构光纤，近年来特别引人注目。它的横截面上有较复杂的折射率分布，通常含有不同排列形式的气孔，如图 7 所示。这些气孔的尺度与光波波长大致在同一量级，光纤的纤芯区可以是气孔也可以是实心的。与传统光纤的折射率分布不同，光子晶体光纤截面上其折射率呈周期性变化，它主要是通过衍射效应而非全反射效应来保持光波在纤芯区传播。

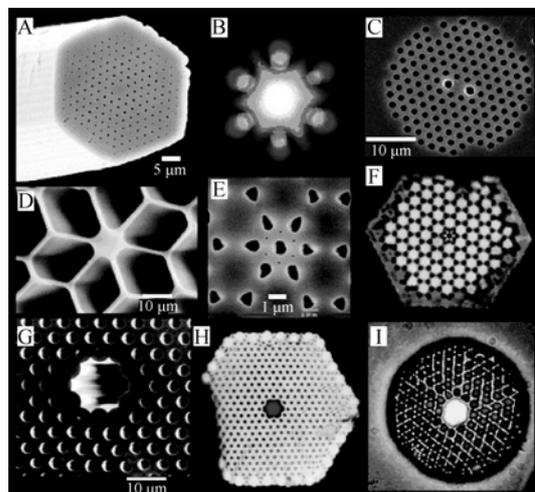


图 7 不同光子晶体光纤的截面构造(A,C~I)和传播模式(B)

光子晶体光纤有很多奇妙的特性。例如，光子

她用物理的情趣，引我们科苑揽胜；

她用知识的力量，助我们奋起攀登！

欢迎投稿，欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会，由中国科学院高能物理研究所主办，是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

为进一步提高《现代物理知识》刊物的学术水平，欢迎物理学界的各位专家、学者、教授以及研究生为本刊撰写更多优秀的科普文章。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn。投稿请将联系人姓名、详细地址、邮政编码，以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯等栏目，并于 2009 年增加了彩色中心插页。2010 年《现代物理知识》，每期定价 8 元，全年 6 期 48 元，欢迎新老读者订阅。

邮局订阅 邮发代号：2-824。

汇款到编辑部 地址：北京市玉泉路 19 号乙高能物理所《现代物理知识》编辑部；邮编：100049。

需要过去杂志的读者，请按下列价格汇款到编辑部。1992 年合订本，18 元；1993 年合订本，18 元；1994 年合订本，22 元；1994 年增刊，8 元；1994 年附加增刊合订本，36 元；1995 年合订本，22 元；1996 年合订本，26 元；1996 年增刊，15 元；1997 年合订本，30 元；2000 年附加增刊合订本，38 元；2000 年增刊，10 元；2001 年合订本，48 元；2002 年合订本，48 元；2003 年合订本，48 元；2004 年合订本，48 元；2006 年仅剩 4、5、6 期，每期 7 元；2007 年每期 8 元，2007 年合订本，50 元。2008 年每期 8 元，2008 年合订本 50 元。

以上所列，均含邮资或免邮资。

晶体光纤具有优良的弯曲性能，即曲率半径很小时其损耗不会明显增加；可以在很宽的带宽范围内保持单模特性，实现全波段传输；具有极低的衰减和色散，并且其色散特性可灵活调节；排列不对称的气孔也可以产生很大的双折射效应，这为设计高性能的保偏光纤和光偏振器件提供可能等等。

目前，光子晶体光纤已有部分产品供应市场。如非线性光子晶体光纤、大模场区域光子晶体光纤、空气波导光子带隙晶体光纤和双包层高数值孔径掺镱光子晶体光纤等。但是总的来说，光子晶体光纤刚起步不久，许多应用尚待开发，其未来前景尚难预估，影响深远。

20 世纪人们赞叹着科学家和工程师们把沙子变成单晶硅，再把硅片制成集成电路芯片，又从集成电路造出电子计算机和其他许许多多日用电子产品，几乎渗透到了世界和生活的所有角落的壮丽诗篇。如今，无独有偶，人们再次为科学家和工程师们把沙子变成光纤，又把光纤和光缆建造成信息高速公路，让世界和生活更美好而赞叹。由于有了现代光纤网络，在家不仅可以同时收看多部内容不同

的高清电视和即将出现的三维立体电视，还能足不出户实现网上购物、远程医疗、远程教育甚至在家办公等与过去完全不同的生活方式。

期盼

1997 年在我担任上海交通大学应用物理系系主任期间，收到诺贝尔物理学奖评审专家的邀请，要我提名 1998 年诺贝尔物理学奖获奖候选人。当时我推荐了高锟，我深信由于他对光纤的杰出贡献，获得此奖理所当然。不幸的是那年我的推荐未被采纳，我不明其中原由，也许那时光纤对信息时代的影响还没有今天那么明朗吧。

高锟一生共得到二十多项重大嘉奖，最后一次是 1999 年的美国国家工程院“查理·斯塔克·德雷珀奖”。对高锟来说，今年获得诺贝尔物理学奖虽然是迟来的荣誉，但是这再一次表明世界对他伟大贡献的公认。我们作为中国人，对高锟在光纤方面的成就和影响不仅赞叹和钦佩，同时也感到亲切和充满自豪，他给了我们炎黄子孙莫大的激励，并树立起中华儿女要为现代科学技术多作贡献的自信心和责任感。

（上海交通大学 200030）