

享受科学的恩惠: 光纤和电荷耦合器件 ——2009 年度诺贝尔物理学奖成果介绍

聂玉昕

中国科学院物理研究所, 北京 100190

摘要 介绍了 2009 年度诺贝尔物理学奖三位获奖者的简况和他们发明的光学纤维 (简称光纤) 与电荷耦合器件 (CCD) 图像传感器的结构和原理; 说明了光纤和 CCD 的主要应用领域及其在科学技术、国民经济和社会生活中所发挥的重要作用。百余年来, 诺贝尔物理学奖, 不仅使人类对周围的物质世界有了更加深刻的了解 (如量子理论、超导电性的发现和研究、宇宙微波背景辐射的发现和发现), 也使人类社会和日常生活发生了深刻的变化 (如 X 射线、无线电技术、晶体管、激光和集成电路等), 光纤和 CCD 都已融入社会和日常生活之中 (如光纤到户), 并将继续发挥它们的作用。

关键词 诺贝尔物理学奖; 光纤; 电荷耦合器件图像传感器

中图分类号 N26, TN818, TN256

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)24-0019-04

Optical Fiber and Charge Coupled Device: Brief Introduction of the 2009 Nobel Prize in Physics

NIE Yuxin

*Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing
100190, China*

Abstract The brief introduction of the three winners of the Nobel Prize in Physics in 2009 and their inventions (optical fiber and charge coupled device (CCD)) are given. The structures, working principles and applications of the optical fiber and CCD have been described. The Nobel Prize in Physics in the hundred years not only enhanced our understanding to the world and the universe (such as quantum theory, relativity and the model of universe), but also changed our daily life (such as X-ray, radio technology, discovery and research of the superconductivity, discovery and research of the cosmic microwave background radiation). Optical fiber and CCD have been joined our daily life and will play very important role.

Keywords Nobel Prize in Physics; optical fiber; charge coupled device

2009 年 10 月 6 日瑞典皇家科学院公布了诺贝尔物理学奖获奖人并介绍了获奖者对物理学所做出的贡献。美国科学

家 Willard S. Boyle、George E. Smith 与华裔科学家高锟一同获得 2009 年度诺贝尔物理学奖。高锟因在“有关光在纤维中的传输以用于光学通信方面”的贡献获得诺贝尔物理学奖奖金的一半, 另一半由 Willard S. Boyle 和 George E. Smith 分享, 他们的成就是发明了一种新型的半导体器件——电荷耦合器件图像传感器 (Charge Coupled Device, CCD)。今年的诺贝尔物理学奖成果: 光纤和图像传感器, 应该是人们最能直接感受科学恩惠的两项成果。

素有“光纤之父”之称的高锟, 1933 年生于上海, 后来在香港和英国读书, 1965 年在英国伦敦大学下属的伦敦帝国学院获得电机工程博士学位。1957 年, 高锟进入国际电话电报公司 (ITT), 在其英国子公司——标准电话与电缆有限公司 (Standard Telephones and Cables Ltd.) 任工程师。1960 年, 他进入 ITT 设于英国的欧洲中央研究机构——标准电信实验有限公司, 在那里工作了 10 年。正是在这段时期高锟在光纤通信领域成果斐然, 在光纤应用的基本原理、光纤结构、材料特点等方面完成了一些开创性工作。1970-1987 年, 高锟先后在香港中文大学和 ITT 标准电信实验室等机构工作, 除教学外, 主要进行光通信产业化研究。1987-1996 年期间, 高锟担任香港中文大学校长, 对香港中文大学和香港地区科技发展做出了重要贡献。1996 年, 当选为中国科学院院士。

1957 年起, 高锟开始从事光导纤维在通信领域应用的研究。1964 年, 高锟提出在电话网络中以光代替电流, 以玻璃纤维代替导线, 1966 年发表一篇题为“光频率介质纤维表面波导”的论文, 开创性地提出了光导纤维在通信上应用的基本原理, 描述了长程及高信息量光通信所需绝缘性纤维的结构和材料特性。简单地说, 只要解决好玻璃纯度和成分等问题,

收稿日期: 2009-11-11

作者简介: 聂玉昕 (中国科协所属全国学会个人会员登记号: S090900147M, S040070053S), 研究员, 研究方向为光物理和光谱学, 电子信箱:

nieyx@aphy.iphy.ac.cn

就能够利用玻璃制作光学纤维,从而高效传输信息。用于远程和高信息量光通信传输所需光纤分为两类:一类是反射型光纤,另一类是折射型光纤。反射型光纤的结构(图1)是由两种不同折射率的透明介质组成的细长纤维,中间的称为芯线,外面包住芯线的称为包层^[1]。芯线介质的折射率 n_1 大于包层介质的折射率 n_2 。光在芯线里传输,当光由芯线射到与包层的交界面时,如果光的入射角大于临界角,会发生全反射,光返回到芯线里,光就被限制在芯线里沿折线路径向前传输。因此,光纤制作对材料的纯度有非常高的要求,使光在光纤里传输很长的路程而不发生显著衰减(越洋海底光缆可经中继放大加强光信号)。

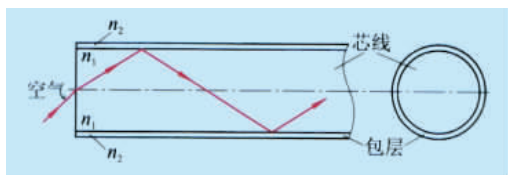


图1 反射型光纤结构示意图

Fig. 1 Structure of the reflection type optical fiber

折射型光纤也称变折射率光纤或梯度折射率光纤,其透明介质的折射率在轴线上最大,离轴线越远越小(图2)。按照折射定律,光从折射率较大的介质进入折射率较小的介质时,光会偏离交界面的法线^[1];光从折射率较小的介质进入折射率较大的介质时,光会靠近交界面的法线。当光进入折射型光纤后,所走的路径是周期性曲线(图3)^[1]。光离开轴线的最大距离相当于反射型光纤里的芯线半径,好像光在该处被反射回来一样。

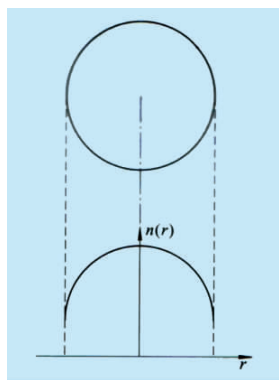


图2 折射型光纤的折射率

Fig. 2 Index profile of the refraction type optical fiber

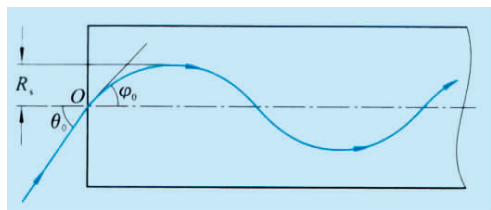


图3 折射型光纤中光线的路径示意图

Fig. 3 Ray path in the refraction type optical fiber

与传输电信号的电缆相比,光缆具有许多重要的优点,首先是它的传输的信息量大、效率高。光的频率比高频电信号高许多数量级,其载波频带也比高频宽许多数量级,一根光纤可以承载上万路的电话,光纤一般很细(μm 量级),一根光缆可以容纳大量光纤,所以信息容量大得多,常被称为信息高速公路。其次,光纤很细,由玻璃(SiO_2)制成,重量小、成本低;而高频电缆由金属铜制造,芯线和外层间要加绝缘层,比光纤要粗得多,重得多,成本也高得多。由于光在光纤中传输时损耗极小,光可传输很长距离;第三,电信号在电缆中传输时损耗要大一些,长距离传输时需要中继(在一定距离处将信号放大后再传输),不仅增加了线路的成本,也容易产生故障;第四,光纤由玻璃制成,可抗腐蚀;玻璃是绝缘材料,两根光纤接触,不会造成“串音”。电缆则不同,外皮受损时铜容易被腐蚀,也可能造成“串音”。光在光缆中传输时,不会向外泄漏,外面的光也不会进入光缆,因而其保密性和抗干扰性也要比电缆好。

光纤的主要应用领域是光通信,包括电话、电视节目、各类数据和图像传输、互联网等,光纤组成的光缆已经成为全球通信网络的基础。当今世界信息化的发展对光通信的需求在不断增加,光纤产业也在不断增长。如果把许多根光纤平行排列组成光纤束,每根光纤在光纤束端面上的位置相对应,这样的光纤束称为相关传光束。传光时每根光纤单独传递图像的一个信息元,合起来就把图像从光纤束的一端传到另一端。这种传像束在医学和工业上有许多重要的应用,如医院里使用的各种内窥镜,就是以光纤传像束传输人体内各部位的图像,供医生诊断和操作,许多微创手术都是利用这种传像束协助进行的。由于光纤具有诸多特性,它作为新型传感器得到了广泛的应用,称之为光纤传感器。其中一类是利用光纤自身作为敏感元件的传感器,待测物理量对光纤内传输的光进行调制,使光的强度、相位、频率或偏振特性发生变化,通过对调制信号的解调,得出待测物理量的数值(如光纤陀螺),这类传感器可以达到很高的灵敏度。还有一类是利用光纤传光的传感器,以其他敏感元件感受待测物理量的变化,光纤作为信息传输介质,起导光作用,可实现探针式测量。利用光纤传感器可以测量许多物理量,如温度、压力、声场、电场、速度和加速度等,光纤传感器已经成为传感器家族里不可或缺的重要成员。在光纤的玻璃中掺入一些稀土离子,光纤就可以成为激光的工作物质,可制成光纤激光器和光纤放大器。光纤激光器光纤的玻璃中掺入不同的离子,光纤激光器可以输出不同波长的激光,离子在玻璃中的荧光光谱比较宽,光纤激光器可在一定波长范围内调谐。光纤激光器还可以在不同的运行方式下工作:连续,脉冲和超短脉冲,也可以达到高功率运转^[2]。由于光纤的诸多优点,使光纤激光器也具有许多优势。如它的结构比较简单、成本低、易于维护,光纤细,容易冷却(风冷),适用于复杂和较差的工作环境。同时,光纤激光器以半导体激光器为激励源,激光器的体积小、损耗小、阈值低、效率高。除去光通信领域以外,过去许

多属于其他类激光器应用的领域,现在也可以使用光纤激光器,光纤激光器是激光器家族里比较年轻的成员,对其研发和市场都在扩展中。

2009年5月建立的中国国家大科学工程项目——“大天区面积光纤光谱天文望远镜”(LAMOST)就是光纤在天文望远镜里的应用实例。LAMOST座落在河北省兴隆县国家天文台(图4)^[3],望远镜的球面主镜尺寸为6.05 m×6.67 m,由37块子镜拼接成;非球面改正镜尺寸为5.72 m×4.40 m,由24块子镜拼接成,同时使用了薄镜面主动光学和拼接镜面技术(每块子镜为正六边形,对角线长1.3 m)。望远镜焦距20 m,可把一个天区的许多天体精确成像在直径1.75 m的焦面上。该焦面上均匀分布着4 000根光纤,光纤芯径为0.32 mm,按25.6 mm等间距排列。每根光纤由两个步进电机驱动,自动定位在一个天体像的位置上。这相当于望远镜同时可以观测4 000个天体,由4 000根光纤把它们接收到天体的光送到光谱仪(250根光纤接一台光谱仪,望远镜系统有16台光栅光谱仪),光谱仪把每个天体分光后的光谱记录到CCD上,由天文学家去分析和研究(图5)。该望远镜90 min可以观测到20.5等星的光谱(属暗弱天体),如果每年有270个晴夜可供观测(兴隆当地的统计),望远镜每年可以获得200万~300万个天体的光谱,这些光谱数据对于星系和宇宙大尺度结构的研究是很必要的。



图4 座落在河北兴隆的LAMOST外景
(源自国家天文台网站)

Fig. 4 Picture of the LAMOST in the National Astronomical Observatories

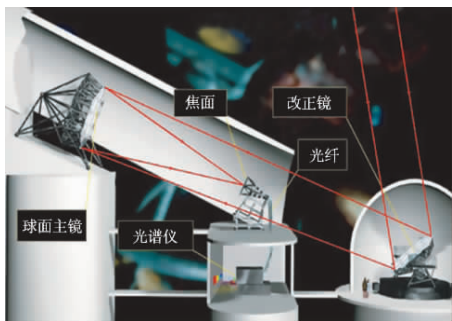


图5 LAMOST结构示意图(源自国家天文台网站)

Fig. 5 Structure of the LAMOST

LAMOST不仅体现了光纤的应用,还涉及诺贝尔物理学奖的另一半——新型的半导体器件电荷耦合器件图像传感器CCD的应用。CCD的发明者之一的Willard S. Boyle,1924年生于加拿大,他高中毕业后加入加拿大海军,曾参加过第二次世界大战。战后在蒙特利尔的麦吉尔大学大学学习,1950年获得理学博士学位,1953年加入美国贝尔实验室并在那里长期工作。另一位发明者George E. Smith,1930年出生在美国,在宾夕法尼亚大学取得学士学位,在芝加哥大学获博士学位,1959年进入贝尔实验室,也在那里工作了很长时间。1969年,Willard S. Boyle和George E. Smith在贝尔实验室里共同发明了CCD图像传感器。

CCD是一种利用半导体特性,将接收到的光信号变为电信号的半导体功能器件,一般采用金属氧化物半导体结构,利用栅电极下半导体表面附近的势垒中的电荷来存储和传输信息。一个CCD图像传感器包含许多像元(pixel),每个像元的尺寸很小(10 μm左右),有线阵CCD和面阵CCD,众多像元规则排列起来就组成了CCD图像传感器(图6)。



图6 CCD图像传感器外形图

Fig. 6 Picture of a CCD image sensor

CCD作为图像传感器有几个优点,它可以接收的光的波段比较宽,从200 nm的紫外光到1 100 nm的红外光,覆盖了全部可见光谱区,并且灵敏度高,动态范围宽,在弱光条件下仍可正常记录图像(在天文望远镜里,由于大部分天体距离太远,能收集到的光非常弱,更需要灵敏的接收器),响应速度快(信息的存取速度快),可以记录和传输瞬态图像和随时间快速变化图像;增强型CCD(ICCD)有更快的响应速度,可以处理持续时间更短的瞬态图像。CCD拥有大量的像元(4 096×4 096面阵),因此可以作为大容量存储器;CCD空间分辨率高,可满足摄像机、照相机、扫描仪、天文望远镜和光谱仪等设备对图像传感器的要求。CCD的缺点是信噪比不够高,当CCD用于科研领域时,不仅要求每个像元的特性比较一致,常常还要将CCD致冷,以减小噪声的影响,一般用于科学研究的CCD的价格比较昂贵。

CCD图像传感器已经得到了广泛的应用,CCD主要应用于图像信息的获取、存储和处理等几个方面。CCD离百姓最近的应用例子莫过于数码照相机了。20世纪80年代,照相机已经成为居民家庭里的“大件”之一,“傻瓜”相机得到了空前普及。由于当时的相机都使用胶卷,以致引起胶卷制作商美

国“柯达”、日本“富士”和中国“乐凯”的激烈竞争。数码相机由 CCD 图像传感器代替了传统相机里的感光底片,拍照得到的图像立即可在相机液晶显示屏上看到,不满意的可以删去。存储卡容量很大,易于更换,也可以很容易地将相机里的照片存到计算机硬盘里,在计算机显示屏上观看或用 Photoshop 软件对相片进行修饰、加工。数码相机使获取图像的效率大幅度提升,成本下降。进入 21 世纪以来,随着数码相机水平的提高和价格下降,它已经替代了传统相机成了市场的主导产品,除了少数专业摄影者外,几乎没有人愿意使用胶卷。尤其新闻摄影记者更愿意使用数码相机,这可显著加快他们的发稿速度。专业摄影者也在大量使用数码单反(单镜头反光),或者两种机型并用。目前数码相机 CCD 的像元数已经超过了 1 000 万(10 M),高分辨率计算机显示器的像元数不到 200 万(2 M),所以对大多数情形而言,数码相机里 CCD 的图像分辨率是够用的。与高分辨率的照相干板或感光胶片相比较,目前数码相机里 CCD 的图像分辨率还差一些,但这并不影响数码相机的使用和普及。CCD 尺寸较小,数码相机可以做成卡片机,便于携带,CCD 这一优势被应用于手机,现在许多手机都有数码拍照功能。CCD 的灵敏度高,动态范围宽,使数码相机可以在比较暗的环境中,不用闪光灯即可拍照,也可以对较高速运动的目标拍照(如在航天器里对地观测)。对于传统相机而言,这种场合都要使用高感光度的胶片,这类胶片的卤化银颗粒较大,分辨率较低,照片的质量也较差。随着数码相机的技术含量不断提高,最终将可能是数码相机把传统相机送进历史博物馆。已在办公和家用两方面都得到普及的扫描仪,是将平面的文字和图像信息变成数字信息的设备。扫描仪的成像器件便是线阵 CCD,文字或图像的全部信息是由 CCD 按一定的规则扫描而得到的。线阵 CCD 的成本比面阵 CCD 低,所以扫描仪的价格也比较低,这是扫描仪得到广泛应用的重要因素之一。许多家庭利用扫描仪把家里积存的大量照片数字化,存到计算机的硬盘或刻进光盘,编了目录和索引,以便于调阅和欣赏。CCD 的另一个重要应用领域是摄像机,以它作为摄像机的图像传感器。目前摄像机不仅在广播电视行业起着重要的作用,而且在国民经济的许多领域都得到了广泛的应用。在航空航天领域,装在航天器上的摄像机,使地球上的人们可以看到飞行状态下航天飞机中航天员的活动情况,看到地球各部分的地貌、大气的状况(如云图),看到月球和火星的地貌。在天文学领域,用来观察和研究遥远天体的天文望远镜,它所观察的对象除了太阳以外大部分天体都很暗,能够收集到的光也很弱。为了能够看清楚暗弱天体,望远镜的口径越做越大,望远镜要长时间指向同一天体,其图像接收器需要具备很高的灵敏度。CCD 出现前,天体的像由照相干板记录,望远镜里的照相底板长时间曝光后,经过显影和定影,有时还要在暗室里使用放大机将底板(负片)放大成照片(正片)再由天文学家去研究。通常拍一幅天体图需要数小时,用 CCD 代替照相底板后,曝光时间可以缩短到几分钟,图像可直接传到计算机屏

幕上研究、记录和处理,使望远镜的效率大为提高。光谱仪是一种用来记录光源的光谱的通用的科学仪器,每种物质都有特征的光谱线或光谱带,光谱数据能够给出发光体(光源)的组成和状态的信息。光谱仪在科学研究、地质矿产、石油化工、钢铁、农业和食品工业、医药卫生、资源环境、生态环保、航天遥感等诸多领域都有重要的应用。CCD 出现前,光谱的记录用照相底板,显影定影后,根据标准谱线和比长仪量取谱线的波长,依据底板的乳剂特性和显微光度计测量谱线的相对强度,这都是非常耗时的工作,效率很低。使用 CCD 以后,不仅提高了获取光谱的效率,而且可以做到实时和在线光谱检测,光谱仪被放到了生产线上,操作人员可以随时“看到”原料和产品的质量。

在 LAMOST 中,每 250 根光纤接到一台光栅光谱仪上,每台光谱仪配红、蓝两台 CCD 相机,记录的光谱范围分别是 570~900 nm 和 370~590 nm,CCD 的像元数为 $4\,096 \times 4\,136$,CCD 在以每秒 200 Kpix 速率读出时,40 s 可获得全幅光谱图。利用光纤和 CCD 的配合,使 LAMOST 成为目前世界上光谱获取率最高的望远镜。应该说明,除了 CCD 之外,还有其他类型的图像传感器,如 CMOS 半导体图像传感器和光电二极管阵列等,它们有和 CCD 相似的功能,但又具有不同的特点,各自都有一定的应用领域,它们的不同特色的应用为百姓生活增添了色彩。

百余年来,诺贝尔物理学奖,不仅使人类对周围的物质世界有了更加深刻的了解(如量子理论,超导电性的发现和发现,宇宙微波背景辐射的发现和发现),也使人类社会和日常生活发生了深刻地变化(如 X 射线、无线电技术、晶体管、激光和集成电路等),光纤和 CCD 都已经溶入到了社会和日常生活之中(如光纤到户),并将继续发挥它们的作用。

参考文献 (References)

- [1] 周光召. 中国大百科全书·物理学(第二版)[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 2009: 162, 199.
Zhou Guangzhao. Encyclopedia of China: Physics (2nd edition)[M]. Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 2009: 162, 199.
- [2] 冯端. 固体物理学大辞典[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995: 224.
Feng Duan. A dictionary of solid state physics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1995: 224.
- [3] 大天区面积多目标光纤光谱望远镜[EB/OL]. <http://www.lamost.org>.
Large sky area multi-object fiber spectroscopic telescope (LAMOST)[EB/OL]. <http://www.lamost.org>.

(责任编辑 王芷)

《科技导报》“学术争鸣”栏目征稿

科学研究需要争鸣和探索。《科技导报》设立“学术争鸣”栏目,旨在活跃学术气氛,开展学术讨论,促进学科的深入研究。本栏目欢迎对已发表的学术论文观点进行质疑,也欢迎广大作者对各个领域的科技问题进行开创性的学术探索。本栏目欢迎广大一线科技工作者投稿。投稿网址: www.kjdb.org; 投稿邮箱: kjdbbjb@cast.org.cn。