

安徽师大关工委
大学生科普讲座

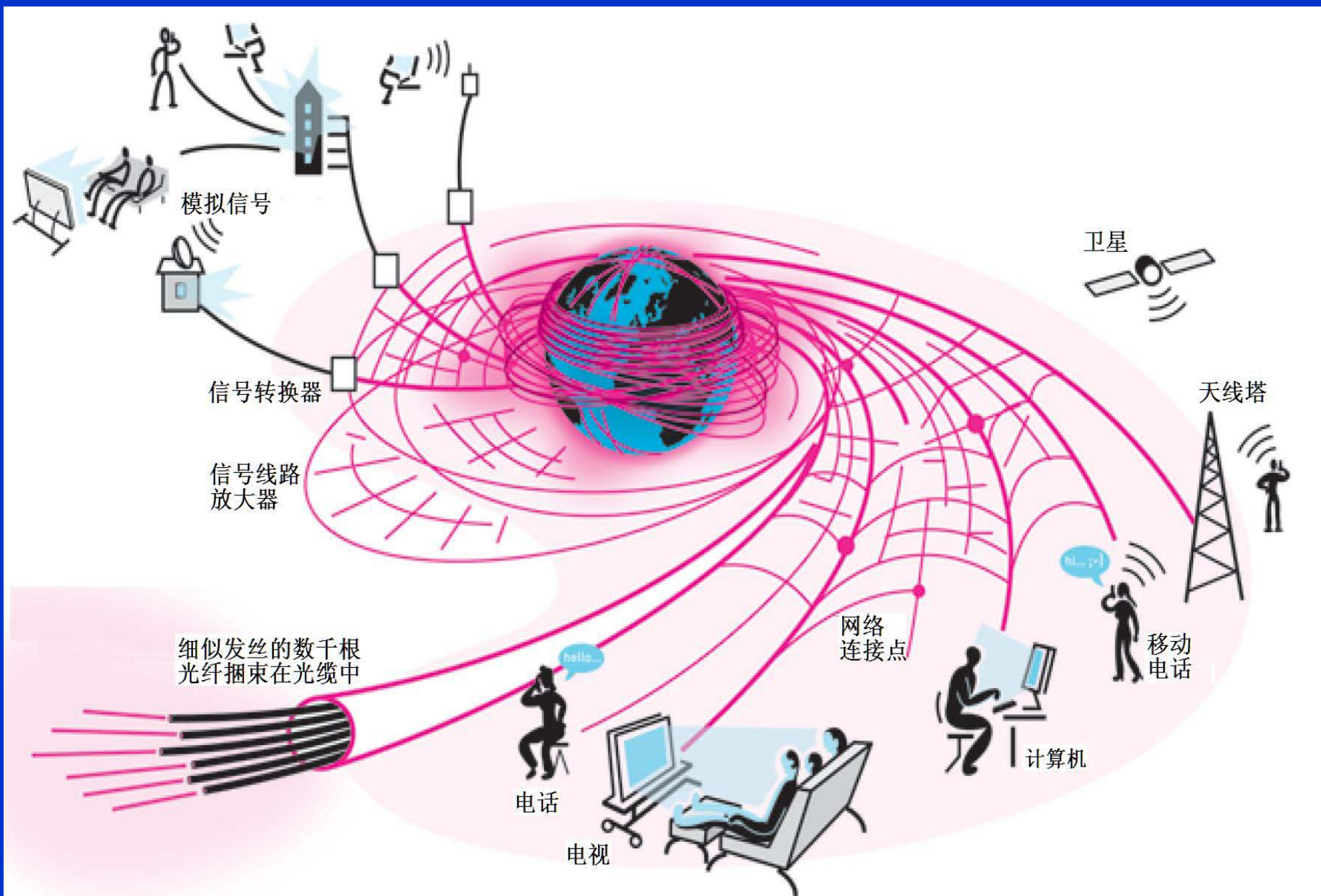
引领通信革命的光纤

——2009诺贝尔物理奖解读

安徽师范大学
物理与电子信息学院

陆同兴 2009.12

序——光纤全球通信





安徽师范大学

2009年度诺贝尔物理学奖

2009年10月7日瑞典皇家科学院诺贝尔奖委员会宣布，将2009年度诺贝尔物理学奖授予

华裔科学家：**高琨(Charles K. Kao)**

美国科学家：**S.博伊尔(Willard S. Boyle)**

E.史密斯(George E. Smith)

高琨因“开创性的研究与发展光纤通信系统中低损耗光纤”获得一半奖金；

S.博伊尔和**E.史密斯**因“发明了应用于数码照相机和先进医疗与科学仪器中的电荷耦合器件”获另一半奖金。





安徽师范大学

高琨领奖

12月10日，2009年诺贝尔奖颁奖仪式在瑞典首都斯德哥尔摩举行。高琨亲自出席颁奖仪式，从卡尔十六世国王手中接过这一殊荣。





安徽师范大学

八位获诺贝尔奖华人科学家



1957年，31岁的**李政道**和35岁的**杨振宁**，因假设“在基本粒子的弱相互作用中宇称可能是不守恒的”而共同获得诺贝尔**物理学奖**。



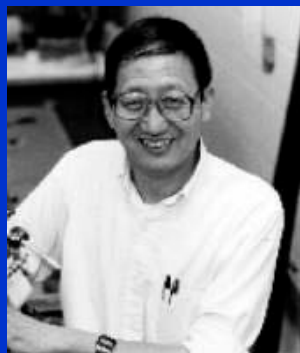
1976年，47岁的**丁肇中**因“发现了**J/ψ**粒子”而获得诺贝尔**物理学奖**。



1986年，57岁的**李远哲**因“发明交叉分子束方法使详细了解化学反应的过程成为可能”而获得诺贝尔**化学奖**。



1997年，50岁的**朱棣文**因“发明用激光冷却和俘获原子的方法”获得诺贝尔**物理学奖**。



1998年，60岁的**崔琦**因“发现并解释了电子量子流体这一特殊现象”获得诺贝尔**物理学奖**。



2008年，57岁的**钱永健**因“发现并发展了绿色荧光蛋白”而获得诺贝尔**化学奖**。



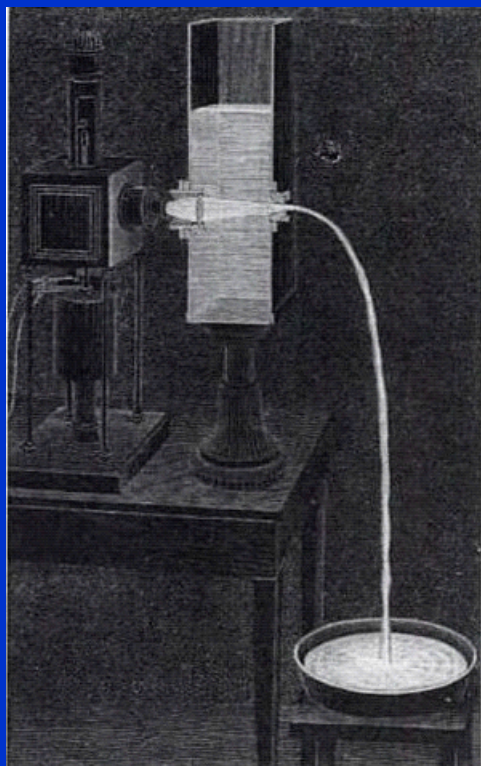
2009年，76岁的**高琨**因“开创性的研究与发展光纤通信系统中低损耗光纤”而获得诺贝尔**物理学奖**。

一、追踪历史





1941年，一个瑞士教授科拉顿(J.-D. Colladon)在日内瓦大学第一个演示了水柱中的导光现象。

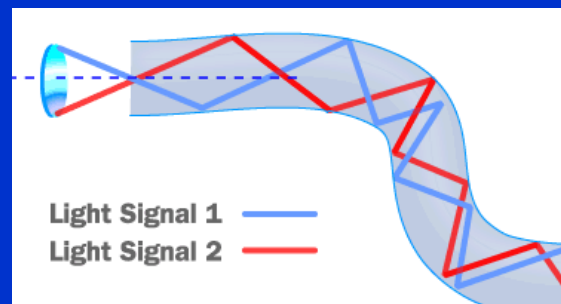


Colladon's fountain sparkles with light from an arc lamp, illustrated in his 1884 article.



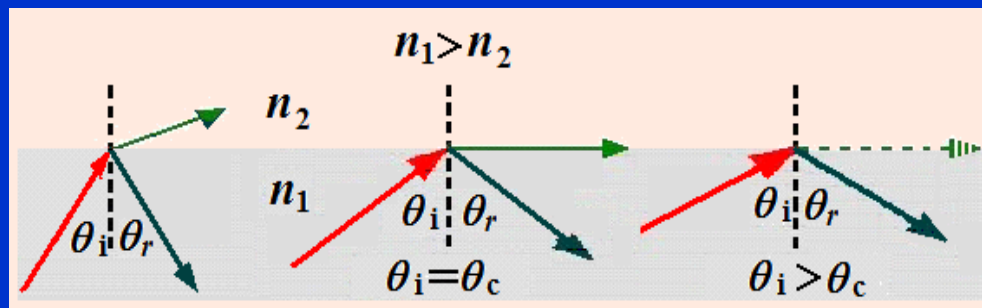
科拉顿

差不多在同一时期，法国的巴比内脱(J. Babinet)进行着同样的研究，他还将水柱中的导光现象扩展到弯曲玻璃棒中。



巴比内脱

利用光的全反射原理，可以解释光线被约束在折射率较高的水柱中传输现象。

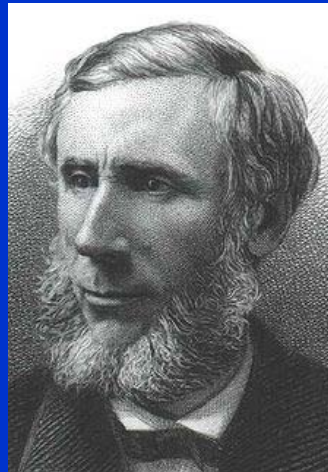


$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

在科拉顿1884年发表文章中的流水闪光



种种全反射现象

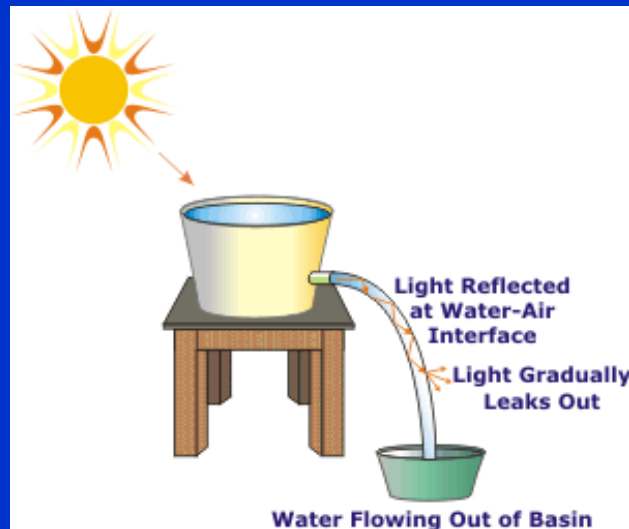


丁达尔

英国物理学家丁达尔(Tyndall)细致地研究过全反射。

他说：当水中光线以和水面垂线的夹角大于**48度**入射时，光线就不再离开水，它在水面处发生全反射…。

水开始出现全反射的极限角是 **$48^{\circ}27'$** ，火石玻璃是 **$38^{\circ}41'$** ，金刚石是 **$23^{\circ}42'$** 。



1870年丁达尔演示全反射





1、喷泉的照明与装饰，使喷泉明亮、美丽动人：
先后有**1884**年伦敦国际健康展览会、**1887**年曼彻斯特皇家周年纪念展览会、**1888**年格拉斯哥与巴塞罗那照明喷泉；**1889**年巴黎世博会等。

2、用作照明系统：**1888**年维也纳罗施与雷乌斯用于人内照明；**1895**年法国人雷内用于早期电视；**1898**年美国史史密斯申请了牙科用照明灯专利；**1920**年代开始用于显微镜照明。

3、光纤图像传送：

1926年，贝尔德(J.L.Baird)申请了采用光纤阵列应用于电视成像的英国专利；

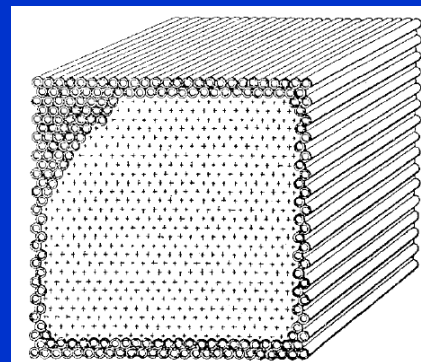
1930年代，德国青年雷姆(H.Lamm)与日拉赫(W.Gerlach)提出导光束传送图像，由于采用的是裸体光纤，成像模糊。

1954年，物理学家霍普金斯(H.Hopkins)与印度人卡巴尼(N.Kapany)在“自然”杂志报道用数千玻璃纤维组成的导光束成功传送图片；同期荷兰人荷尔(A.V.Heel)独立地报道了图像的传送。

1957年美国胃肠病医生希舒威茨(B.Hirschowitz)首先在病人身上检测内窥镜。



Luminous fountains brighten the night at the close of the Universal Exposition in Paris November 6, 1889.



贝尔德的光纤阵列成像

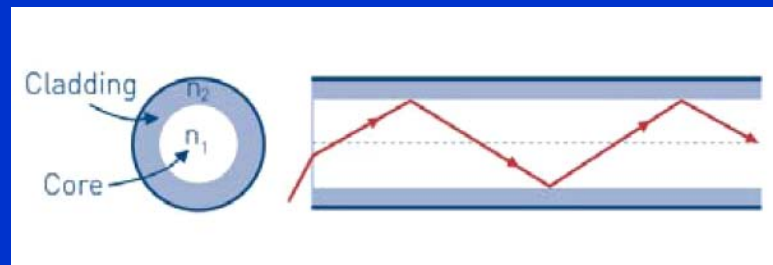


1961年用胃镜检查病人



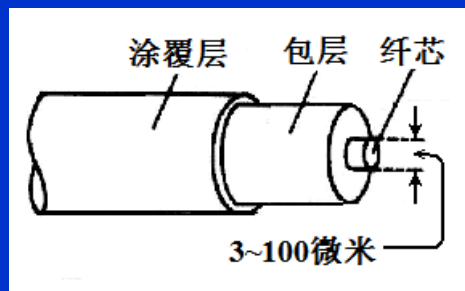
光纤光学の诞生

早期导光玻璃纤维是裸体的，即全反射发生在纤维壁与空气之间。为排除环境空气污染影响，并改善传输质量，荷兰人荷尔设计了有外包层的光纤。1956年柯蒂斯(L. Curtiss)制作了第一个包层光纤——装入管子的玻璃棒。

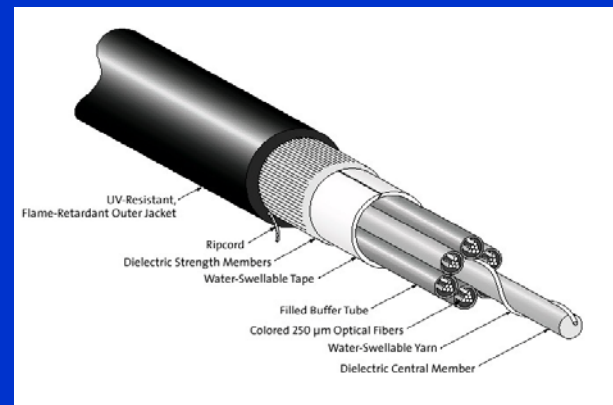


带有包层的光纤结构是：中心部分是纤芯，一根极细且折光率稍高的玻璃，纤芯周围的是包层，它也是一层玻璃，其折光率略低于纤芯。

随后，卡巴尼(N.S.Kapany)对包层光纤中光的传播进行了理论分析，并第一次使用“光纤光学”术语，而斯尼茨尔(E.Snitzer)进一步完善了包层光纤理论。至此，现代光纤光学快速地发展起来了。



包层光纤



光缆

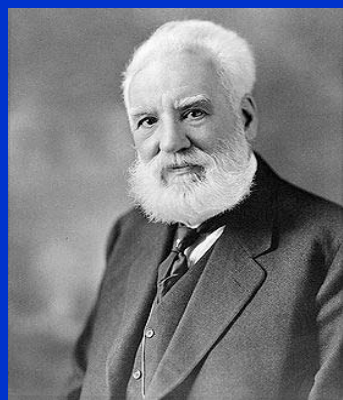
二、从电通信到光通信





摩尔斯电报机

在通信史上，最早长距离通信的是电报。**1844**美国人莫尔斯发明了电报码，在华盛顿到巴尔迪摩**40**英里电报线上传递了第一条电报信号："上帝创造了何等的奇迹！"



A.G.Bell

1876年，贝尔(A.G.Bell)则发明了借助电流传送语音的电话。在纪念美国独立一百周年的费城展览会上展出了他的发明电话机(Telephone)。**1880**年，贝尔又发明了借助光线传送语音的光话(Photophone)。



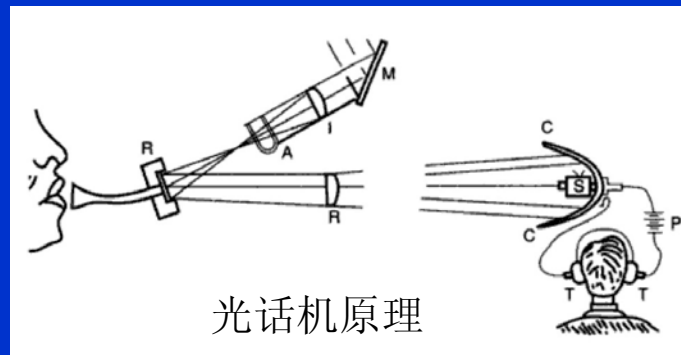
电话线架设到山区

然而，贝尔的后面发明的光话机，因使用麻烦，话音质量较差，被他自己发明的电话机在竞争中被淘汰了。



Bell 电话机与光话机

光话的原理是将阳光聚焦于随声音振动的一片平面反射镜上，反射光的强度因此随声音振动发生变化。该反射光投射到接收器中的硒电池上，引起电路中电流变化，完成转换成声音的目的。



光话机原理



直到上世纪80年代，人类的最主要通信方式是电通信(electrical communication)。

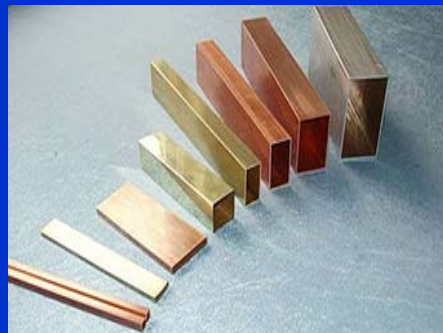
电通信——一切运用电波作为载体而传递信息(声音、文字、数据和图像)的通信方式。电通信分为有线电通信和无线电通信。

有线电通信：分为明线通信、电缆通信、波导通信等。缺点是造价高，维修工作量大，易受自然损害及炮火袭击。

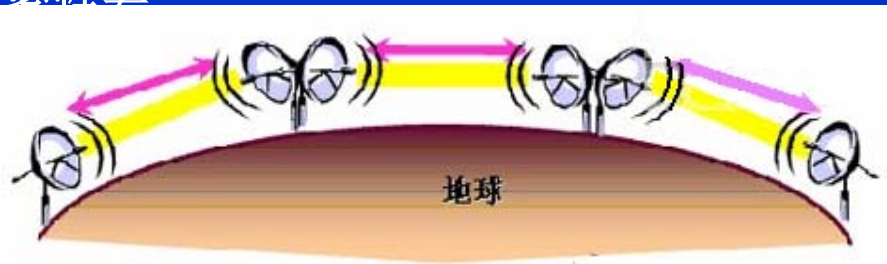
铺设中的跨海
电缆1955年

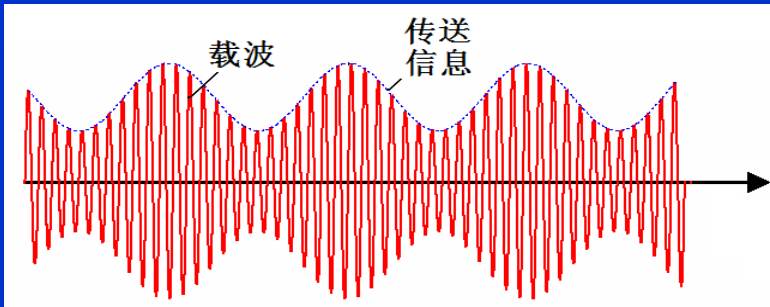


1950年代，全球各大洲之间开始铺设通信电缆，以实现全球通信。



无线电通信：利用无线电波传输信息，不需架设传输线路，不受通信距离限制，机动性好，建立迅速。**缺点：**传输质量不稳定，易受干扰或易被截获，保密性差

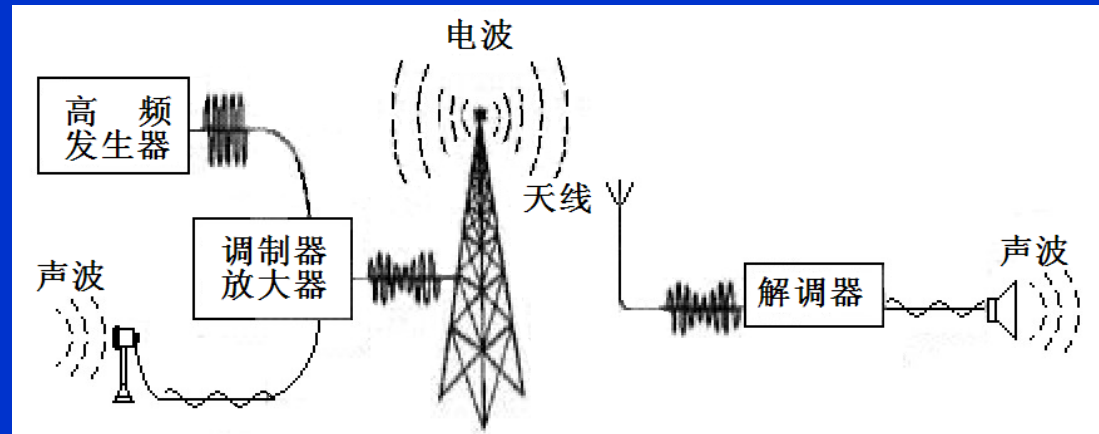




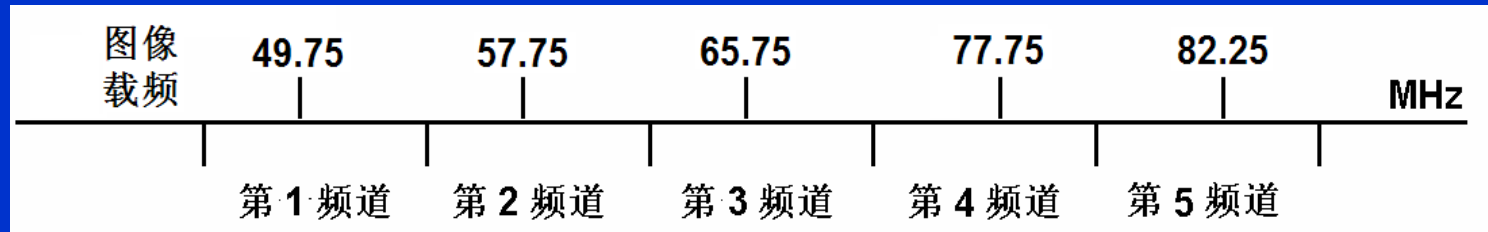
与初期通过直接传送电振动通信方式不同，现代通信都是通过传送已调波实现的。

当人们需要将把语音、数据、多媒体图像等信息传送到远方时，通常采用各种调制技术，将它们搬移高频电磁波(载波)上进行传送，普通收音机就是接收由无线电台发射的调幅电波。

每个传送的信息都有一定的自身频带宽度。例如：音乐~10kHz，图像~6MHz，它们在载波上占据一定宽度。载波频率越高，它所拥有的传送频带越宽，因此能传送更多的信息资源。



中国电视
频道



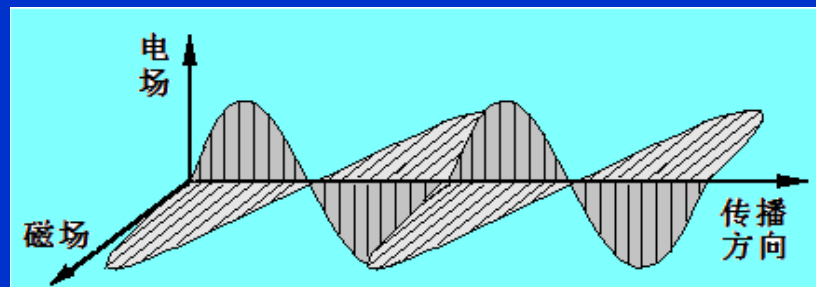
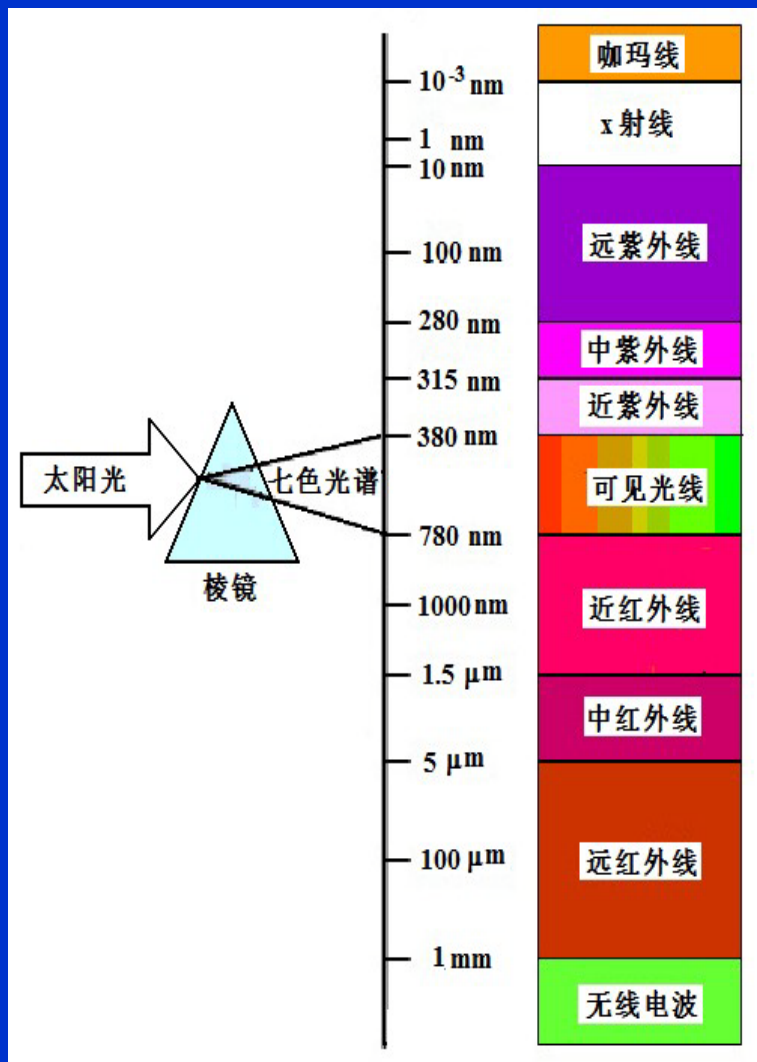


甚低频	VLF	3K-30KHz	1KKm-100Km	远距离通信；超远距离导航；
低频	LF	30K-300KHz	10Km-1Km	越洋通信；中距离通信；远距离导航；
中频	MF	0.3M-3MHz	1K-100m	船用通信；业余无线电通信；移动通信；中距离导航；
高频	HF	3-30MHz	100-10m	远距离短波通信；国际定点通信
甚高频	VHF	30-300MHz	10-1m	电离层散射；人造电离层通信；对空间飞行体通信；移动通信
超高频	UHF	0.3G-3GHz	1-0.1m	中、小容量中继通信；对流层通信；国际海事卫星通信
特高频	SHF	3-30GHz	10-1cm	大容量中继通信；数字通信；卫星通信
极高频	EHF	30-300GHz	10-1mm	再入大气层时的通信；波导通信

随着飞速发展的经济、军事、科学技术、娱乐生活等，到上世纪60年代，原有的电通信技术到了不堪重负的地步。



电磁波的波长与频率



光波与无线电广播的低频电波同属电磁波，同样可以采用调制方法，实现光波通信。

光波的频率比微波频率高**1000**倍以上，因此可利用率于通信的频带宽度也比微波大**1000**倍以上。光波通信具有大容量的内在优越性。

波 长	频 率 GHz	带宽 (10% 载频) GHz	带宽比 GHz
微波 3mm	100	10	1
红外波 3μm	100000	10000	1000

无线激光通信

物理学中的量子力学揭示了原子的发射机制，导致微波激射器 (Maser) 与激光器 (Laser) 诞生。



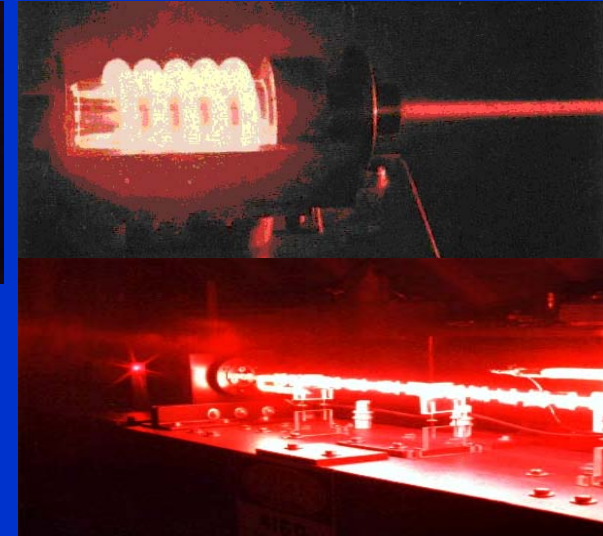
除优良的单色性，激光束有极好的方向性、相干性与高亮度，可穿行于地球大气中，太空的星球间，穿透到茫茫的大海下，实现人们渴望已久的无线光通信。



1960年5月诞生红宝石激光器，12月氦氖激光器成功运转，1962年研制成半导体激光器。



像微波一样，激光是一束近似单一频率的光，可以通过调制实现信息传递，开创人类光通信的美好理想。



无线激光通信的主要缺点

- (1) 收发端需要正确对准，传输距离越大，光信号质量越差；
- (2) 恶劣的气候环境会衰耗传播信号；
- (3) 开发式传输保密性差；
- (4) 高强度的光信号发射功率可能危及人眼安全。



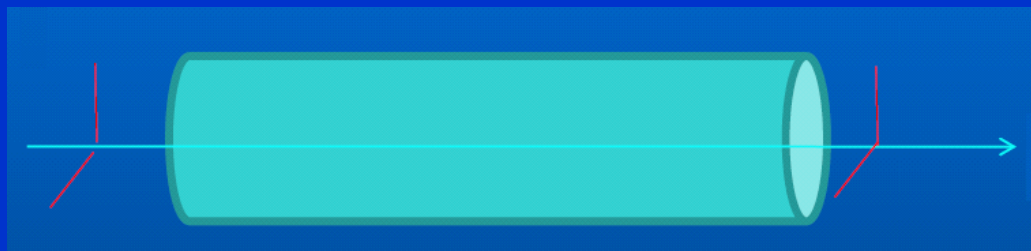
有线(光波导)开发

上世纪60年代, 玻璃介质的光纤损耗是**1000dB/km**, 传输20米后剩入射光强的**1%**, 光纤做长距离通信不被看好。

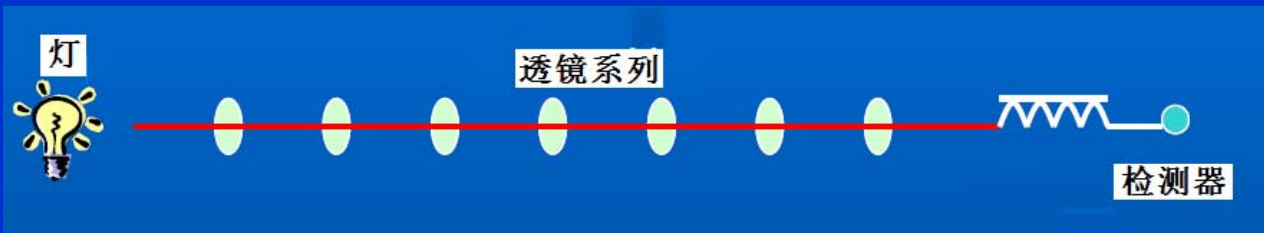
许多科学家把希望寄托于光波导, 并提出了种种方法。英国的卡博威克(A.E.Karbowiak), 法国的西姆(J.C.Simon)等实现了薄膜波导中的单模传输, 降低了光的色散与传输损耗, 对光通信很有利。

1、光波导传输

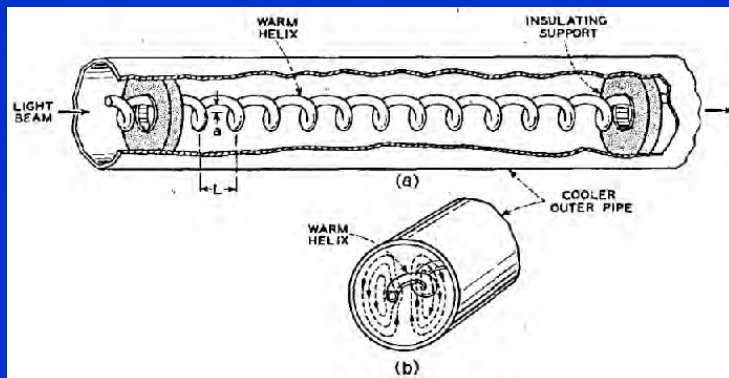
将微波波导传送电磁波延伸到光波段。



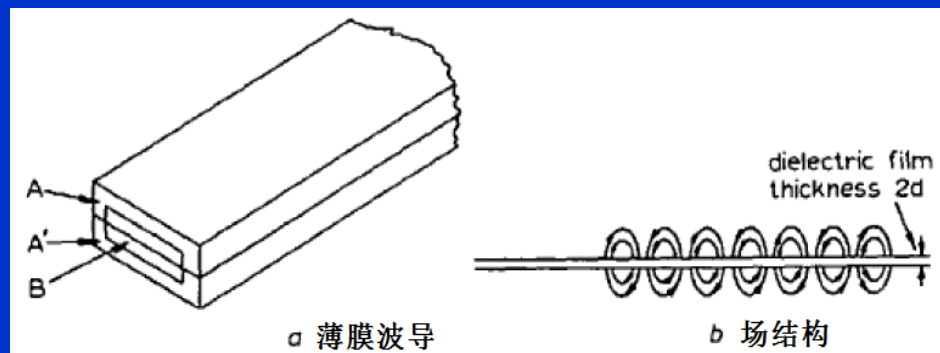
2、聚焦透镜传输



3、气体管热梯度透镜传输



4、薄膜波导传输





许多科学家致力于光波导模式研究，结构不同，光波传输也模式不同：单模或各种多模模式。

单模具有圆形光斑，单模传输可以保持原有的光脉冲形状，适合远距离传输。多模运转的损耗较高，并且会产生由于高阶色散引起时间展宽。

1961年美国的斯尼茨尔(E.Snitzer)完成了单模光纤的理论工作。

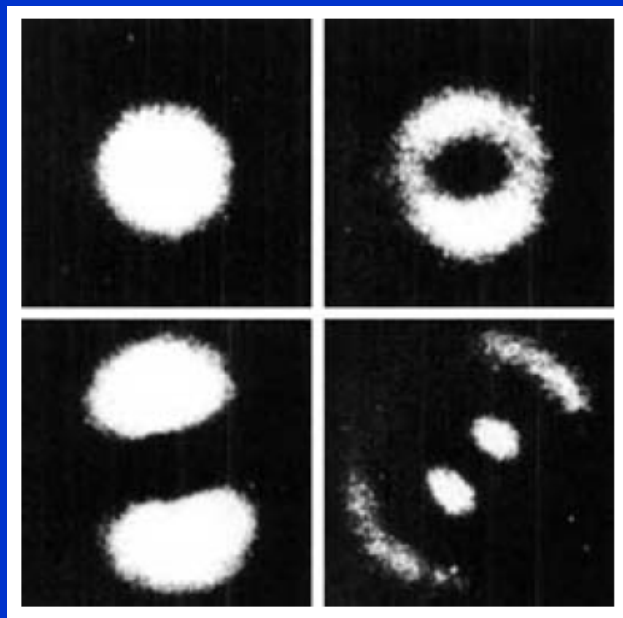
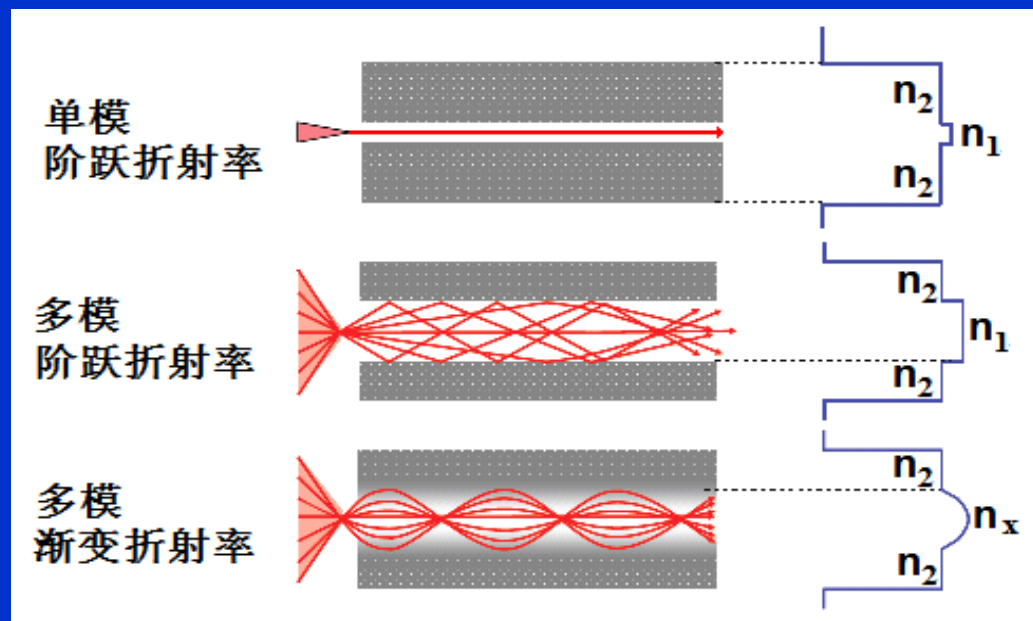
1964年日本的西泽润一(J.-i.Nishizawa)发明了渐变折射率光纤。这种光纤可降低因空间模引起的色散，有利于光的远距离传输。



斯尼茨尔



西泽润一



三、高锟对低损耗 光纤研制的贡献





1933年出生于上海；
1944年随父移居香港，入读圣约瑟书院；
1957年毕业于伦敦大学电气工程专业；
1965年获得伦敦大学博士学位。

英国国际电话电报公司 (1957)
英国国际电话电报公司标准通讯实验室 (1960)
香港中文大学：
 电子学系教授及讲座教授(1970—1974)
 校长 (1987-1996)
英国国际电话电报公司：
 首席科学家 (1974)
 工程总裁、行政科学家 (1982)
 研究事务总裁 (1986)
美国国家工程院院士 (1990)
台湾中央研究院院士 (1992)
香港高科桥有限公司主席兼行政总裁 (1996—)
中国中科院外籍院士(1996)





机遇：

- 1、通信事业转型时机——(由毫米波通信转向光通信)；
- 2、一个好的研究单位——**STL**；
- 3、可以独挡一面的研究小组。

大学毕业后高锟进入英国国际电话电报公司(**STC**)，任微波传输部工程师。**1960**年转入**STC**附设标准通讯实验室(**STL**)。

STL原本从事金属圆波导毫米波传输研究，**60**年代初转向光通信。并由卡博威克负责光通信研究。**1964**年**12**月，卡博威克离开**STL**到新南威尔士大学任职，高锟接替了**STL**的光通信研究。

高锟负责仅有一个成员的研究小组——做波导缺陷分析的大学生霍克哈姆(G.A.Hockham)。不久，高锟放弃了由卡博威克建立光的薄膜波导传输系统，转向光纤传输研究。

挑战：

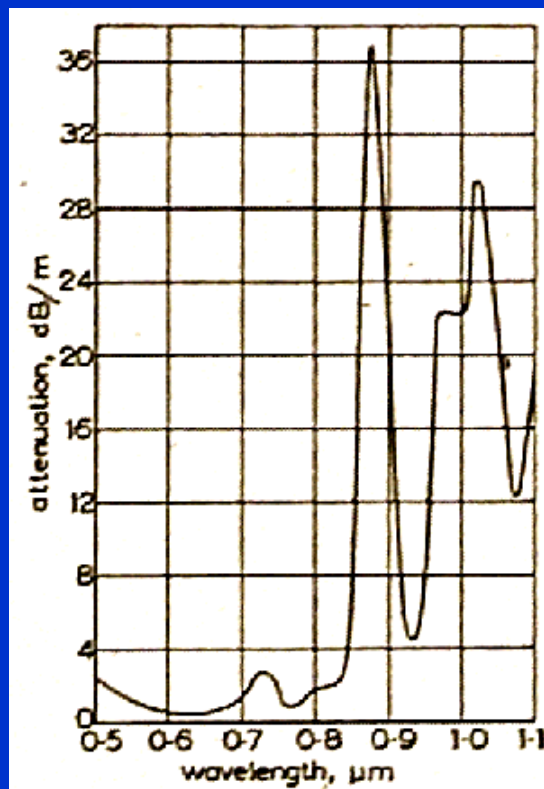
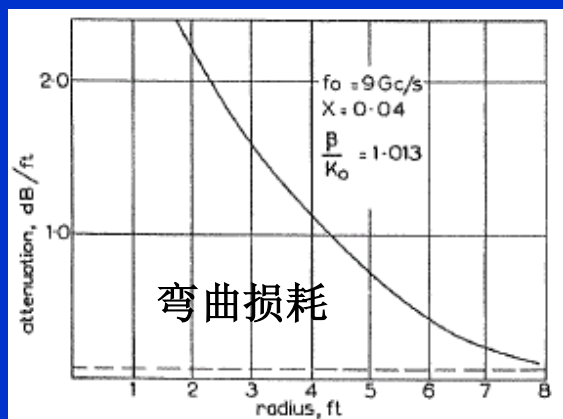
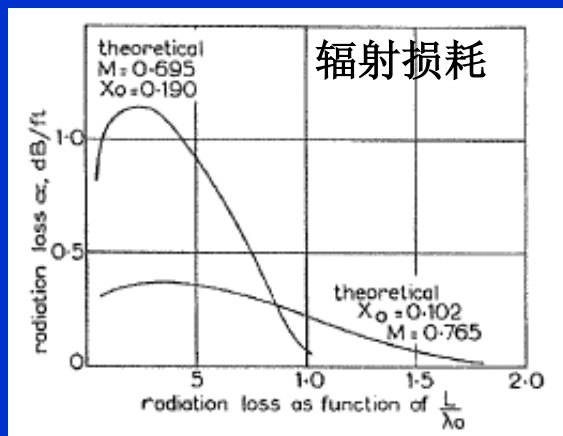
- 1、光纤通信前途不明朗，当时传统与主流的是毫米波通信；
- 2、不清楚光纤的光损耗机制，低耗光纤主要困难在那里？
- 3、实现光纤光通信还要合适的光源与有关的光纤器件；
- 4、人力、资历单薄，敌不过国际的同行竞争。



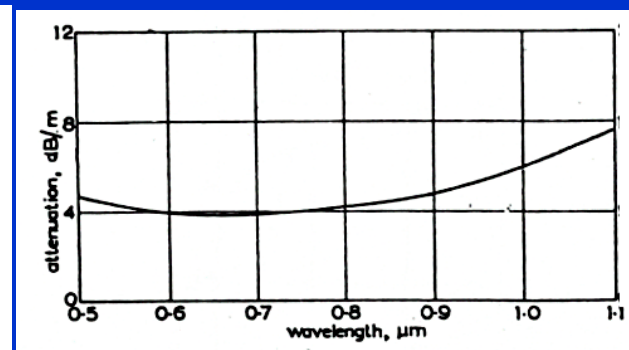
高锟小组自从接替**STL**光通信工作后，对有关通信的光纤性质进行着全面的研究，不仅研究波导的结构，而且研究不同介质的损耗性质。真是初生牛犊不怕虎。

1966年1月，高锟向伦敦电气工程协会报告，可以将光纤的损耗降到通信所要求的**20 dB/km**以下。

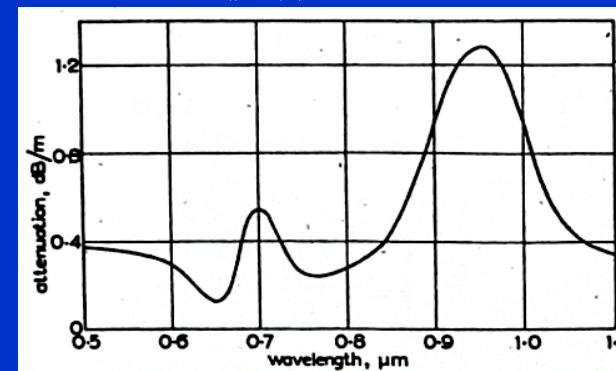
三种材料的损耗谱



有机玻璃
 $\sim n \cdot 10^4 \text{ dB/km}$



SW6玻璃 $\sim n \cdot 10^3 \text{ dB/km}$



熔融石英
 $n \cdot 10^2 \sim 10^3 \text{ dB/km}$



1966年7月公开发表论文

Proc. IEE, 113, NO.7, July, 1966

Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies

K. C. Kao, B.Sc.(Eng.), Ph.D., A.M.I.E.E., and G. A. Hockham, B.Sc.(Eng.), Graduate I.E.E.

Synopsis

A dielectric fibre with a refractive index higher than its surrounding region is a form of dielectric waveguide which represents a possible medium for the guided transmission of energy at optical frequencies. The particular type of dielectric-fibre waveguide discussed is one with a circular cross-section. The choice of the mode of propagation for a fibre waveguide used for communication purposes is governed by consideration of loss characteristics and information capacity. Dielectric loss, bending loss and radiation loss are discussed, and mode stability, dispersion and power handling are examined with respect to information capacity. Physical-realisation aspects are also discussed. Experimental investigations at both optical and microwave wavelengths are included.

重要结论:

- 1、光纤的损耗最主要是由材料的吸收与散射引起的，后者主要由金属杂质引起，尤其是铁离子；
- 2、高纯度的玻璃介质是光通信应是优先考虑的材料；
- 3、由波导弯曲与缺陷引起的损耗（如传播与辐射损耗）很小；
- 4、单模光纤是光通信最好的传输介质。
- 5、预期光纤损耗为数dB/km，大大低于当时可得到光纤的损耗。

1966年11月，法国的威尔茨(Werts)发表了与高锟结论类似结果的文章。但因没有基金支持为任何后续进展。



诺贝尔奖委员会评价

高锟不仅是一个出色的物理学家，而且是一个有远见的优秀通信工作者。在高锟激励下，一个以获得低损耗光纤为目标的全球性研发工作开始了。

1965年，美国贝尔电话实验室的权威专家莫勒(**S.Miller**)小组致力于研究气体透镜导光系统，因为他们断定，光纤通信没有前途，

1966年初高锟访问贝尔实验室时受到冷遇，但在日本受到了欢迎。

1968-1969年，高锟与新加入的同事，在“科学仪器”上发表三篇论文，系统报道了对各种波导玻璃和材料光衰减的仔细测量。他们特别指出，熔融硅具有光通信所希望的纯度。

受高锟的影响，**1967年初**英国邮政总局拨款**1200万英磅**于纤维光学研究。

1967年初，日本东北大学的**S.河**上研制出了渐变折射率光纤。

1968年，英国特夭脱(**D.Dyott**)发明用双坩锅制作玻璃熔液包层光纤。

1967年，美国康宁玻璃公司的马瑞尔(**Maurer**)决定用掺钛纤芯与纯硅包层研制光纤，并且调动各类人才全力研制低损耗光纤。

1970年，康宁的**Keck**等人机智地采用半导体工艺中的化学气相沉积(**CVD**)研制成掺钛纤芯单模光纤，在**633nm**波长上的损耗仅为**17dB/km**。

1972年，研制成掺锗纤芯多模光纤，损耗下降到**4db/km**。

1972年，贝尔实验室最终停止了空心光波导的研究。



光纤或由坩埚中溶解玻璃直接拉制，或用预制棒拉制两种方法，但现今更多是从预制棒拉制的，分三个步骤：制作预制棒，由预制棒拉制光纤，做包层与外套：

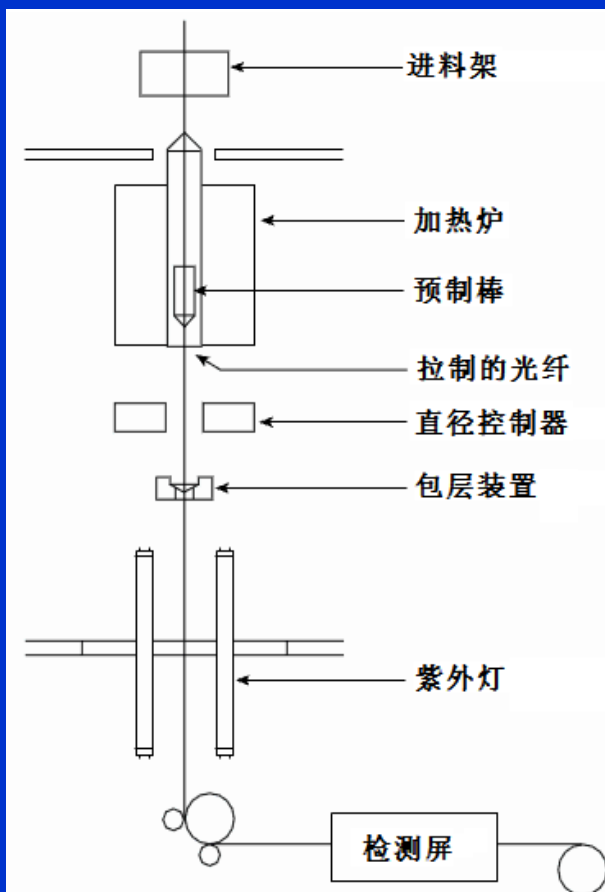
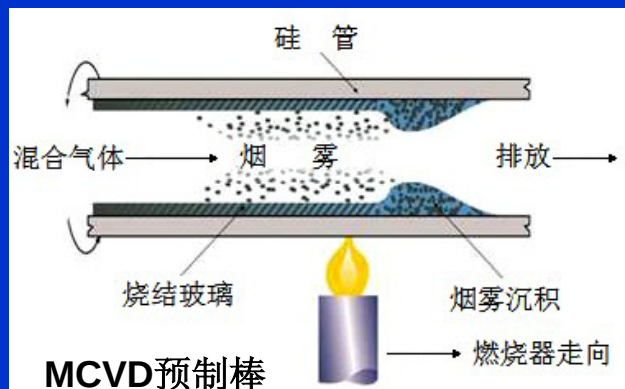
预制棒制作 {

- OVD——外部蒸汽沉积
- AVD——汽相轴向沉积
- MCVD——改进的化学气相沉积
- PCVD——等离子体化学气相沉积

预制棒由热解如下混合气获得



称为化学气相沉积法，它分为：
OVD、AVD、MCVD、PCVD



由预制棒拉制光纤与包层

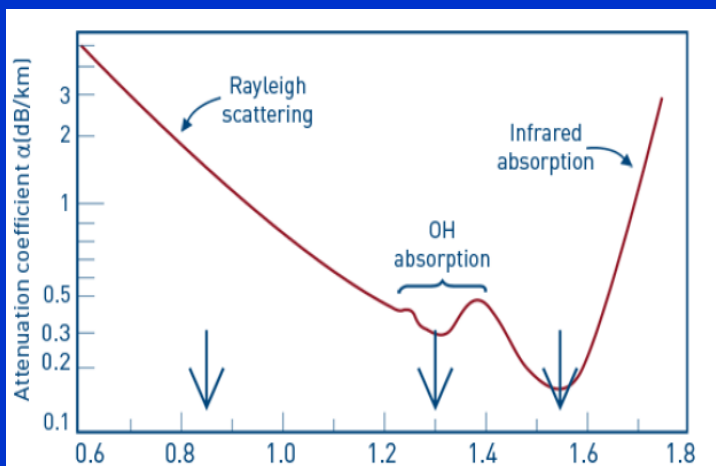


四、光纤通信时代

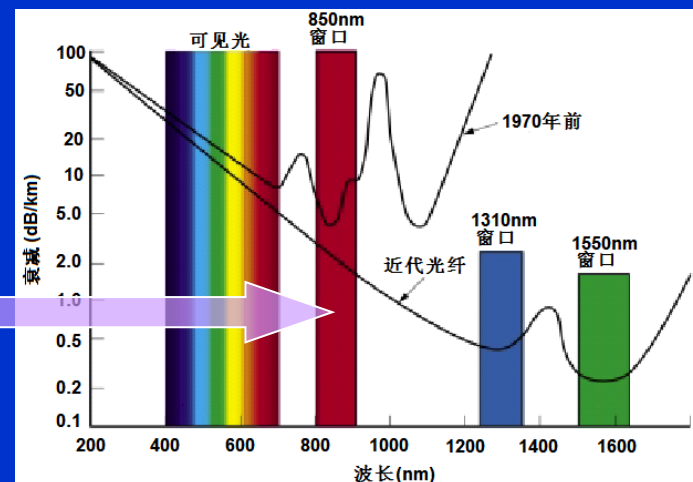




早期在对原材料提纯后，在 $0.8\sim 0.9\mu\text{m}$ 波段石英光纤损耗可降到 20dB/km ，后又降到 3dB/km 以下。称第一波长窗口或短波长窗口。



这波段有LED光源与硅检测器可用，是1970年代最早期开发的波段。

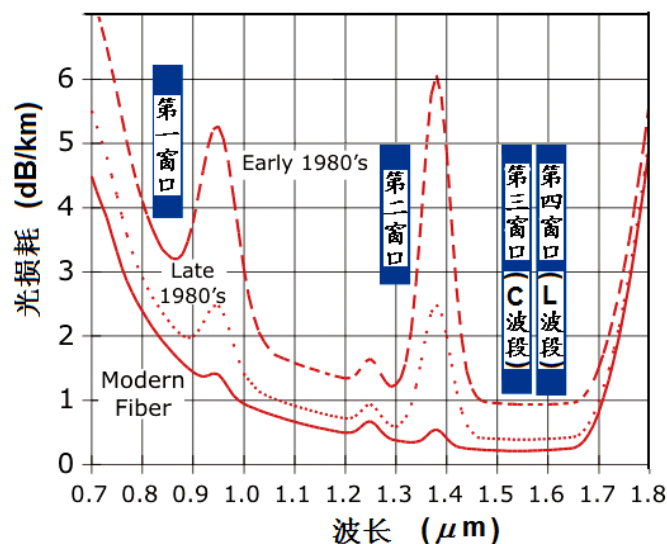


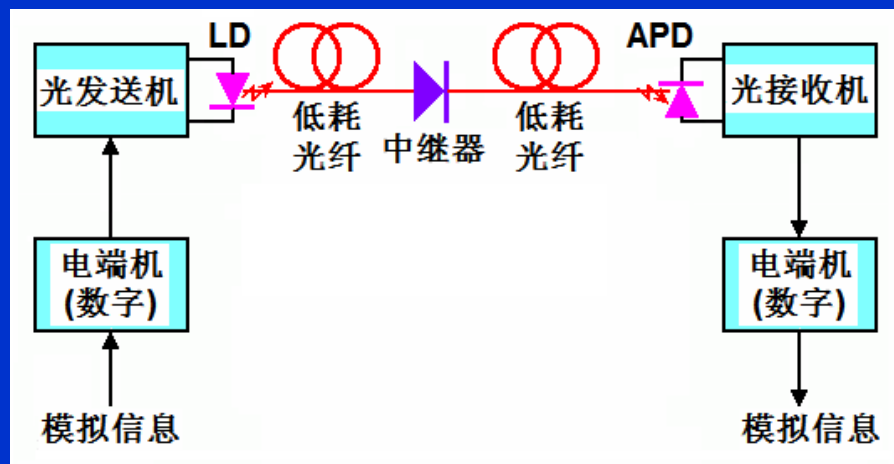
后发现发现 $1.38\mu\text{m}$ 处有强吸收峰，是 OH^- 基团(水)产生的。改进工艺降低 OH^- 吸收峰后，在 $1.31\mu\text{m}$ 处和 $1.55\mu\text{m}$ 处有损耗更低的区域。

$1.31\mu\text{m}$ 波段损耗为 0.5dB/km ，称第二窗口， $1.55\mu\text{m}$ 波段的损耗为 0.35dB/km ，称第三窗口，它的理论损耗仅为 0.2dB/km 。

由于 $1.31\mu\text{m}$ 激光器首先成熟而广泛应用，现在运营的系统主要在这第二窗口。

但 $1.55\mu\text{m}$ 的损耗最低，近年 $1.55\mu\text{m}$ 光纤放大器的研制成功，使得这一窗口成为当前开发、应用的热点。





光纤通信系统由光发送机、低耗光纤、中继器与光接收机组成。

发送端的电端机把信息通过模/数转换，将数字信号调制发送机光源LD(激光二极管)或LED(发光二极管)，LD将送出携带信息的光波。

光波经低耗光纤到达接收端的检测器APD(雪崩二极管)。APD把从光波中检测出信号，并由电端机通过数/模转换恢复出发送来的信息。



1993年，铺设中的中日第一条海底光缆





发光二极管

(LED)

两片导电性能不同的P型半导体和N型半导体的结合区，是称为PN结的过渡层。当PN结加上正向偏压时，注入的少数载流子与多数载流子复合，多余能量以光形式释放出来。

激光二极管

(LD)

半导体激光器用了高掺杂的半导体材料。当PN结上外加电压足够高时，在PN结上形成粒子数反转分布，便在有源区中产生受激辐射而发出激光。

1960年5月，梅曼(Maiman)发明红宝石激光器；

1962年，霍卢内阿克(N.Holonyak)制成第1个实用红光 LED ；

1970年5月，前苏联列宁格勒物理研究所研制成首个室温连续运转二极管激光器； 6月，美国贝尔实验室也报道完成研制。

1973年，贝尔实验室研制的激光二极管寿命达1000小时。

1975年，第一个室温连续运转的激光二极管供应市场；

1976年，麻省理工学院(MIT)的谢肇金(J.Jim Hsieh)等制成连续InGaAsP二极管激光器(1.3 μm ，寿命1500小时)；

1977年，贝尔实验室宣布LD外推寿命达一百万小时(100年)。



1975年，首个非实验性光纤链路在英国的多塞特警察局建立。

1977年，美国电报与电话公司确定做第一代商用系统，光源为波长850nm的GaAs LED，采用渐变折射率多模光纤，速率45Mb/s。

1981年，1.3 μ m波长的第二代商用通信系统问世，采用了渐变折射率光纤。

1982年，英国电话公司进行单模光纤现场实验，由多模转向单模系统。

1982年12月，美国电信公司(MCI)架设纽约-华盛顿光纤通信系统，采用1.3 μ m波段，单模光纤，400Mb/s，美国开始转向单模光纤系统。

1986年10月30日，第一条横跨英吉利海峡的光缆开始商业服务。

1988年12月，第八条跨大西洋电话传输电缆开始服务。它能够在美国、法国和英国之间实现40,000个同步电话通讯。采用了1.3 μ m单模光纤。

1990年代，工作于2.4Gb/s，在1.55 μ m波长区采用单模光纤的第三代光波系统提供通信业务。

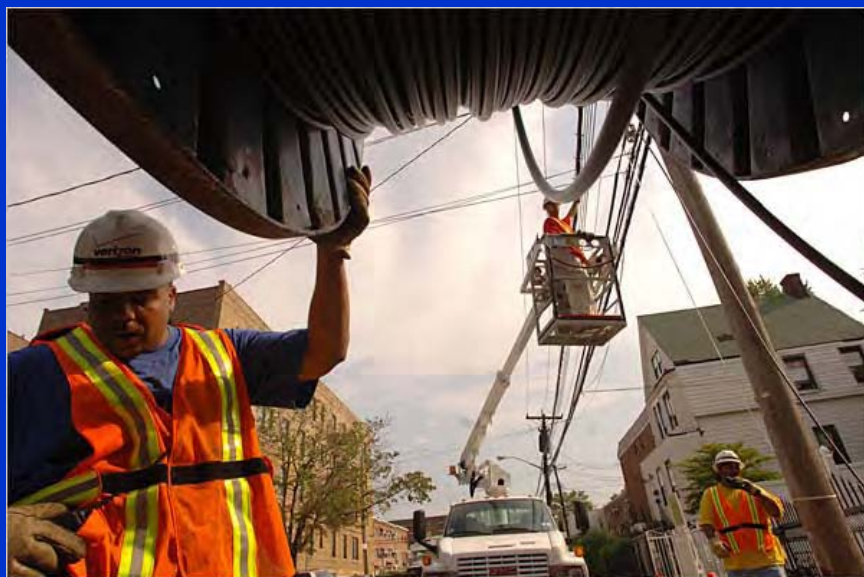
1990年代中期，可以增长中继距离的在线光纤掺铒放大器(EDFA)实用化，一线多用的波分复用(WDM)技术已成熟，使通信系统的容量快速增加。

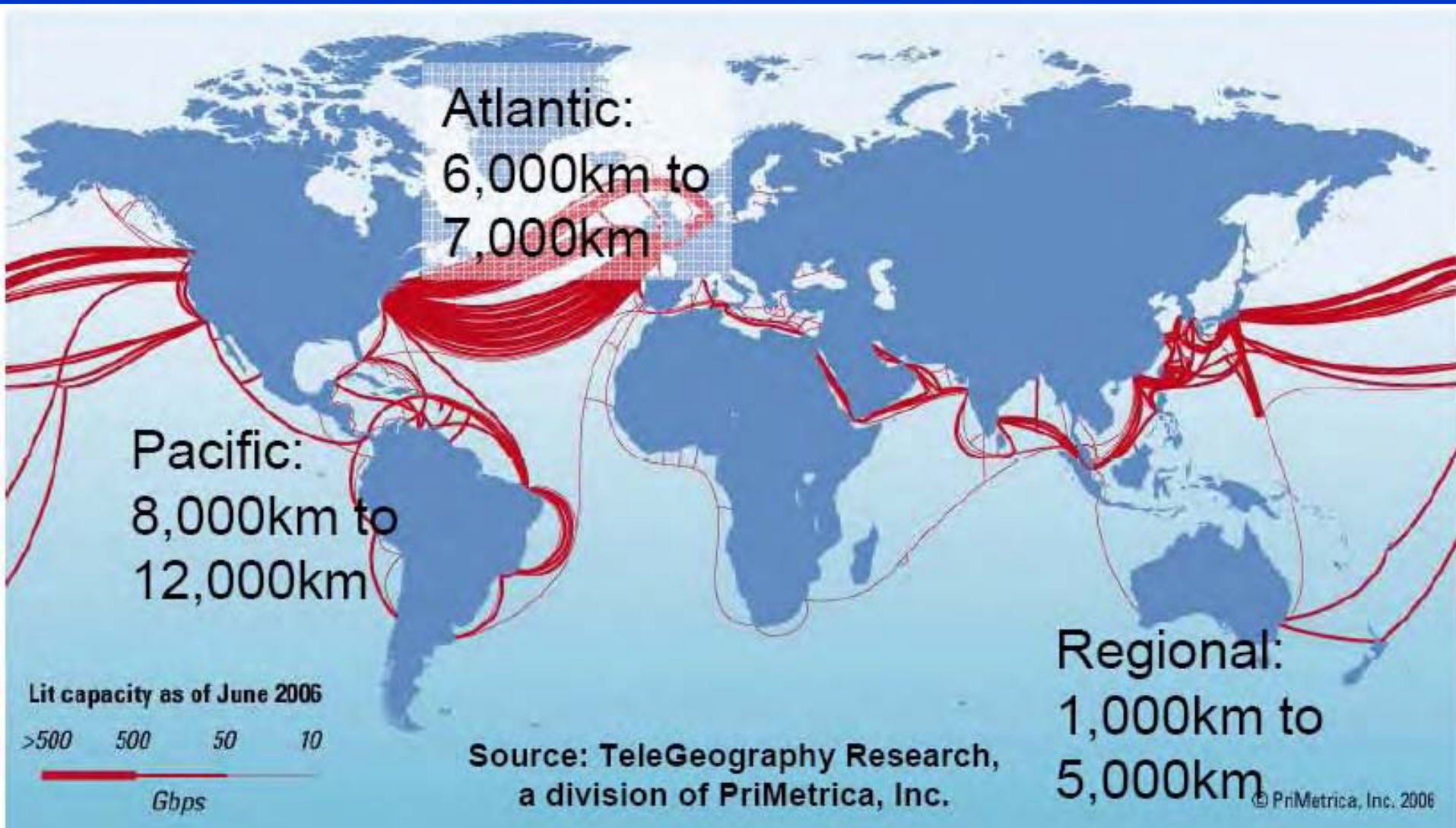
1996年2月，富士通、日本NTT通信实验室和贝尔实验室都报道用不同技术实现1Tb/s 速率的单模光纤传输实验($1T = 10^6M = 10^{12}$)。



安徽师范大学

铺设光通信光缆





在100多个海底光纤系统上使用了42余万公里的光纤



奥巴马通过由白宫发出的信件，高度赞扬高锟：“你的研究完全改变了世界……，促进了美国及世界经济的发展，我本人为你而感到骄傲，世界欠你一个极大人情”。



1、抓住机遇

机遇寓于事物状态的变化与发展之中。高锟年轻时代是通信事业的变革时代，电通信已不能满足时代要求，需要更能适合时代要求的通信方式。机遇青睐于有准备的头脑，高锟正是这样的人。

2、独具远见，勇于创新

创新来源于对传统观念束缚的冲击。当高锟1960年进入英国STL实验室时，是一个刚毕业三年的学士。他不仅勇于接替光通信的研究任务，负责仅有一个成员的研究小组，并且独具远见，大胆地放弃了由卡博威克建立并初见成果的光薄膜波导传输系统，选择了前途还未显露的光纤通信。

3、艰苦奋斗，迎难而上

光纤通信在当时是世界级顶尖难题，无前车可鉴。对高锟而言，不论理论基础，还是实践经验，要解决这个难题都是困难的。然而在坚定信念基础上，他艰苦努力，从制定实验方法到建立实验系统，以深入、细致、艰苦的实验工作，以系统的与有说服力的数据征服了通信论坛，推动了光纤通信的发展。



附：高锟获得的国际大奖与荣誉职位

17项国际大奖

美国硅酸盐学会摩尼奖(1976)
美国富兰克林研究所史特活·柏兰亭奖章(1977)
英国兰克信托基金会兰克奖(1978)
美国电机电子工程师学会摩理斯·H·利柏曼纪念奖(1978)
瑞典艾力松基金会 L·M·艾力松国际奖(1979)
美国武装部队通讯及电子学会金章奖(1980)
美国电机及电子工程师学会亚历山大·格林姆·贝尔奖章(1985)
美国马可尼基金会马可尼国际科学家奖(1985)
意大利热那亚市哥伦布奖章(1985)
日本通讯及计算机促进基金会通讯及计算机奖(1987)
英国电机工程师学会法拉第奖章(1989)
美国物理学会新材料国际奖(1989)
SPIE金章奖(1992)
英帝国司令勋章(1993)
世界工程组织协会杰出工程成就金章(1995)
第十二届日本国际奖(1996)
诺贝尔物理奖(2009)

12个荣誉职位

瑞典皇家工程科学院外籍院士
美国电机电子工程师学会会士(Fellow, IEEE, 1979)
香港中文大学荣誉理学博士(1985)
英国塞萨斯大学荣誉理学博士(1990)
美国国家工程院院士(1990)
台湾国立交通大学名誉博士(1990)
日本创价大学荣誉博士(1991)
英国格拉兹高大学荣誉工程学博士(1992)
台湾中央研究院院士(1992)
英国达勒姆大学荣誉理学博士(1994)
澳大利亚格理斐思大学第一服务荣誉博士(1995)
中华人民共和国中科院第二批外籍院士(1996)