



# 光通信原理与技术

---

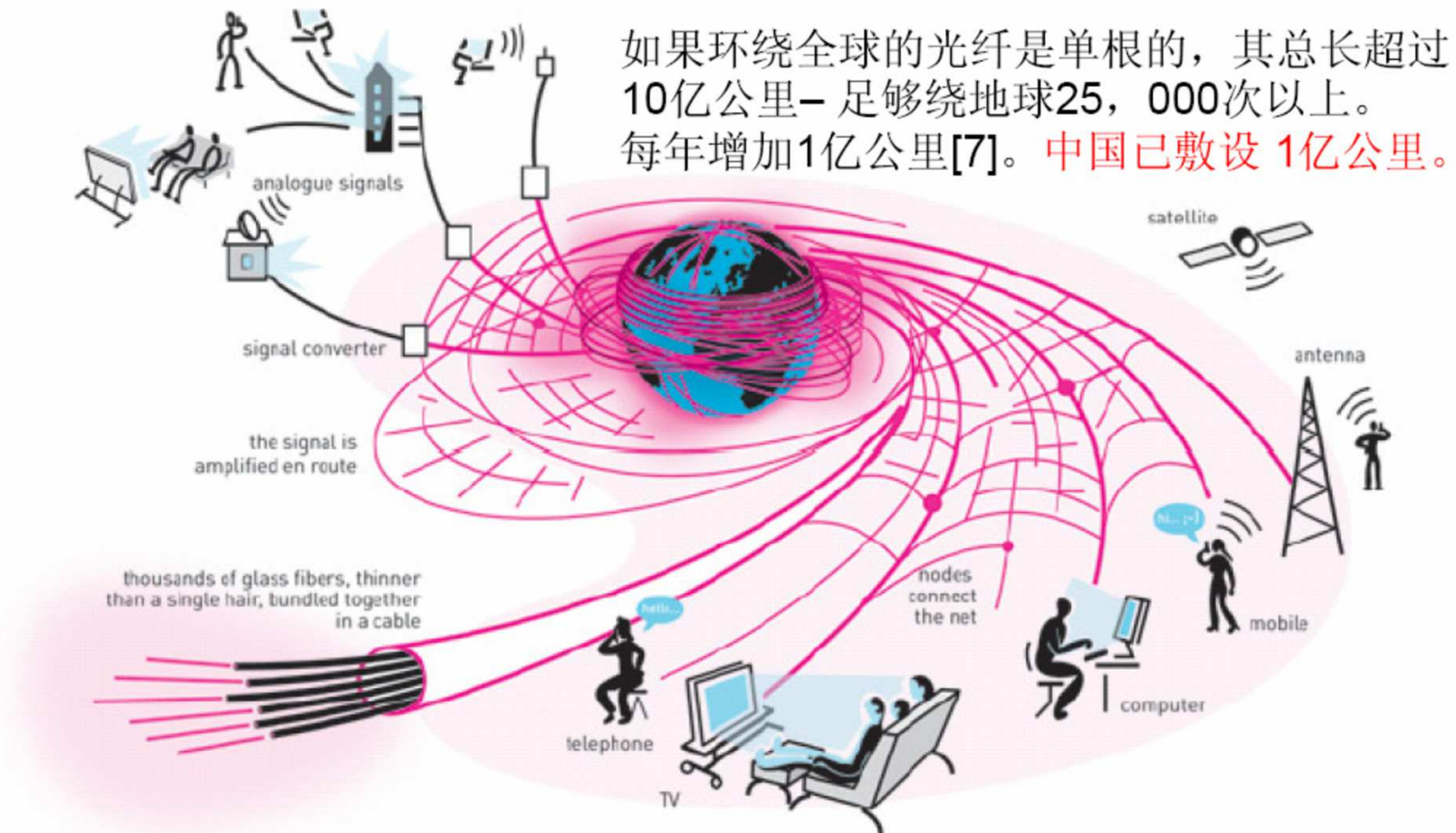
易兴文、李凡  
([yixw5@mail.sysu.edu.cn](mailto:yixw5@mail.sysu.edu.cn))

电子与信息工程学院  
光电材料与技术国家重点实验室

# 光纤通信：现代通信的脊梁与命脉

光纤通信：深刻地改变了并在继续改变着整个世界

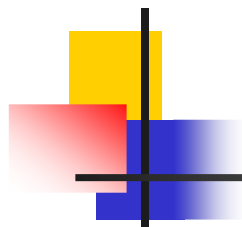
光纤：人类生活必需品（如同水、电的基础设施地位）



# 光纤通信：现代通信的脊梁与命脉



中国首次实现560Tb/s超大容量波分复用及空分复用的光传输系统实验，可以实现一根光纤上67.5亿对人（135亿人）同时通话



# 教学目标

---

- 了解光纤通信的最新发展、成果及前沿研究；
- 理解和掌握光纤通信系统的基本原理与基础知识；
- 为进一步深造及从事相关领域的研究奠定基础。



# 教材及参考书

---

## 教材：

1. 《Fiber-Optic Communication Systems》, Fourth Edition, Govind P. Agrawal
2. 《Enabling Technologies for High Spectral-efficiency Coherent Optical Communication Networks》, Xiang Zhou (Google), Chongjin Xie (Alibaba Group)

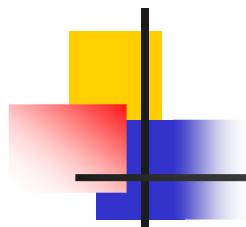
## 参考书：

1. 李玉权等译（[美] Gerd Keiser著）“光纤通信（第四版）”，电子工业出版社。
2. 《Fiber Optic Communications》, Fifth Edition, J.C. Palais, 电子工业出版社。
3. 《基于数字信号处理的相干光通信技术》，余建军、迟楠、陈林，人民邮电出版社



# 第一章 绪论

---



# 主要内容

---

- 光纤通信的历史
- 光纤通信的主要特征：优缺点
- 光纤通信系统的组成和分类
- 光纤通信的应用



# 什么是通信？

- 通信：互通信息，动物社会（群体）行为的主要表现形式（信息流）

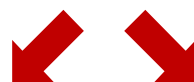
感官 “视”



载体 光波

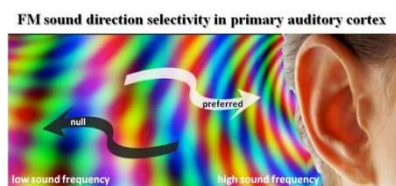


“听”



声波

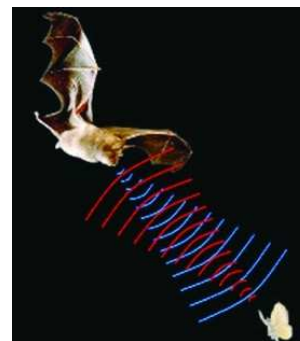
超声波



“闻”



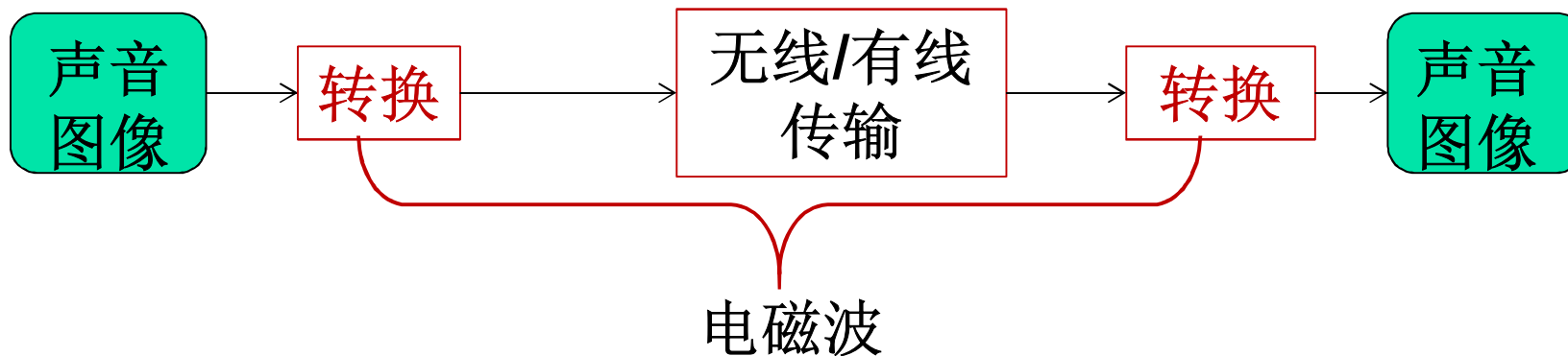
气味





# 电磁波通信

- 通信的革命：电磁波通信



- 通信的基本目标：实现更大容量、更远距离通信
- 通信系统：将信息从一处传到另一处的全部技术设备和信道（传输媒介）的总和。

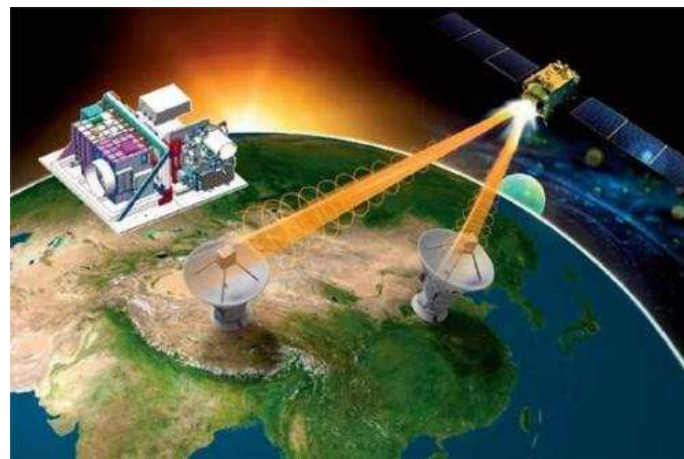
# 电磁波



麦克斯韦研究电磁波

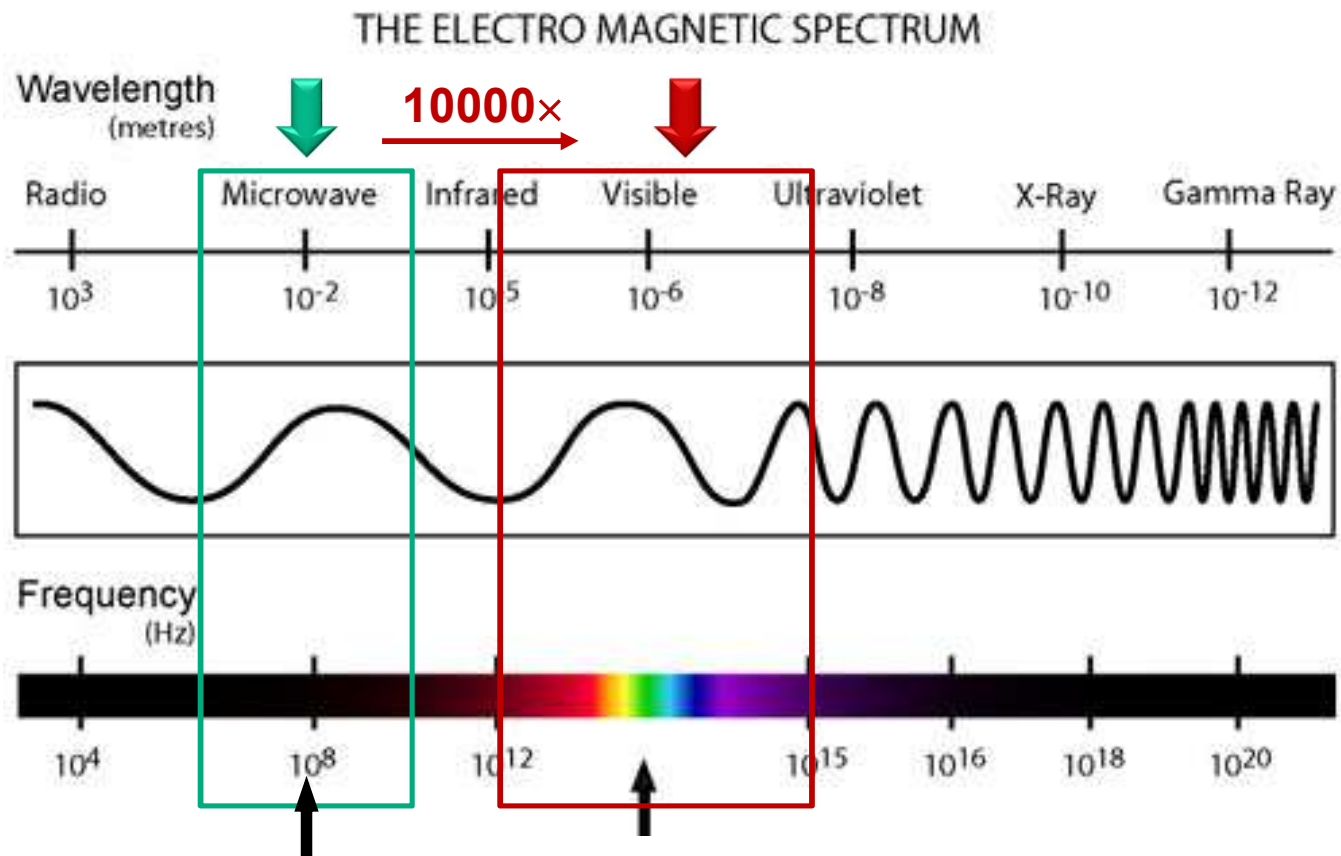


赫兹



- 交变电场产生交变磁场，交变磁场又激起交变电场，电场、磁场无限地交变产生，合称**电磁场**。
- 电磁场会在空间以波的形式由近及远地传播开去，这就是**电磁波**。

# 电磁频谱



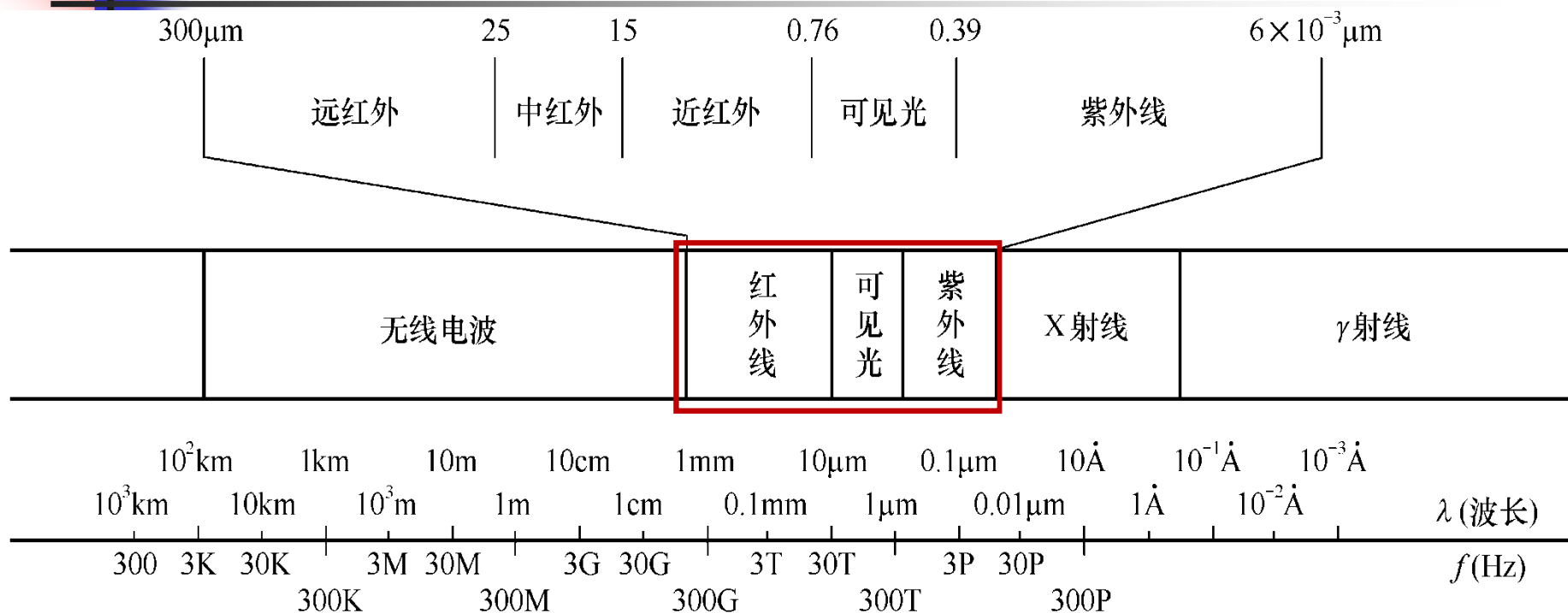
传输  
介质



电缆  
波导管  
自由空间

光纤  
自由空间

# 光波



- **光波**：波长范围在 $300 \mu\text{m} \sim 6 \text{ nm}$ （频率范围 $1 \text{ THz} \sim 50 \text{ PHz}$ ）的电磁波，包括红外线、可见光、紫外线。



# 传统通信频率范围

---

- 广播电台频率范围

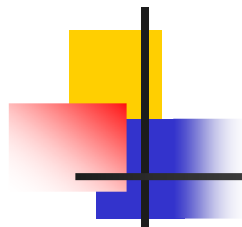
- ✓ 调频：88-108MHz
- ✓ 中波：535-1605KHz
- ✓ 短波：2.3-27.75

- 有线电视频率范围

- 470—806MHz

- 移动电话频率范围

- GSM900M: 890MHz—915MHz(上行)  
935MHz—960MHz(下行)
- CDMA800M: 825MHz—835MHz(上行)  
870MHz—880MHz(下行)
- DCS1800M: 1850MHz—1910MHz(上行)  
1930MHz—1990MHz(下行)
- PCS1900M: 1850MHz—1910MHz(上行)  
1930MHz—1990MHz(下行)



# 通信用光波范围

ITU-T组织将光纤通信系统光波段划分为O、E、S、C、L、U6个波段

频带	窗口	波长 (nm)	频率 (THz)
	1	850 (770-910)	
O带 (Original band) 原始波段	2	1260-1360	237.9-220.4
E带 (Extended band) 扩展波段	5	1360-1460	220.4-205.3
S带 (Short wavelength band) 短波长波段		1460-1530	205.3-195.9
C带 (Conventional band) 常规波段	3	1530-1565	195.9-191.6
L带 (Longer wavelength band) 长波长波段	4	1565-1625	191.6-184.5
U带 (Ultralength wavelength band) 超长波长波段		1625-1675	184.5-179.0

常用通信光载波频率~193 THz (1.55  $\mu\text{m}$ )

传输介质带宽:  $\sim f_c/(8\sim 10)$ , 频率越高, 可载信息容量越大



# 各种单位的换算公式

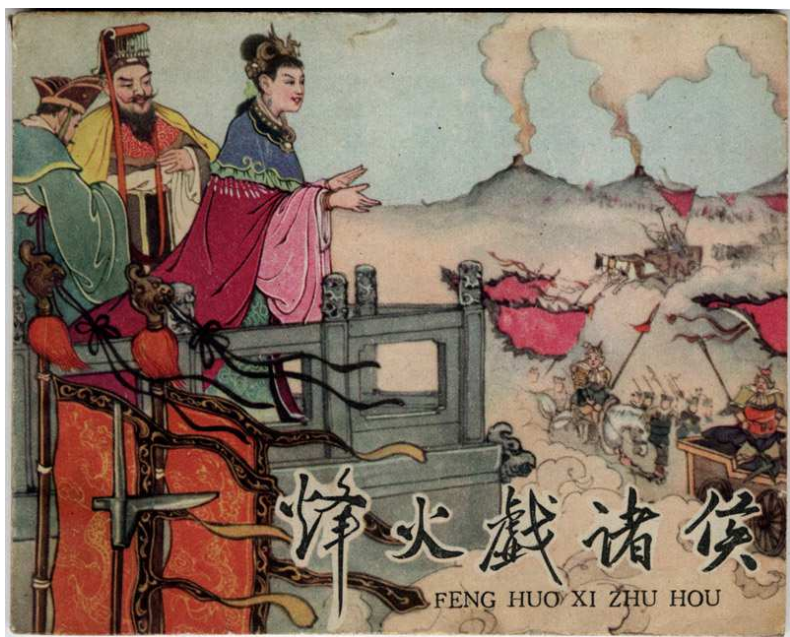
$$\lambda = c/f \quad c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

1MHz (兆赫) = $10^6$ Hz	1GHz (吉赫) = $10^9$ Hz
1THz (太赫) = $10^{12}$ Hz	1PHz (拍赫) = $10^{15}$ Hz
1 um (微米) = $10^{-6}$ m	1 nm (纳米) = $10^{-9}$ m
1Å (埃) = $10^{-10}$ m	



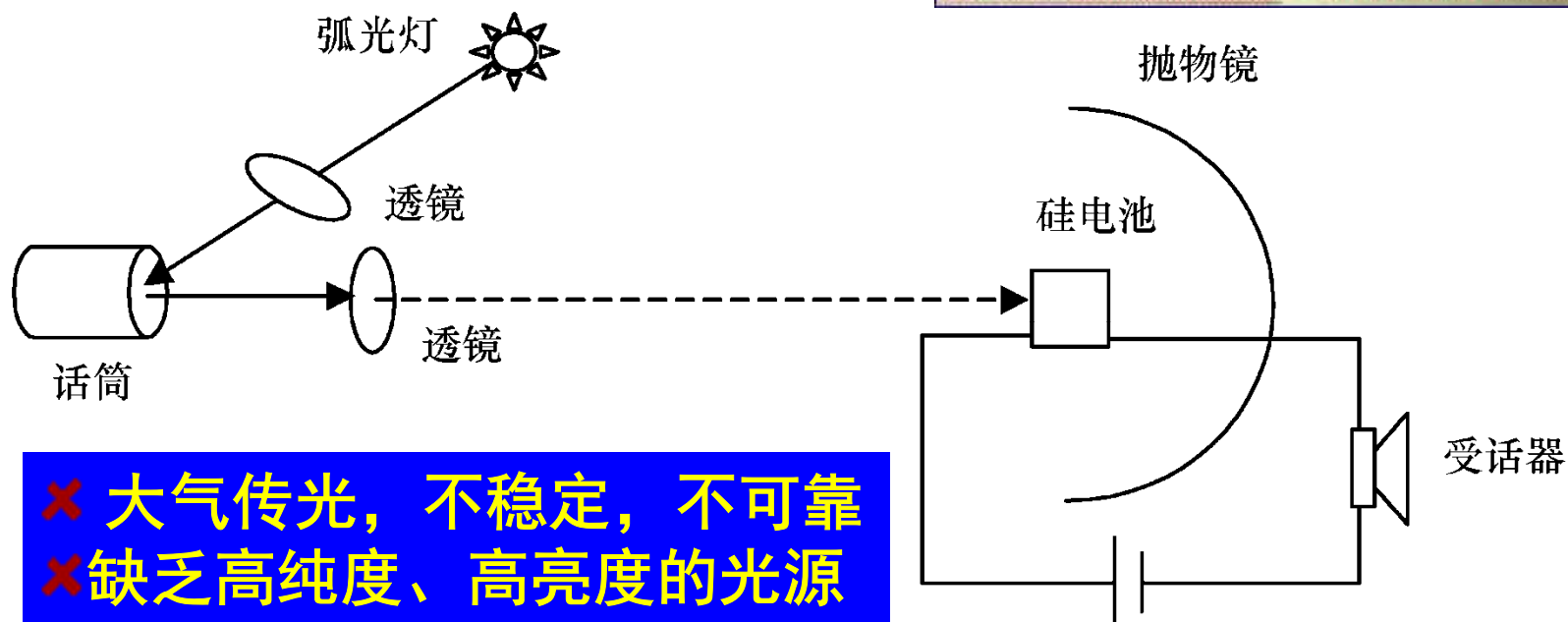
# 用光传送信息：烽火台

- 公元前 11 世纪，西周王朝，烽火台  
白天点狼粪，晚上燃柴火——“狼烟四起”



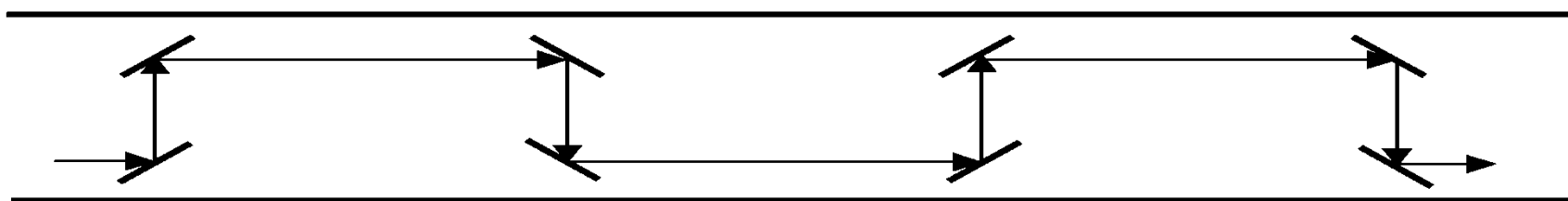
# 用光通信雏形：光电话

**1880年**，贝尔发明光电话，并注册了“光话”专利，通话距离**213米**

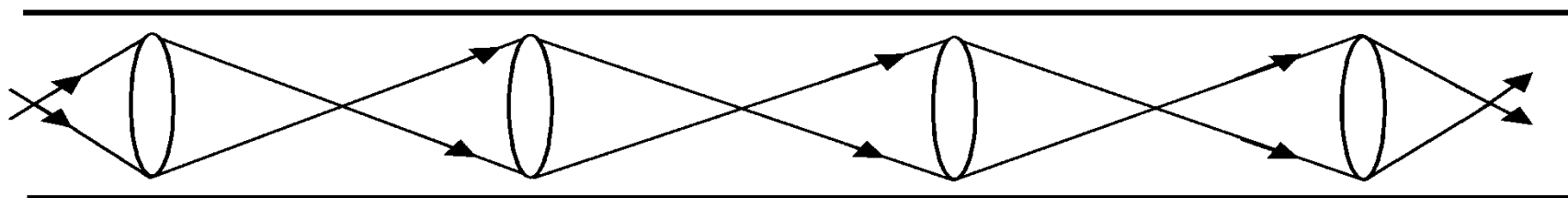


## 光通信“转入地下”：透镜光波导

为克服大气光通信的不稳定、不可靠问题，出现地下光波通信的实验，先后出现过反射波导和透镜波导等地下通信的实验。



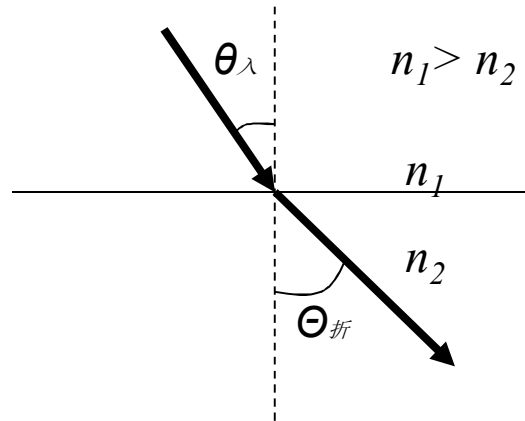
(a) 反射镜波导



(b) 透镜波导

# 新思路：介质导光

- 17世纪：Snell定律
- 19世纪：
  - 1841年D. Colladon、  
1854年J. Tyndall演示光  
在喷出的水流中的导引  
过程
  - 1889年：照明喷泉用于  
庆祝法国大革命胜利一  
百周年的巴黎万国博览  
会娱乐演出



# 光纤雏形：纤维导光

## ■ 始于19世纪20年代

### ➤ 玻璃纤维束传像/照明：

- ✓ 医学：胃镜/牙科手术
- ✓ 军事：可弯曲望远镜

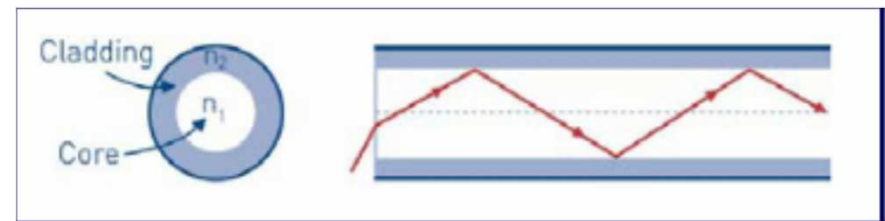
### ➤ 裸玻璃纤维束的缺点：

- ✓ 传光效率低
- ✓ 光纤彼此接触或表面划痕时泄露严重

## ■ 50年代及以后的突破

### ➤ 引入外包层

### ➤ 60年代，包层+光纤束 →用于胃镜的工业生产





# 光纤损耗问题

- 当时的光学玻璃的损耗 $\sim 1000\text{dB/km}$ 
  - 如要在1km长的光纤末端检测到一个波长为 $1\mu\text{m}$ 的光子（能量 $\sim 2 \times 10^{-19}\text{J}$ ），在其始端应输入的能量为 $2 \times 10^{81}\text{J}$ ，远远超过太阳系形成以来全部辐射能量的总和，太阳系每年辐射的总能量（不是地球接受的能量） $1.2 \times 10^{34}\text{J}$ ！
- $20\text{dB/km}$ 是能够用于传输信息的最起码要求， $1000\text{dB/km} \rightarrow 20\text{dB/km}$ ，改进 $10^8$ 倍
- 完全不知道能否解决损耗问题，完全不是当时的研究热点

# 光纤面临困境

- 直到50年代，只有很少科学家觉得光通信切实可行。
- 为提高传输容量，通信研究集中于毫米波段的波导（如金属圆波导管）
  - 1933年，Schelkunoff [Bell Lab]和Mead [AT&T]同时预测出金属波导管中 $TE_{01}$ 模的衰减 $\propto f^{-3/2}$
  - 60年代中期， $TE_{01}$ 模波导系统工作进入实验室开发阶段，目的是建立一个足够长的波导传输系统，以便对其实用性作最后评价



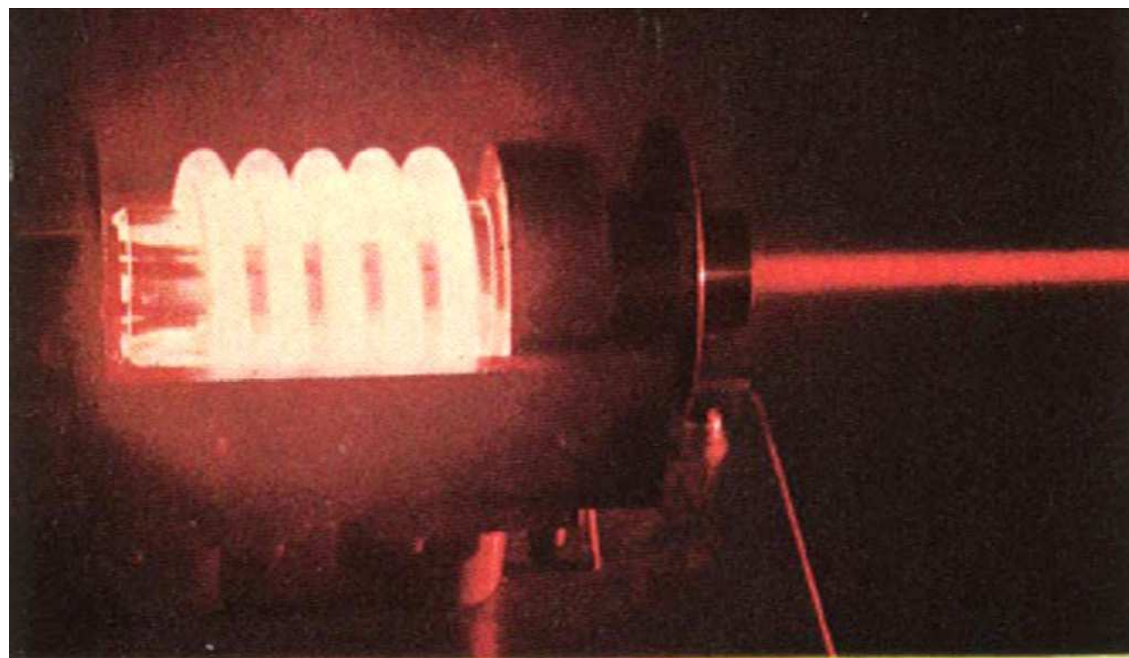
S.A.Schelkunoff



# 激光：给光通信以巨大动力



Theodore Maiman



■1960梅曼发明激光器：亮度高、谱线窄、方向性好→单频相干光源，具有巨大带宽，给光通信以巨大动力。

# “通信光纤之父” 高琨

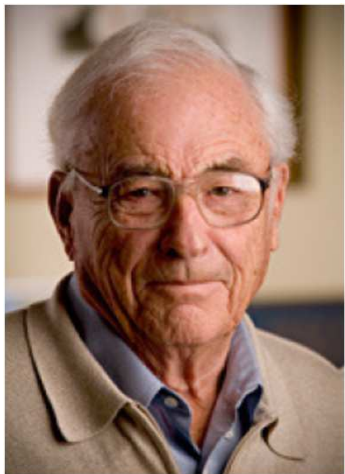
## 2009年诺贝尔物理奖



Charles K. Kao

“for **groundbreaking** achievements concerning the transmission of light in fibers for optical communication”

有关光在**通信用光纤**中传输的**奠基性**成就



Willard S. Boyle & George E. Smith

"for the invention of an imaging semiconductor circuit – the CCD sensor"

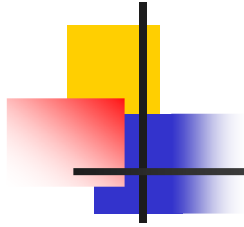
# 高锟的工作

- 1960年高锟转入英国Harlow的标准电信实验室（STL）
- 1964年，成为STL通信组负责人，并开始研究光纤



“由于大家都认为信息爆炸正在来临，传输系统的带宽必须越来越大，所以我要寻找更好的通信技术”

- 1965年，在光纤的损耗方面，取得了很多实验数据，对光纤损耗机制有了真正了解



# Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies

K.C. Kao and G.A. Hockham

*Indexing terms:* Optical fibres, Waveguides

**Abstract:** 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.

## List of principle symbols

$J_n$  =  $n$ th-order Bessel function of the first kind

$K_n$  =  $n$ th-order modified Bessel function of the second

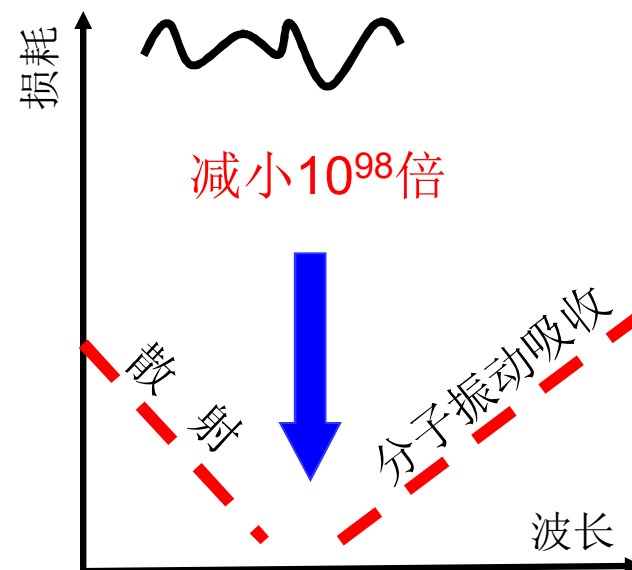
## 2 Dielectric-fibre waveguide

The dielectric fibre with a circular cross-section can support a family of  $H_{0m}$  and  $E_{0m}$  modes and a family of

- 1966年, 发表论文K. C. Kao & G. A. Hockham, Proceedings IEE, 113, 1151–1158, 1966

# 奠基性成果

- 该论文提出了用石英光纤实现光传输的可行性
- 该论文指出：
  - 石英光纤中的损耗主要来自散射（短波长）和分子振动吸收（长波长），其间必有低损“谷”
  - 羟基（ $\text{HO}^-$ ）吸收在短波段的影响
  - 降低杂质 $\text{Fe}^{++}$ 至 $<1\text{ppm}$ ，预期损耗可 $<20\text{dB/km}$
- 该论文指出：光纤的结构设计原则是由较低折射率材料包围的细芯单模传输

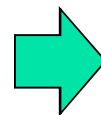




# 奠基性成果

- 论文科学地预言：高纯石英光纤具有作为新型通信介质的潜力。与目前的同轴电缆和无线系统相比，它具有更大的信息容量，**且可能在基础材料成本上有优越性。**

“for **groundbreaking** achievements concerning the transmission of light in fibers for optical communication”





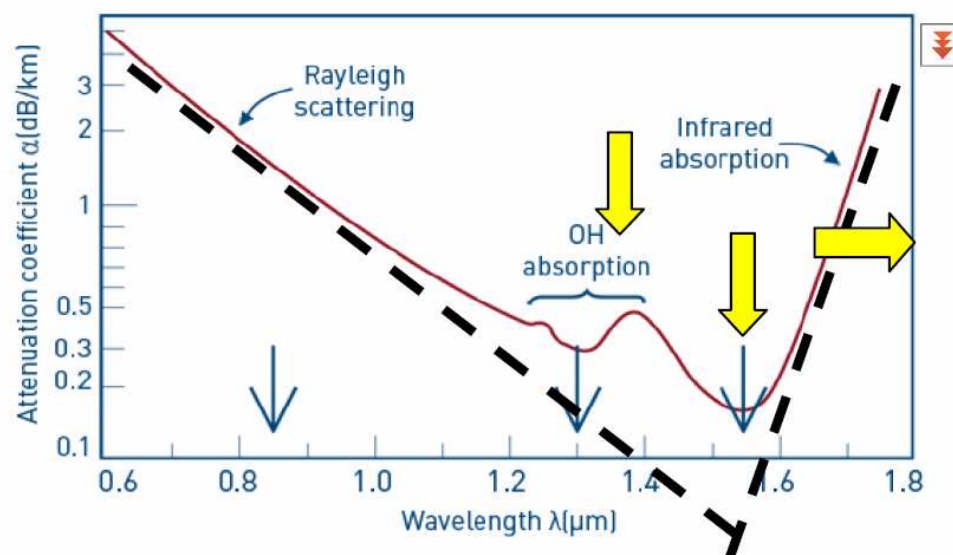
# 高锟精神

- 当高锟从事这一奠基性工作时，受到巨大压力，人们（包括 **Bell Lab**）对他的想法大多不相信。 **A lot of people just openly laughed at the(1966) paper – J Midwinter[10]**
- 顶住压力、锲而不舍，继续努力，**“把事情做得更好”**
  - 实现体块扩散石英的损耗为4dB/km，成为超级透明玻璃的首个证据，使**Bell Lab**认真考虑。
- 高锟拜访了包括**Bell Lab**的多家研究机构，甚至玻璃工厂，与工程师、科学家、商业人士等商讨光纤的制作技术和改进，从而对光通信的商业实现起到关键作用
- 在高锟激发下，在全球范围内开展了以制作低损耗光纤为目的努力，**这种努力一直到今天还没有停止，超低损耗光纤**



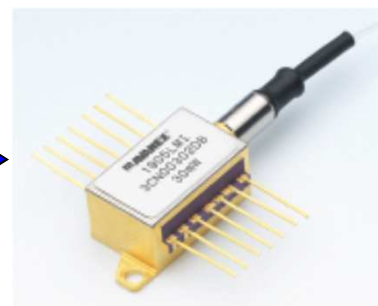
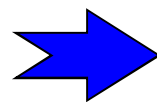
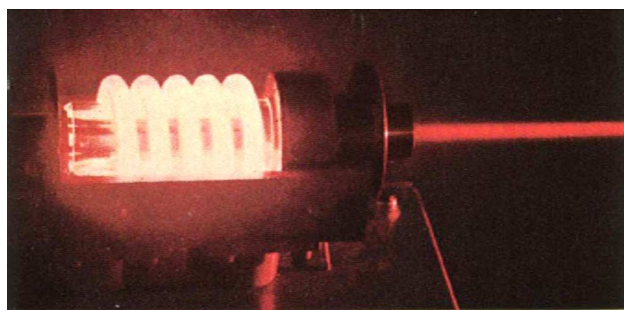
# 低损耗石英光纤

- 1974: Southampton报道磷硅玻璃光纤, 损耗**2.4dB/km**
- 1976: NTT Ibaraki Lab and Osanai (Fujikura Cable)制成长波长低损耗光纤, 损耗为**0.47dB/km@1.2 $\mu$ m**, 还开辟了第三窗口 (**1.55  $\mu$ m**)
- 1978: NTT 制成低损单模光纤: **0.2dB/km @1.55  $\mu$ m**.
- 1986: Yamada实现:  
**0.154dB/km@1.55 $\mu$ m**
- 2002: Nagayama等报道目前最低值:  
**0.151dB/km@1.55 $\mu$ m**
- 目前工业生产水平:  
**~0.168dB/km @1.55  $\mu$ m**.  
(长飞光纤光缆公司)



# 激光器发展

- 1960年，梅曼在Hughes Res Labs演示第一台激光器
- 1970年，Bell Lab、NEC和前苏联演示室温连续运转的**半导体激光器(LD)**，但寿命只有几个小时
- 1973 年，Bell Lab的LD寿命达到1000hr
- 1976年，日本电报电话公司制成InGaAsP LD（波长1.3  $\mu\text{m}$ ，寿命1500hr）
- 1977 年， Bell Lab宣布LD外推寿命达到 $10^6\text{hr}$ （百年）



由于**光纤和半导体激光器**的技术进步，使 1970 年成为光纤通信发展的一个重要里程碑（元年）。



# 光纤通信系统的发展

---

1976年美国亚特兰大进行世界上第一个实用光纤通信系统的现场试验

1976年日本34 Mb/s的阶跃多模光纤通信系统试验

1978年日本100 Mb/s的渐变型多模光纤通信系统试验

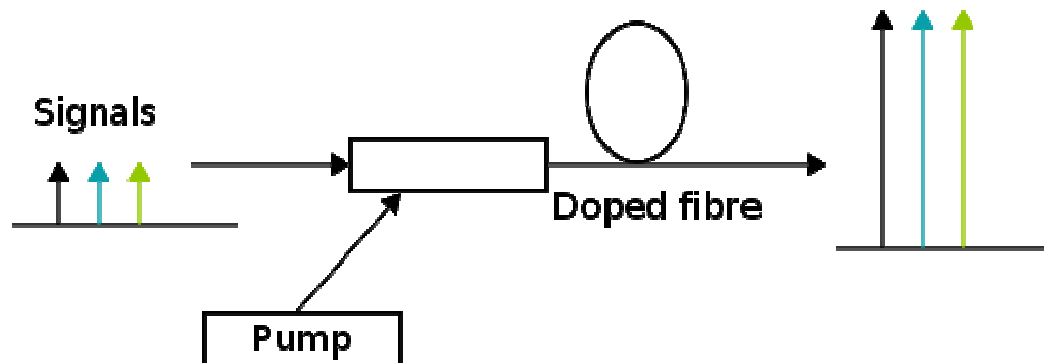
1980年美国标准化FT - 3光纤通信系统投入商业应用

1983年日本敷设了纵贯南北的光缆长途干线

1988年美日英法建成第一条横跨大西洋海底光缆通信系统

1989年建成第一条横跨太平洋海底光缆通信系统

# 掺铒光纤放大器-EFDA



Professor Sir David Payne  
英国南安普顿大学光子研究中心

# 光波分复用系统奠基人—厉鼎毅

- 美国光学学会会员，美国电子电气工程师学会会员，美国先进科学协会会员，中美光学学会会员，国际工程师协会会员。他还是美国国家工程院院士，台湾中央研究院院士，中国工程院外籍院士。
- 现代光波分复用系统的发起者和奠基人，从1990年起，他主持基于光放大器的波分复用传输系统的研究工作。他是世界上第一个提出并倡导这项技术的人，该技术使长距离电信网的价格大为降低并可大规模升级传输容量，引领了光通信领域的一场技术革命。



1931-2012

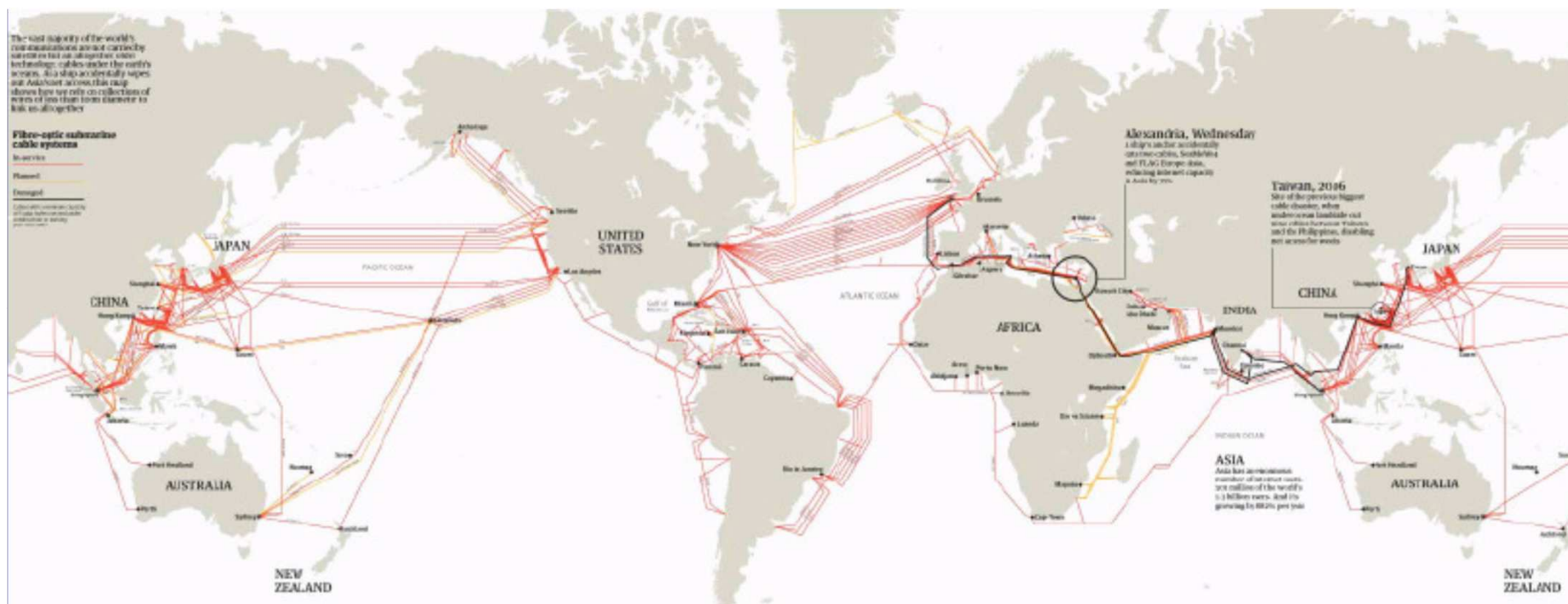
# 当今世界的光纤通信系统

## ■容量：

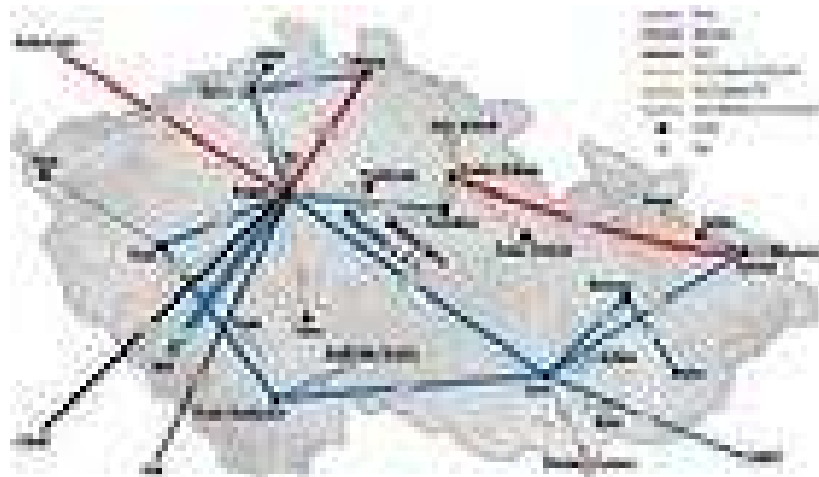
- 总和：7.1Tb/s
- 已售：5.7Tb/s (80%)
  - ✓ 已用：2.1Tb/s (37%)

## ■已用容量：

- 因特网：72%
- 企业私网：27%



# 暗光纤网络



**暗光纤**指的是已经铺设但是没有投入使用的光缆。很多时候通信公司会铺设多余其需求的光纤数量，以适应将来的需要而避免反复的光纤铺设带来的高额成本。

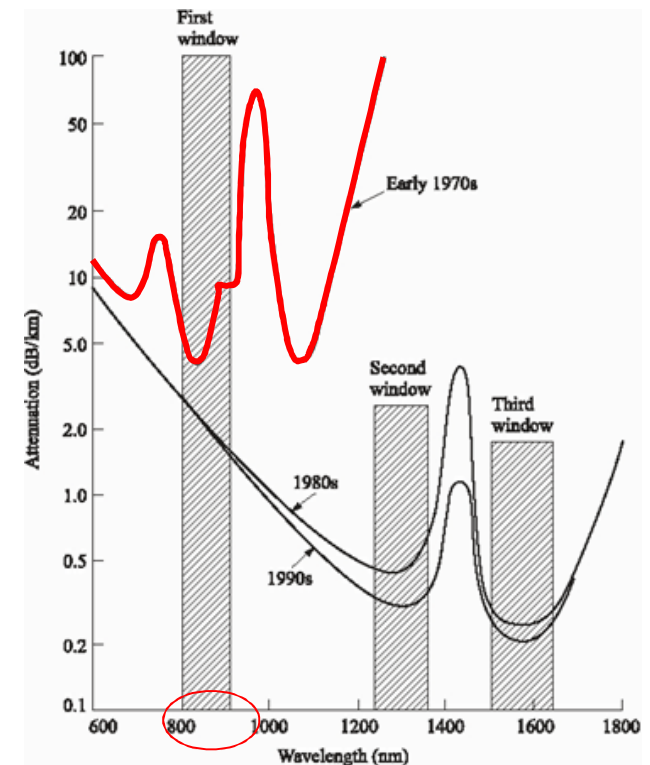
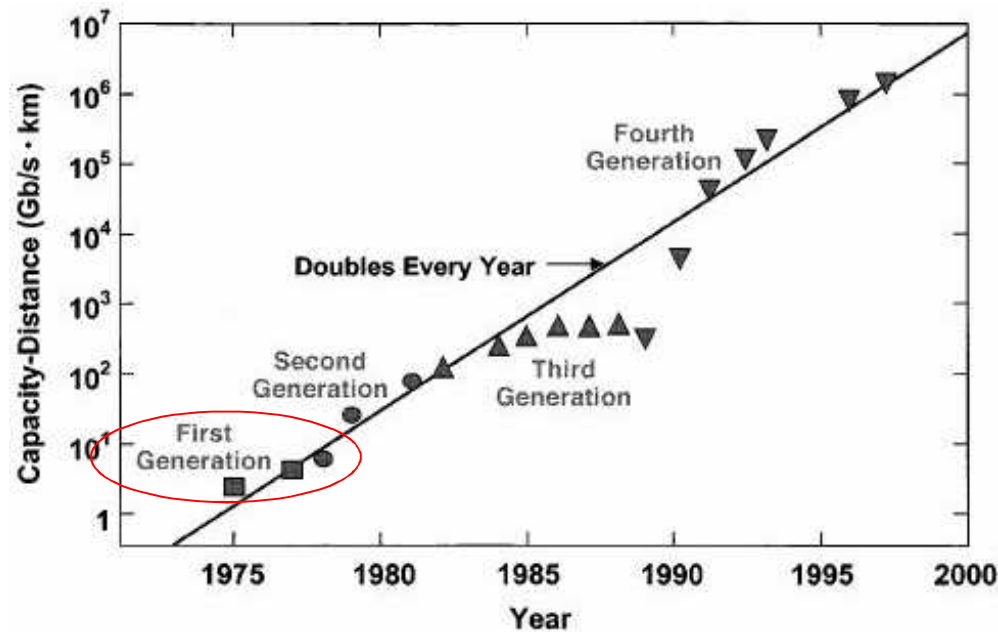
**暗光纤**可能被租用给个人或者其他公司（例如**Google**或**BAT**企业），用于在他们自己的场所之间建立光连接。在这种情况下，光纤既不受电信公司控制也没有连接到电信公司，而是由公司或者个人提供必要的设备使得其正常运作。



# 五个发展阶段：从基础研究到商业应用

## 第一代：1966~1979

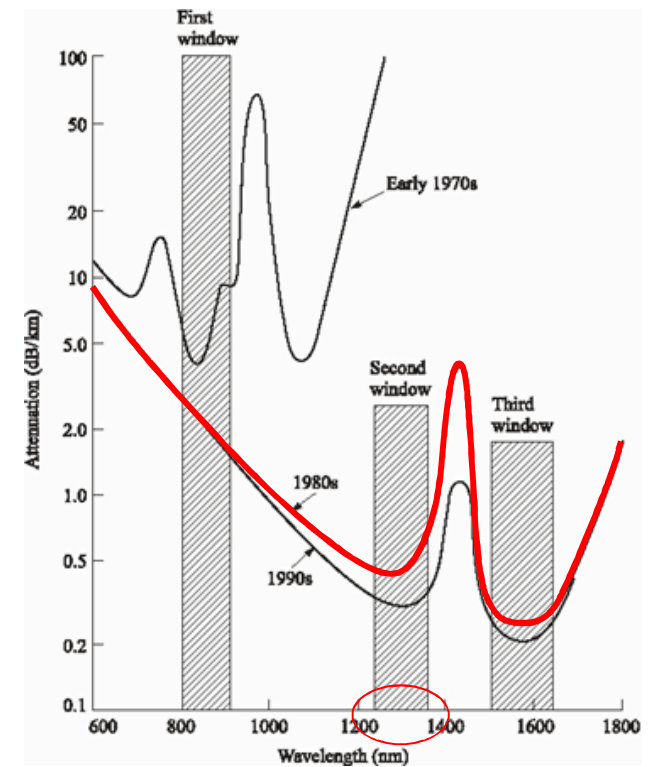
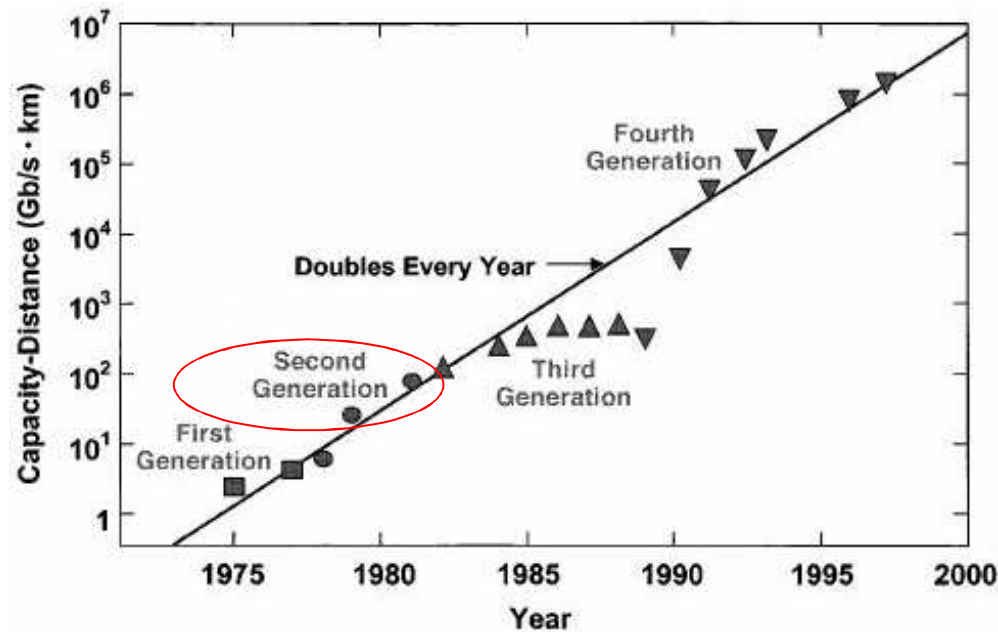
激光器(GaAs), 波长 $0.8\mu\text{m}$ , 多模光纤, 最大中继距离10km (当时的同轴电缆系统中继距离为1km), 比特率为10~100Mb/s。多模色散和损耗是限制中继距离的关键。



# 五个发展阶段：减小光纤色散

## 第二代：上世纪80年代早期

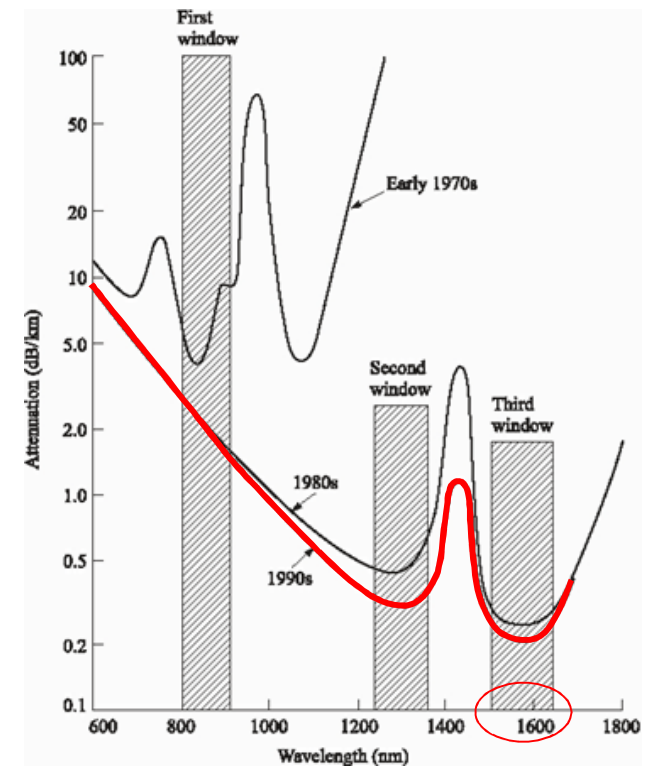
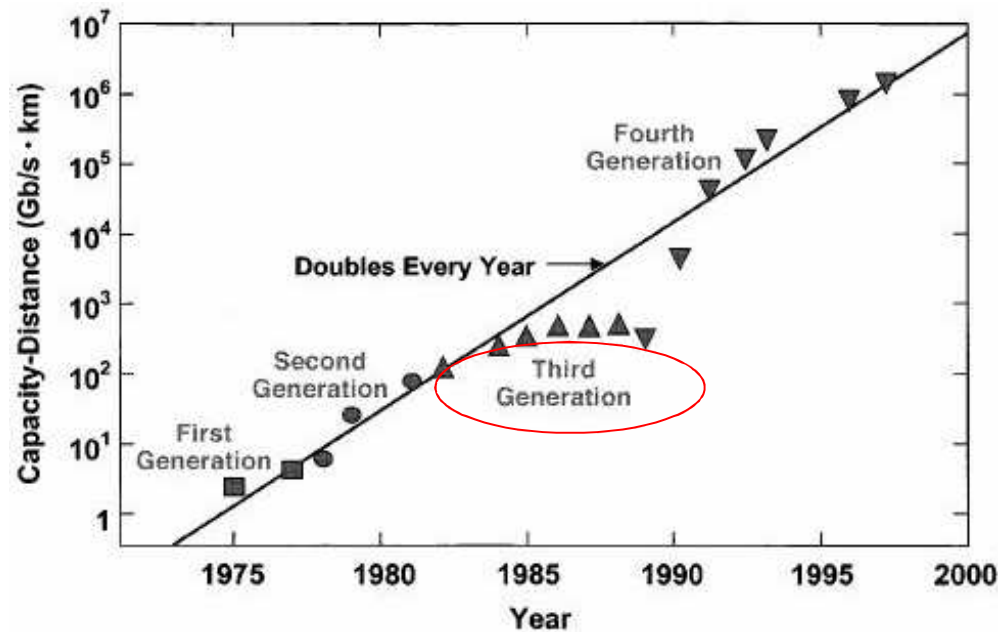
激光器(InGaAs), 波长 $1.3\mu\text{m}$ , 单模光纤, 最大中继距离50km, 比特率为2.0Gb/s。光纤的损耗( $\sim 0.5\text{ dB/km}$ )限制了中继距离。



# 五个发展阶段：降低损耗

## 第三代：上世纪80年代后期初90年代初

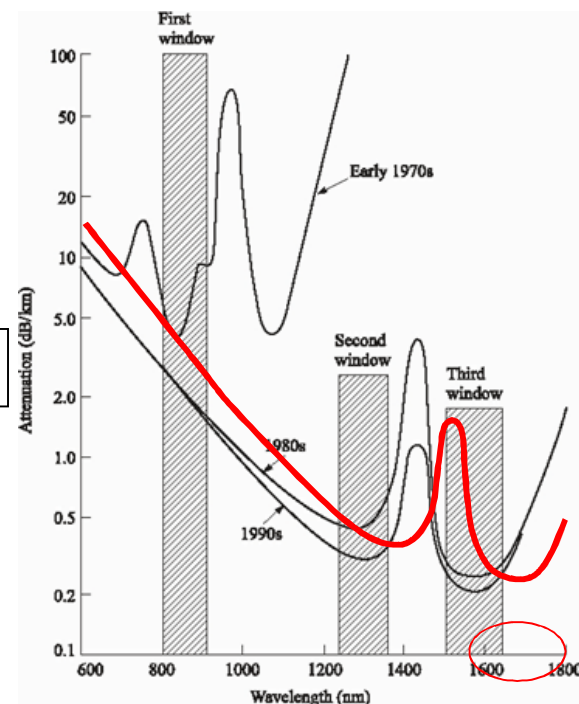
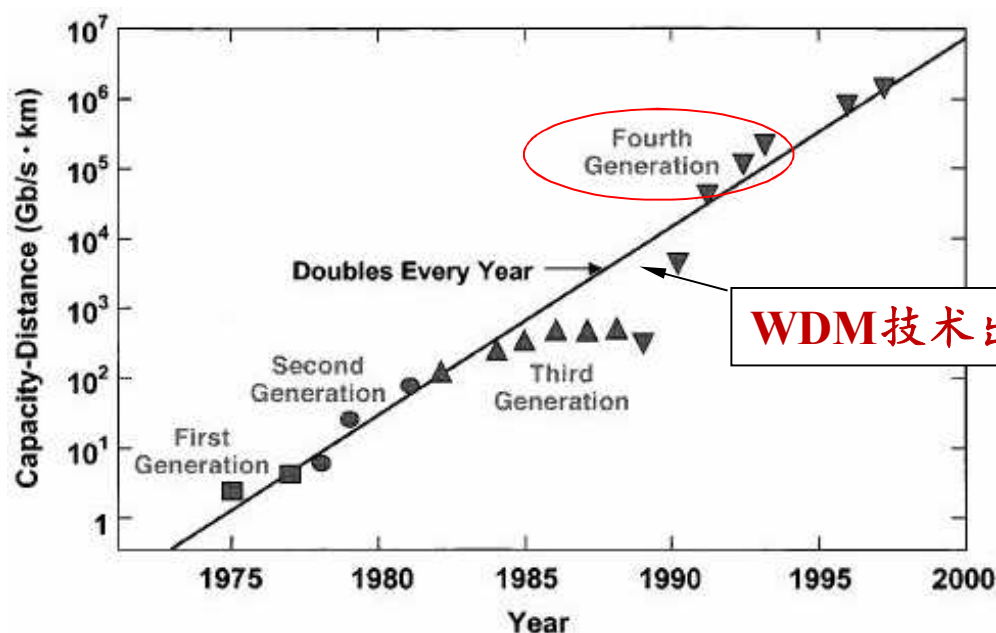
激光器 (InGaAsP) 波长  $1.55\mu\text{m}$ ，单模 (色散位移) 光纤，比特率为  $2.5\sim 10\text{Gb/s}$ ，最大中继距离  $100\text{km}$ 。这个阶段的缺点是采用电的方式中继。



# 五个发展阶段：引入WDM和光放大（EDFA）

## 第四代：上世纪90年代之后

激光器(InGaAsP)波长 $1.55\mu\text{m}$ ，单模光纤，采用波分复用技术和光放大技术，单波长信道比特率为 $2.5\sim 10\text{Gb/s}$ ，传输距离 $14000\text{ km}$ ，并提出光通信智能化的概念



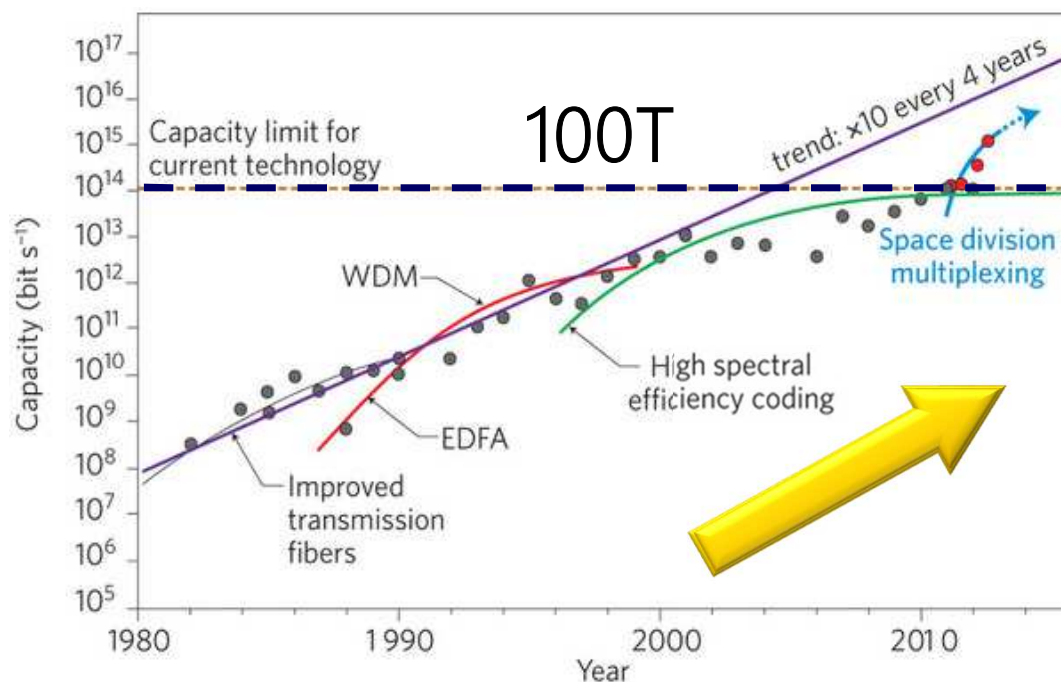
✌️ 铜线作为长途通信媒质开始推出历史舞台（光进铜退）

✌️ “EDFA+WDM”成为现代光纤通信的标志性技术

# 五个发展阶段：先进光调制/相干检测技术

## 第五代：2000年之后

先进光调制技术、多维光信息处理技术、数字相干检测技术、数字信号处理技术



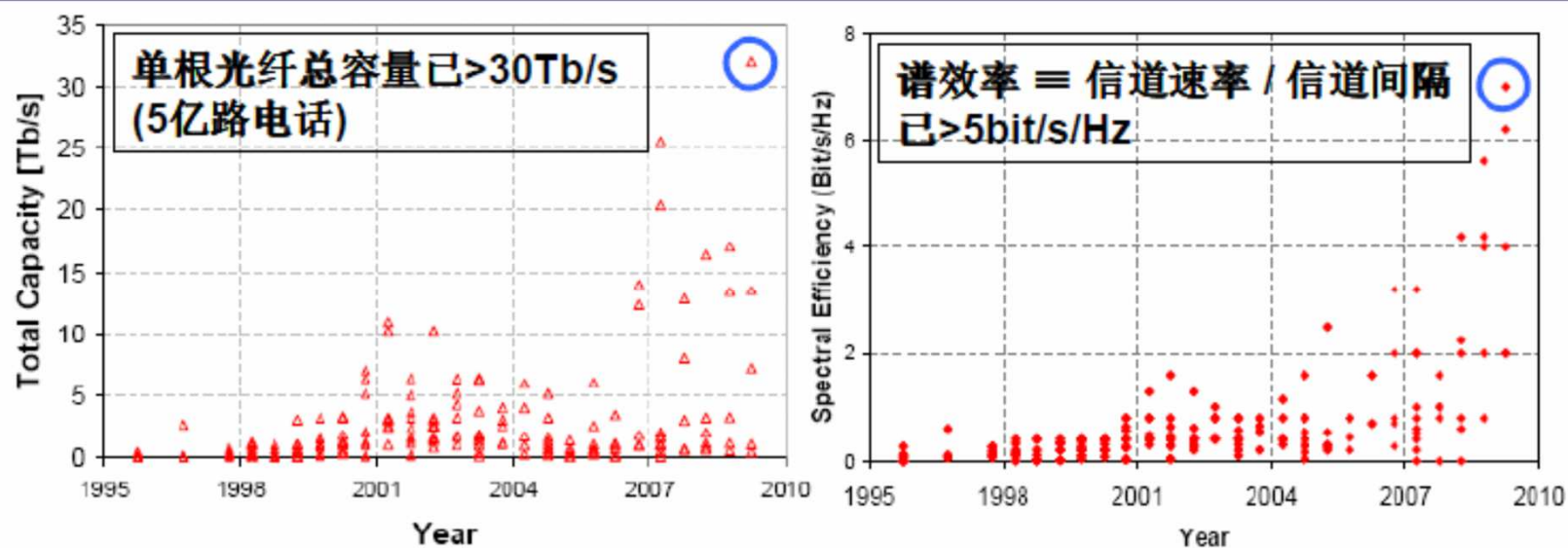
**1T → 10T → 100T → 1000T?**

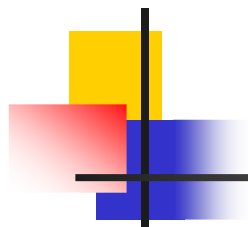
**1T =  $10^{12}$  bps**



# 陆地光纤通信英雄实验

- 容量·距离积已达 $111.6\text{Pb/s}\cdot\text{km}$  [Bell Labs, A-L, ECOC '09, PD2.5]
  - 纯硅芯光纤（低损耗）
- 谱效率·距离积已达 $27\text{Mm}\cdot\text{b/s/Hz}$  [Bell Labs, A-L, ECOC '09, PD2.6]– 超大有效面积光纤（低非线性）





# 主要内容

---

- 光纤通信的历史
- 光纤通信的主要特征：优缺点
- 光纤通信系统的组成和分类
- 光纤通信的应用



# 大容量

马路越宽，容许通过的车辆越多，交通运输能力也越大。  
如果把通信线路比作马路，那么应该说是通信线路的频带越宽，容许传输的信息越多，通信容量就越大。



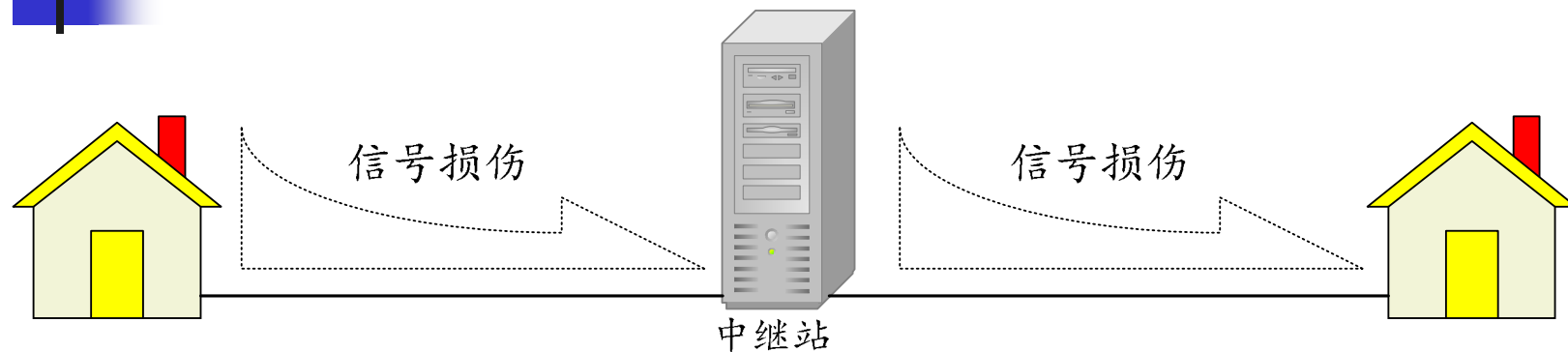
几种主要传输方式的容量比较

传输方式	可传输的话路数
对称电缆	1 ~ 3000
无线电微波	5000 ~ 2.2 万
同轴电缆	1000 ~ 5.2 万
毫米波波导	30 万
光缆	100 万 ~ 1000 万以上



目前的单根光纤容量已经达到十多个Tb/s

# 损耗低、中继距离长



- 传输损耗大，需要中继（放大）站多，成本高、维护不方便、运行不可靠
- 石英光纤的损耗仅为 $0.18 \text{ dB/km}@1.55 \mu\text{m}$ ，中继距离远。

例： 同轴电缆通信的中继距离只有几公里  
最长的微波通信是50公里左右

光纤通信系统的光中继（光放大）距离可以达到上万公里



# 抗干扰能力强

## 现有的电通信系统抗干扰能力不足：

例1：电话线和电缆不能跟高压电线平行架设，也不能在电气铁化路附近铺设

例2：据专家测算，如果在美国本土中心上空 463 公里处爆炸一颗原子弹，1 秒钟内即可使全美所有的电缆通信系统失效，但光纤通信线路却能基本不受影响

## 光纤为什么具有强抗干扰能力？

1. 光纤属绝缘体，不怕雷电和高压
2. 电磁源干扰不了频率比它们高得多的光
3. 杰出的抗核辐射能力



# 保密性强

---

## 电通信方式很容易被人窃听

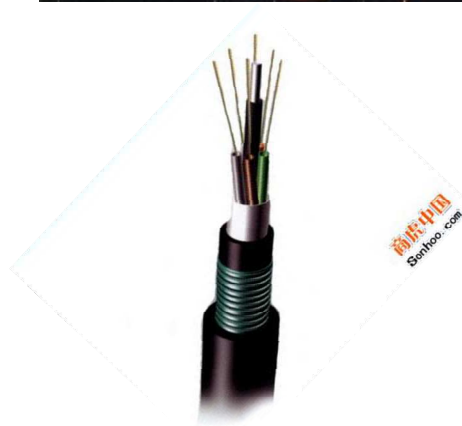
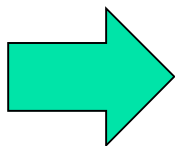
1. 电缆通信：只要在电缆附近 (甚至几公里以外) 设置一个特别的接收装置，就可以获取传送的信息
2. 无线通信方式：无线电波在大气中传播，甚至充斥全球，很容易被人窃听
3. 密码学的发展使加密往往也无济于事

## 光纤通信是保密性能最好的通信方式之一

- 光在光纤中传输时不会跑出光纤和向外辐射电磁波
- 即使在拐弯很厉害的地方，漏出包层的光微乎其微

# 体积小、重量轻

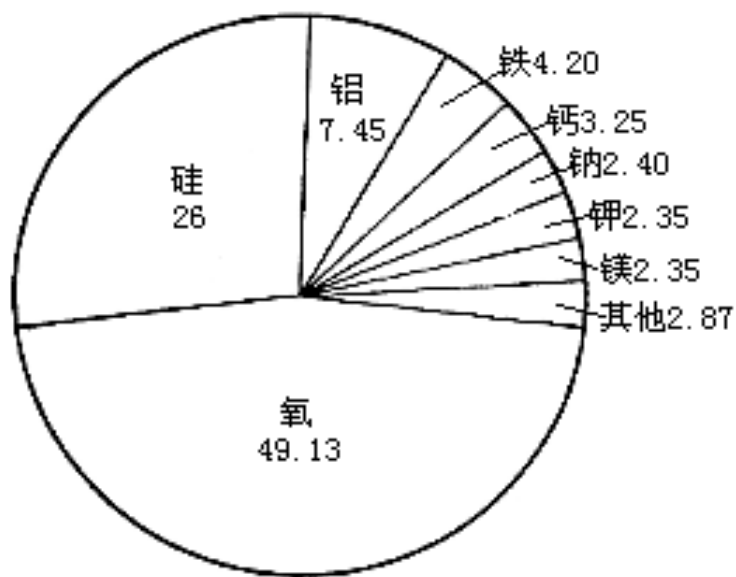
- 1千克高纯度石英玻璃 → 成千上万公里光纤
- 120吨铜和 500 吨铅 → 1000公里的 8 管同轴电缆
- 18管同轴电缆每米重11千克
- 同等容量的光缆每米重90克
- 柔软易弯曲、铺设非常方便



# 光纤的原材料取之不竭

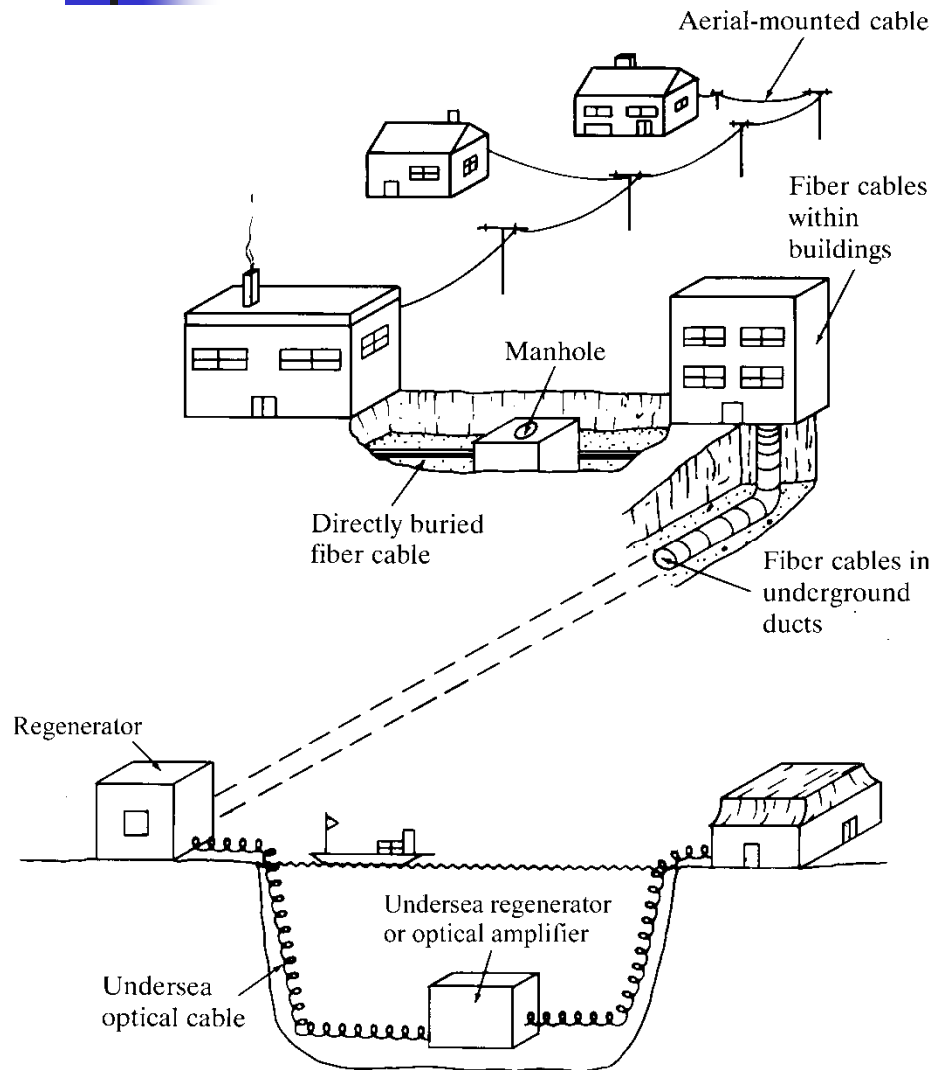
电线主材：铜、铅等有色金属只够使用50年左右

光纤主材：普通的石英砂( $\text{SiO}_2$ )在地壳的化学成分中占了一半以上，取之不尽、用之不竭



地壳中主要元素含量百分比图

# 其它优点



- 不怕腐蚀
- 耐高低温能力较强 (-65~200度)
- 可实现多功能传输 (同时传递语音、数据、图像等信息)



## 缺点

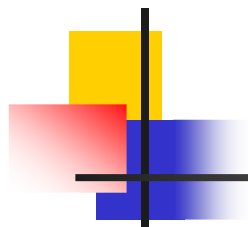
1. 容易折断 (比如经常被挖断)
2. 光纤怕弯曲 (导致损耗增加)
3. 光纤连接困难 (断面是否垂直、焊接点是否有气泡)  
(需要专门设备、专业人员操作)



4. 光纤通信过程中怕水、怕冰 (**OH**-根吸收增大损耗)

案例：新疆某地区大雪导致光纤故障 (2006年10月)

原因：光缆没有防护好被冰雪包裹，并由于冰雪压力和热胀冷缩导致光纤弯曲



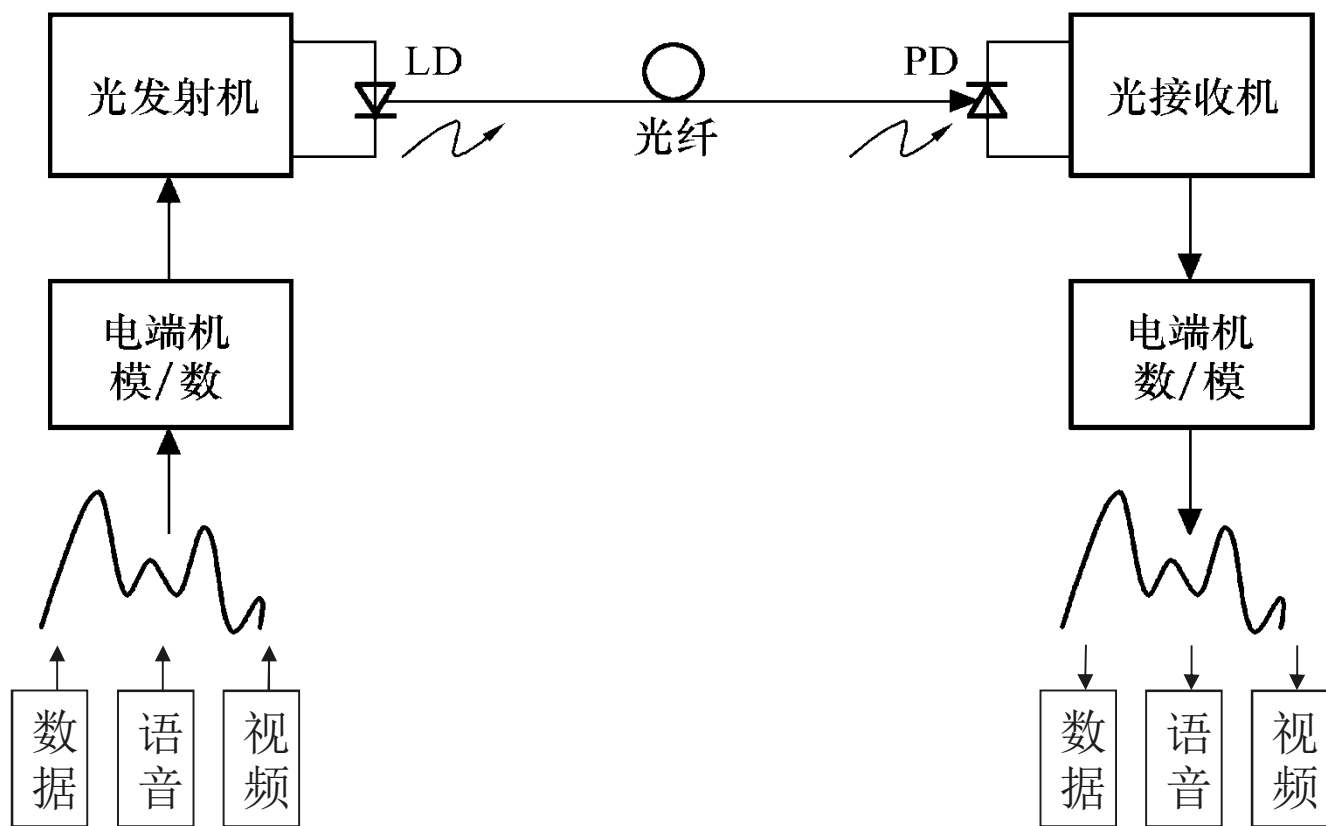
# 主要内容

---

- 光纤通信的历史
- 光纤通信的主要特征：优缺点
- 光纤通信系统的组成和分类
- 光纤通信的应用

# 光纤通信系统的组成

光纤通信系统主要由光发送机、光纤光缆、中继器和光接收机组成。





# 关键部件

---

- **光发送机**:将电信号转换为光信号,并将生成的光信号注入光纤。光发送机一般由驱动电路、光源和调制器构成,如果是直接强度调制可以省去调制器。
- **光接收机**:将光纤送来的光信号还原成原始的电信号。它一般由光电检测器和解调器组成,对于直接强度调制解调器可以省略。
- **光纤**:光信号的传送媒介(信道),将光信号由一处送到另一处。
- **中继器**:分为电中继器和光中继器(光放大器)两种,用于延长光信号的传输距离。



# 分类

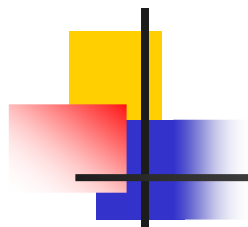
---

根据调制信号的类型： 模拟光纤通信系统  
数字光纤通信系统

根据光源的调制方式： 直接调制系统  
间接调制系统

根据光纤的传导模数量： 多模光纤通信系统  
单模光纤通信系统

根据系统的工作波长： 短波长光纤通信系统  
长波长光纤通信系统  
超长波长光纤通信系统

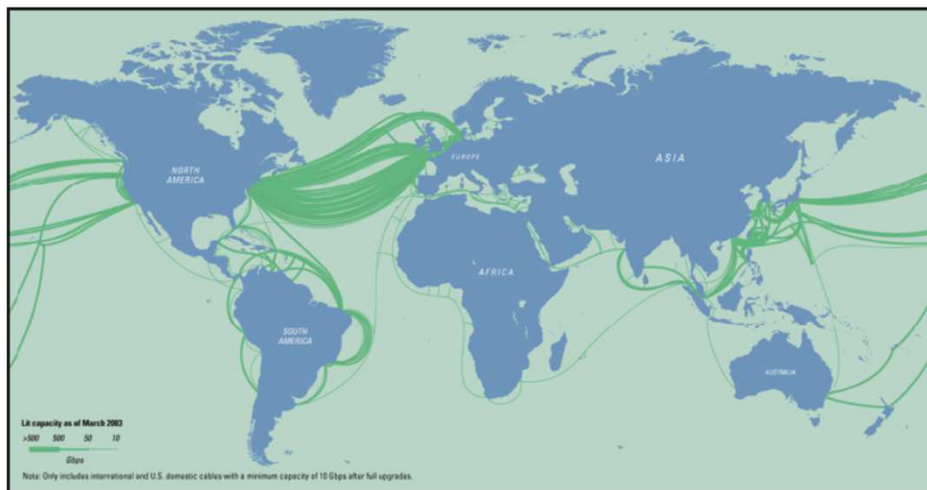


# 主要内容

---

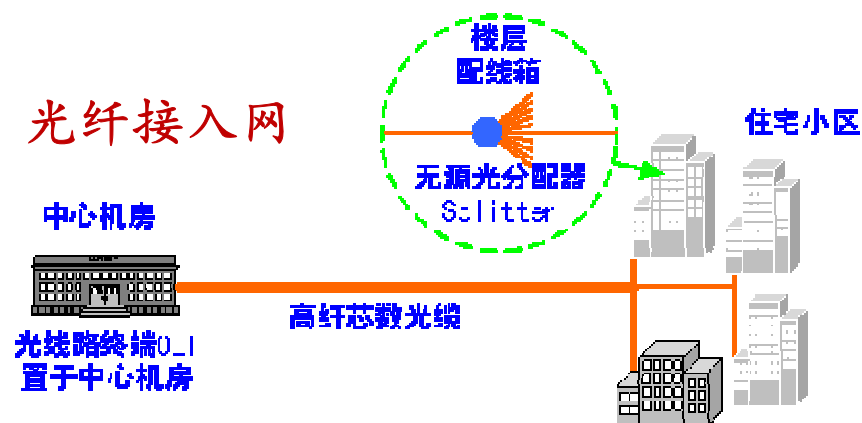
- 光纤通信的历史
- 光纤通信的主要特征：优缺点
- 光纤通信系统的组成和分类
- 光纤通信的应用

# 现代通信的基础设施

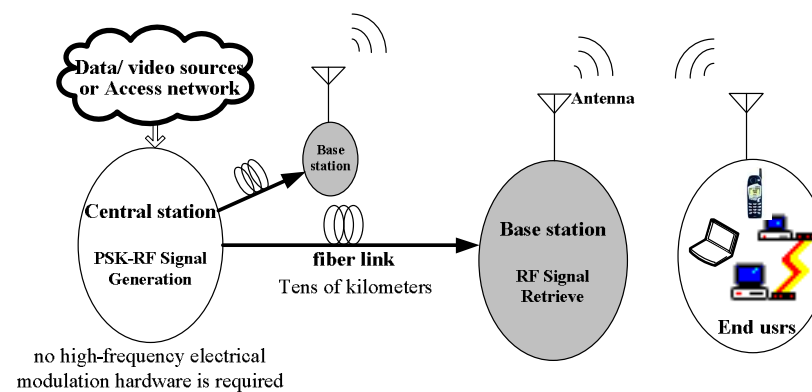


海底光缆及洲际通信网

## 光纤接入网



## 公用电信网： 核心网、城域网

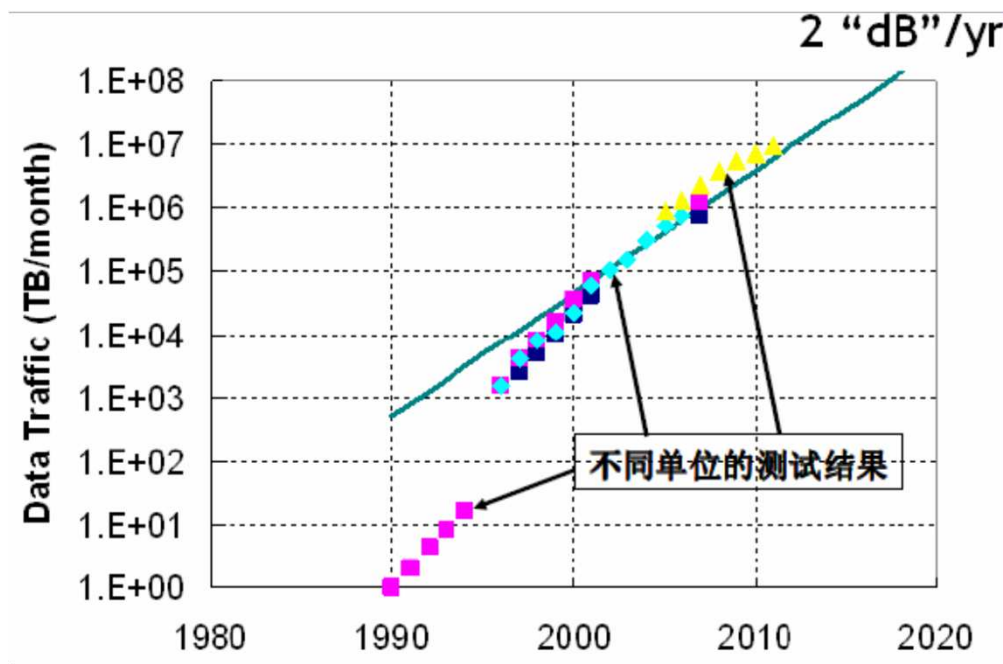


光无线融合



# 数据业务量增长预测 vs 通信系统

- 全球因特网数据业务量每10年增长100倍。
- 每年 $10^9\text{TB}=10^6\text{PB}=10^3\text{EB}=1\text{ZB}$  (Gilder[OFC08]估计美国2015业务量同)



## 2020计划:

- 1 Tb/s channel rate
- 100 Channels
- 100 Tb/s Capacity
- $SE = 20$  !

$SE = \text{Spectral Efficiency}$   
 $= \text{Channel Rate} / \text{Channel Spacing}$

业务需求增长将超过系统容量的10倍以上！

# 能源系统

## 电力、煤炭系统的监视、控制和管理

抗干扰能力强



无源传感、宽带传输



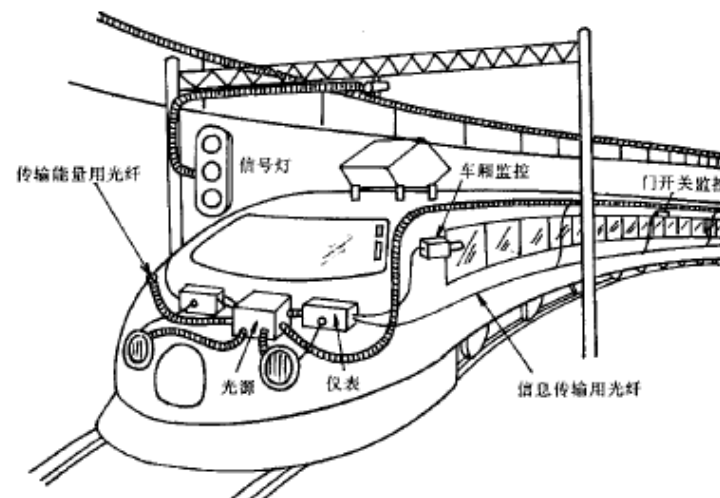
# 交通系统

## 铁路、地铁和高速公路通信及监控网络系统

### 铁路通信网特点:

1. 节点多，分支、插入话路频繁
2. 通信量大小不一，需求不同(传输电话、数据、图像)
3. 要求有强抗电磁干扰能力

除了光纤通信，其它通信方式不能满足这些要求



# 军事

**光纤制导武器：** 光纤制导导弹、光纤制导鱼雷  
需要获得实时的目标图像同时要求控制线轻巧



# 军事

**水下通信系统**是扫雷舰与浮游载体之间的传输线路

1. 浮游载体需要传回声纳信号和遥测信号(都是视频信号)
2. 舰体对浮游载体进行控制



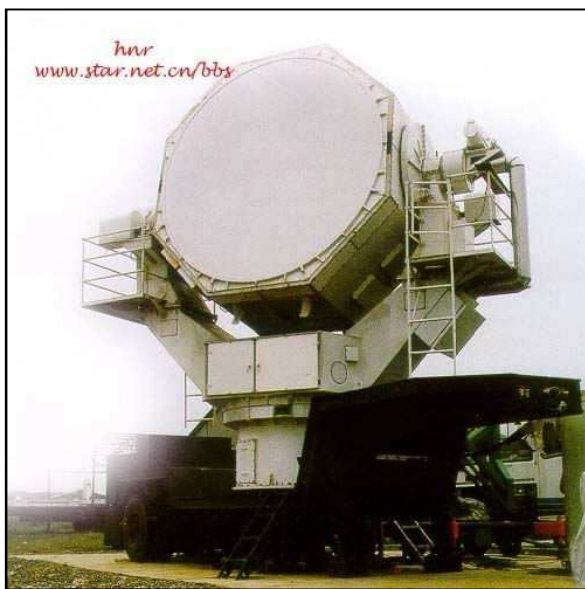
水听器

# 军事

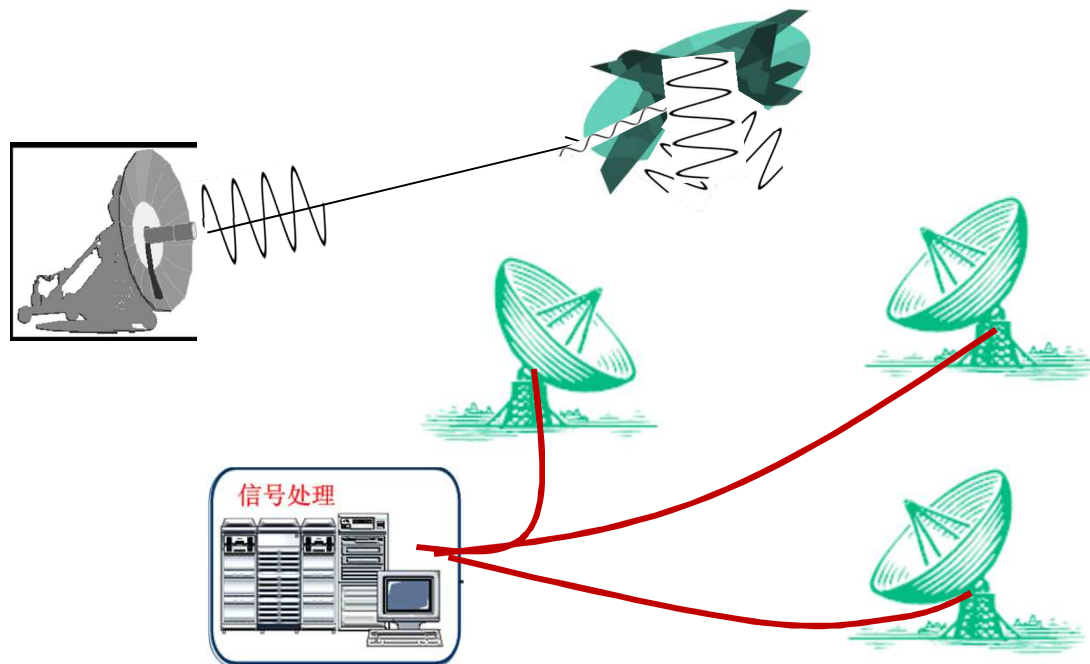
**雷达：**雷达室与作战情报中心之间信息的抗干扰和保密传输

**光纤延迟线：**调节每个微波单元的相位，控制雷达扫描

**雷达相干组阵：**同步不同位置的天线，相干合成接收信号，提高雷达的接收灵敏度，及其抗摧毁、抗干扰、抗隐身、抗低空突防能力



线控阵雷达



雷达相干组阵

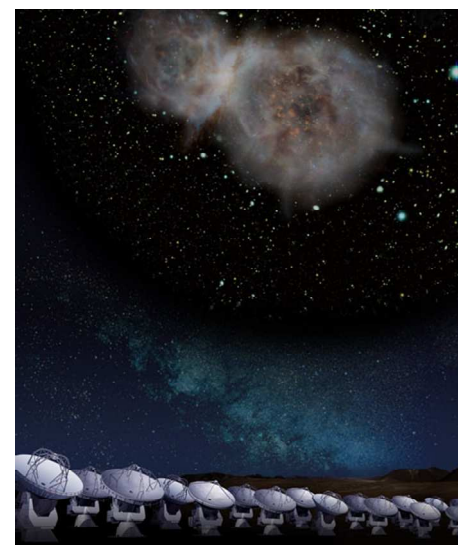


# 深空探测



## 天线口径：

- 决定天线分辨率、灵敏度
- 受工艺、技术、成本等因素制约



干涉天线阵列：  
各天线互相同步



光纤：本振信号的大区域稳相分配

- ✓ 高分辨率
- ✓ 高灵敏度
- ✓ 高灵活性



# 医疗器械

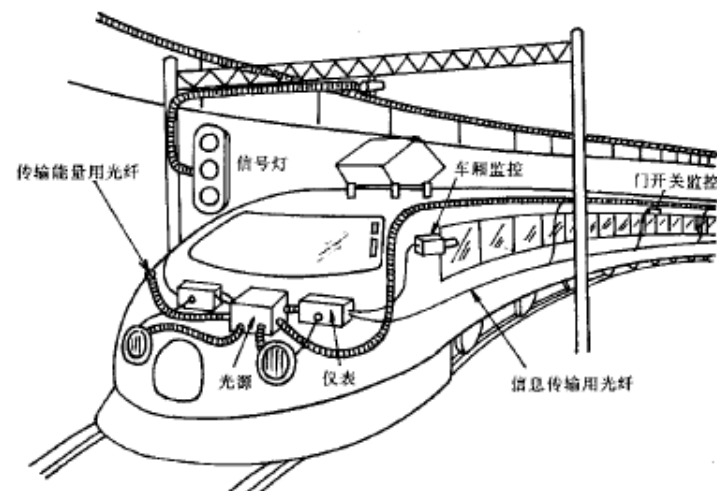
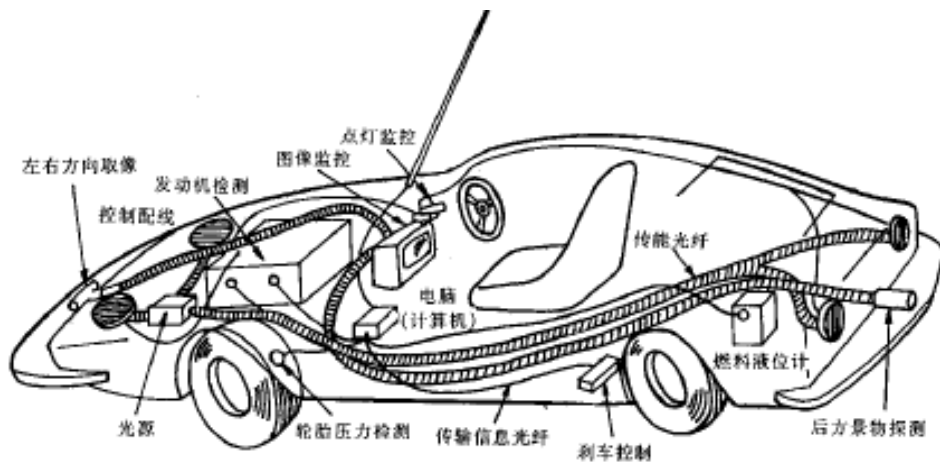
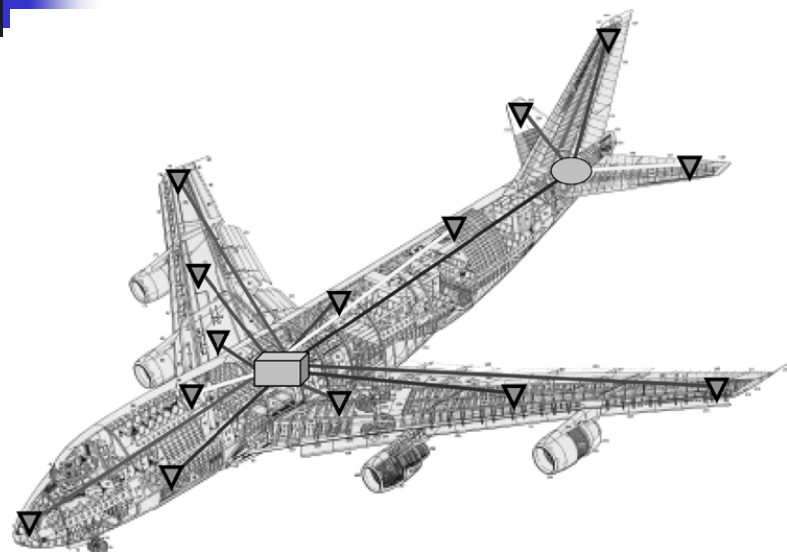
## 内窥镜



激光手术刀

激光手术中，有时需要手术的部位在人体腔道内，这就要求激光能拐弯。目前大多数医疗激光可以通过石英光纤来实现拐弯，因此激光手术刀又叫光纤手术刀。

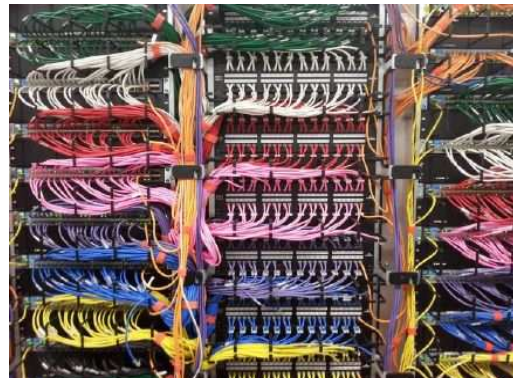
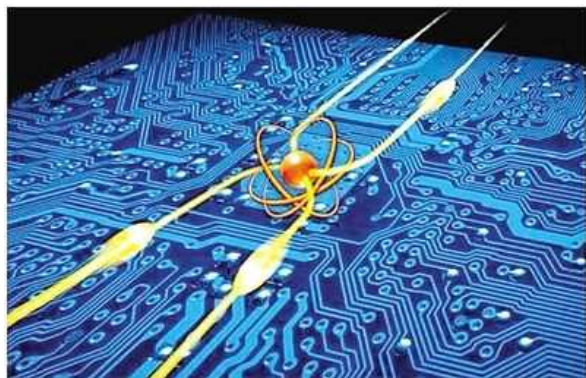
# 航空电子光纤网



# 数据中心/超算中心短距离光互连



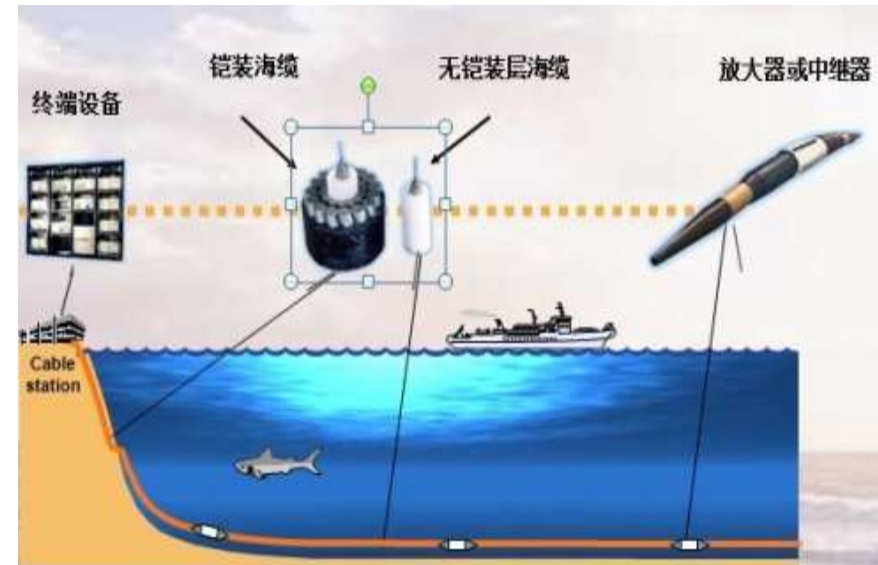
**超算中心互联方式：40000多根单模光纤**

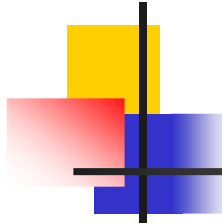


**Google的数据中心**



# 海底光纤通信系统





# Industry

---

**AT&T**

**BELL LAB**

**LUCENT**

**CORNING**

**NTT**

**ALCATEL**

**NORTEL**

.....

**Google**

**Alibaba**

**Amazon**

**Tencent**

**Facebook**



**HUAWEI**