

# 超长波段(2—5 $\mu\text{m}$ )红外光纤 通信的物理基础研究

干福熹\*

**[摘要]** 光纤通信是70年代兴起的一门新技术,是通信领域的一场革命。为了降低光纤损耗,光纤通信的工作波长从0.8 $\rightarrow$ 1.3 $\rightarrow$ 1.55 $\mu\text{m}$ 逐步移向长波段。目前石英光纤已接近极限工作波长和理论损耗,无中继通信距离达几十公里。为了能在更长的无中继距离和更低损耗下工作,近年来很多科技发达国家积极开展超长波段(2—5 $\mu\text{m}$ )红外光纤通信研究。理论上红外光纤(如氟化物玻璃纤维)的极限损耗比石英光纤的损耗要低得多,可以在几百公里以上长距离无中继通信。

“超长波段红外光纤通信的物理基础研究”是国家自然科学基金会的重大项目,属前沿研究课题,起点较高。经三年实施,已在氟化物玻璃光纤、红外半导体激光器及探测器等方面取得了进展。经过努力,可望达到国际先进水平。

## 一、光纤通信的发展概况

光纤通信的出现是信息传输的一场革命。光纤通信的明显优点是信息容量大,重量轻,占用空间小,抗电磁干扰,串话少,保密性强等。现在,国外以石英光纤为基础的光纤通信已形成产业,已铺设了上百万公里的通信干线,造价迅速下降,成本低于同轴电缆通信。就光纤来说,从1978年到1985年的近十年间,光纤损耗下降十多倍,售价也下降近十倍。

70年代末,国外建立了商用短波段(0.8—0.85 $\mu\text{m}$ )的多模光纤通信线路,中继距离为十几公里,传输速率为34—140Mbit/s,(480—1960路电话容量)。目前,大多数国家使用的光纤通信是工作波长为1.3 $\mu\text{m}$ (石英玻璃光纤的零色散波长)的单模光纤通信,工业使用的传输速率为140—280Mbit/s,中继距离为30—40km。用1.55 $\mu\text{m}$ 工作波长(石英玻璃光纤的最小损耗波长),数据率达到280—560Mbit/s,中继距离达到50—80km,光纤的色散数据为20ps/nm·km。

光纤通信目前主要应用在通信的主干线上。如长距离的海底光缆。美、英、法三国共同建设的贯穿大西洋TAT-8工程,全程6680km,传输速率280Mbit/s,工作波长1.3 $\mu\text{m}$ ,中继距离70km。日、美、澳、新四国计划共同敷设南太平洋光缆通信系统,海底光缆全长16000公里,计划1996年竣工并投入运转。近期,光纤通信应用于综合业务数字网,各种信息的数据由宽带和高速的光纤传输。局部和用户网也是应用的主要方面,如用于闭路彩色电视、可视电话、传真和立体声广播等。

\* 中国科学院上海光机研究所

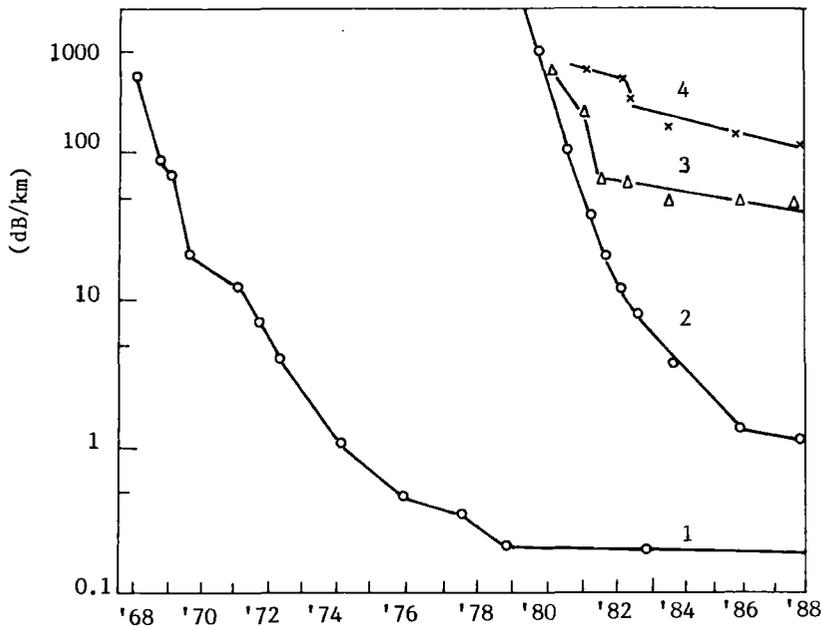
根据信息发展的要求,目前石英光纤通信的局限在于:

1. 信息容量比理论容量小2—3个数量级。2. 受目前传输方式,调制和开关元件结构的限制,传输速率低。3. 受光纤的损耗的限制,中继距离短,仅在百公里内。目前石英玻璃光纤在 $1.55\mu\text{m}$ 最低损耗约为 $0.2\text{dB}/\text{km}$ ,已接近理论极限损耗值 $0.1\text{dB}/\text{km}$ 。

由于材料的 Rayleigh 散射与光波长的四次方成反比,光纤通信的工作波长从 $0.82\mu\text{m}$ 移至 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 。由于受本征吸收的限制,以石英为基础的光纤的工作波长不能大于 $2\mu\text{m}$ 。从80年代初人们探索红外玻璃光纤,使工作波长移至 $2—3\mu\text{m}$ 。表1列举了光纤通信系统的发展阶段。

表1 光纤通信系统发展概况

|                             | 短波长    | 长波长         | 长波长     | 超长波长                            |
|-----------------------------|--------|-------------|---------|---------------------------------|
| 波长( $\mu\text{m}$ )         | 0.85   | 1.3         | 1.55    | 2—5                             |
| 光源                          | GaAlAs | InGaAsP     | InGaAsP | GaInAsSb(III—V族)<br>IV—VI族铅盐激光器 |
| 探测器                         | Si 光电管 | Ge, InGaAsP | InGaAsP | HgCdTe<br>InAsPSb               |
| 损耗( $\text{dB}/\text{km}$ ) | 2—3    | 0.5—1       | 0.1—0.3 | 0.001—0.1                       |
| 传输距离(km)                    | —10    | —30         | —100    | >1000                           |
| 发展阶段                        | 工业生产   | 工业生产        | 开发      | 研究                              |



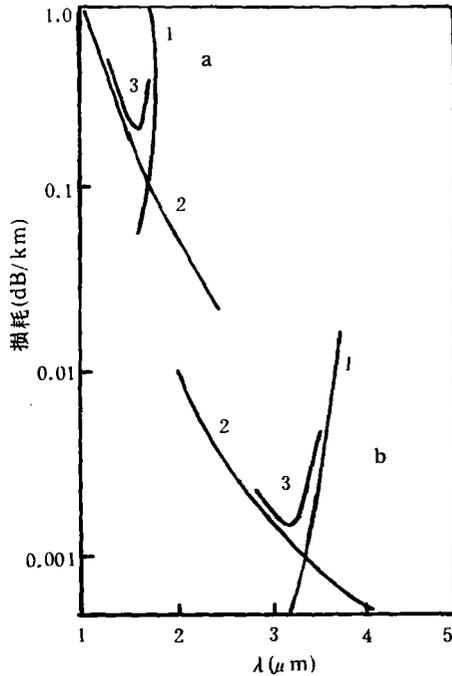
1. 熔石英 2. 氟化物玻璃 3. 硫系玻璃 4. 晶体

图1 1968年至1988年各类光纤的损耗下降趋势

## 二、红外光纤通信的发展

新一代的光纤通信中的核心问题是发展新的光纤材料,国外从 70 年代末开始红外光纤的实验研究,取得了明显的进展。图 1 表示近年来各类光纤的损耗下降趋势。由图可知,氟化物玻璃光纤的损耗下降速度要比早期石英光纤快得多。根据理论估算(如图 2 所示),氟化物玻璃光纤的理论损耗系数可小于 0.01dB/km,中继距离可达千公里。这种远景当然是吸引人的,但是要克服的工艺困难也是巨大的。主要是由于阴、阳离子杂质引起的吸收损耗以及微观的和亚微观的缺陷引起的散射损耗。近年来的努力结果,根据 500m 光纤测量,从可见光区域推至 2.5 $\mu\text{m}$  Rayleigh 散射约为 0.02dB/km。由于还存在着亚微观散射,光纤的总损耗还取决于光纤长度,表 2 汇集了最近各国获得的氟化物玻璃光纤的最好的实验结果。

在消除了亚微观散射颗粒后,光纤中阳离子(主要为  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ , 和  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$ ,  $\text{Sm}^{3+}$ )和阴离子( $\text{OH}^-$ )杂质降至 1—5ppb 时,估计光纤的损耗为 0.02—0.05dB/km。降低氟化物玻璃的损耗和制成长距离的光缆无疑是发展超长波长红外光纤通信的关键。人们估计,损耗达到 0.01dB/km 的氟化物光纤用于超长距离(中继距离达到千公里)是 21 世纪的远景。近期目标为:光纤损耗小于 0.1dB/km,中继距离 300km。为了展宽频带,需要降低光纤材料的色散,图 3 表示氟化物玻璃和石英玻璃在近红外的光学色散,氟化物玻璃有平坦得多的色散曲线,光纤的色散可小于 10ps/nm·km。



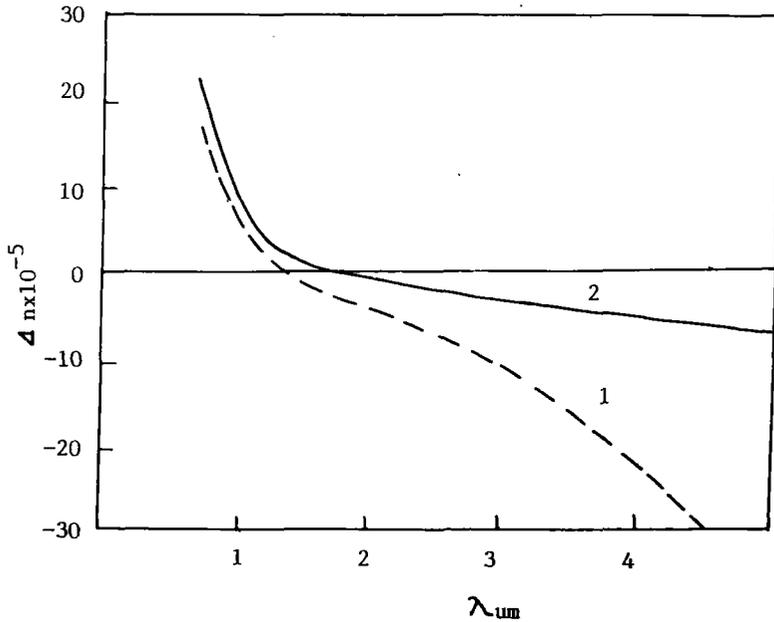
a. 熔石英, b. 氟玻璃  
1. 红外吸收, 2. 瑞利散射, 3. 总损耗  
图 2 石英玻璃和氟化物玻璃的损耗特性

表 2 国外几个主要实验室研制的氟化物玻璃光纤的结果

| 国 家 | 实验室            | 光纤长度(m) | 损耗系数(dB/km) |
|-----|----------------|---------|-------------|
| 日 本 | 日本电话电报公司(NTT)  | 10—30   | 0.7         |
| 美 国 | 海军实验室(NRL)     | 1—5     | 0.9         |
| 英 国 | 英国通讯实验室(BTRL)  | 200     | 3           |
| 法 国 | 国家通讯研究中心(CNET) | 200     | 20          |

红外半导体激光器和接收器也是红外光纤通信中的关键元件,近年来有很大的进展,如 Ga In As Sb(2.07 $\mu\text{m}$ ), In Ga As(2.4 $\mu\text{m}$ ), In As SbP(2.55 $\mu\text{m}$ ), In As Sb(3.22 $\mu\text{m}$ )都在不同温度产生激光。In Ga As/InP PIN 红外接收器也研制成功,工作波长为 2.5 $\mu\text{m}$ 。

目前,法、英等国的主要光纤通信实验室已进行了超长波段(2—3 $\mu\text{m}$ )的红外光纤通信的系统演示。



1. 石英玻璃 2. 氟化物玻璃

图3 石英玻璃和氟化物玻璃的色散曲线

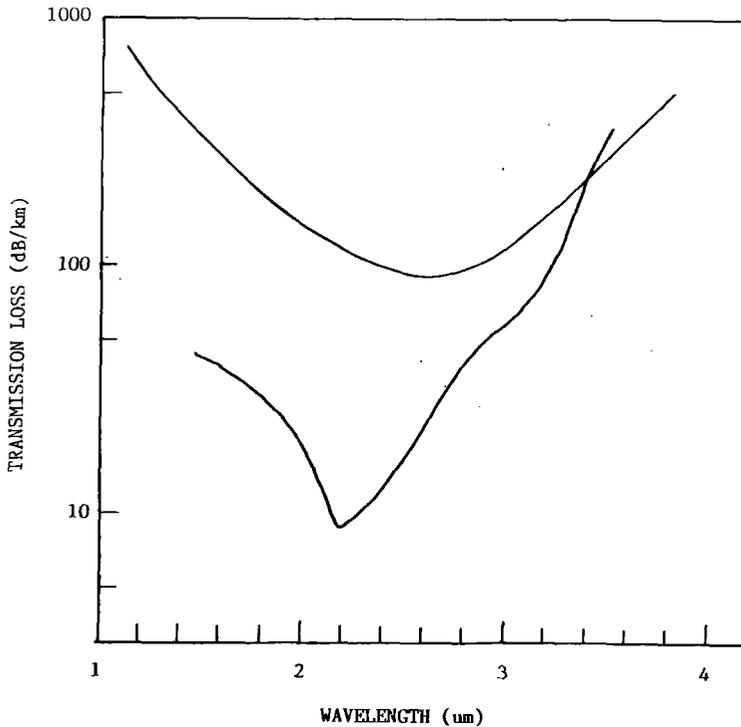
### 三、我国超长波段(2—5 $\mu\text{m}$ )红外光纤通信物理基础研究的进展

1986年,我国国家自然科学基金会组织了“超长波段(2—5 $\mu\text{m}$ )红外光纤通信物理基础研究”的重大项目。本项目从物理基础探索红外光纤通信中的主要技术关键和实现长距离通信的可能性。以研究红外光纤通信中的红外氟化物玻璃光纤、红外半导体激光器、红外半导体探测器等材料和元件为重点,研究红外光纤的吸收损耗、色散、散射等微观机制,研究光纤红外波导和传输理论以及红外光纤的线性光学性质和非线性光学效应等,将基础研究和元器件研究相结合,在各单元技术的基础上建立总体实验装置,并对各部分元器件的基本性能作出评价。该项目属前沿研究课题,起点比较先进,与国际上各主要实验室相比,基本上处于同步,有可能达到当前的国际先进水平。

经过近三年的努力,已在以下几个主要方面取得进展:

1. 氟化物玻璃光纤 提纯了原材料,使阳离子杂质含量降低到10ppm以下。建立了在干燥保护气氛下熔制玻璃和拉制玻璃纤维的实验室。在长度为40—50m情况下,以 $\text{ZrF}_4$ 为基础的氟化物玻璃光纤总损耗可降至100dB/km以下。本项目加强了对氟化物玻璃和光纤的物理性质的检测和分析工作。由于影响光纤损耗的主要因素为散射,用激光光散射层貌术、光学和电子显微镜、x射线能谱分析以及粉末x射线衍射物相分析,找出散射的主要原因是玻璃在冷却过程中析晶所引起的,散射颗粒的直径为1—6 $\mu\text{m}$ ,主要晶相为 $\text{LaF}_3$ 、 $\text{BaF}_2$ 、 $\text{ZrF}_4$ 等。建立了1—5 $\mu\text{m}$ 波段的红外光纤损耗的测试方法和设备。以上,为降低氟化物玻璃光纤的总损耗提供了条件和途径。当消除了玻璃中的宏观散射颗粒,自制的氟化物玻璃光纤的损

耗可望下降一个数量级达到国际先进水平。同时还建立了散射系数测量装置,用来控制棒坯的质量。经大量测试认为,当玻璃棒坯的散射系数 $\alpha \propto 1/\lambda^4$ ,并且 $\alpha < 1 \times 10^{-5}$ 时,即主要为微观散射损耗(Rayleigh 散射)时,才能获得低损耗的光纤。图4表示美国海军实验室和我们制备的氟化物玻璃光纤的损耗的光谱曲线。



1. 单模(美国, NRL, 1988, 20m), 2. 多模(中国, 1989, 40m)

图4 氟化物玻璃光纤的光谱损耗图

由我们首先提出的以  $\text{AlF}_3$  为基础的氟化物玻璃(RAY),经继续研究,与国际上常用的以  $\text{ZrF}_4$  为基础的氟化物玻璃(ZBLA)相比具有较好的物理与化学性质。我们还研究了引入稀土氟化物对改进玻璃形成的稳定性和对玻璃各种物理性质的影响。为了获得高数值孔径的氟化物玻璃纤维,首次研制出玻璃成分渐变的以  $\text{ZrF}_4\text{-AlF}_3$  为基础,性能稳定的玻璃,发展了光纤的芯和皮料的物理性能匹配而且具有大的折射率差的新玻璃成分。

**2. 红外半导体激光器和探测器** 在长波长( $> 6\mu\text{m}$ )IV-VI族半导体激光器的基础上研制出  $\text{PbSeS}$  激光器( $5\mu\text{m}$ )和  $\text{PbCdSeS}$  激光器( $3\mu\text{m}$ ),脉冲运转时,工作温度为 20K。 $\text{PbCdSeS}$  激光器的工作温度进一步提高,可达到 77K。我们重点研制 III-V 族半导体激光器,研究了  $\text{GaInAsSb}$  四元合金,尤其是  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{InAs}$  和  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{GaSb}$  的异质结液相外延,外延层与衬底晶格匹配及生长特性。对可望实现  $2.55\mu\text{m}$  的氟化物玻璃光纤的最低损耗的材料体系  $\text{InAsPSb}/\text{InAs}$  进行了计算分析。研制出  $2.2\text{--}2.5\mu\text{m}$  III-V 族半导体激光器,先脉冲工作,然后改进为连续工作,工作温度能大于 77K。

红外半导体探测器的工作重点放在原有基础较好的  $\text{HgCdTe}$  接收器上。通过选择合适

的组分和工作温度,使探测器的响应波段落在 $2\text{--}5\mu\text{m}$ 范围。HgCdTe的电子迁移率高,电子有效质量小,本征载流子浓度低,有可能得到响应速度快、噪声小和探测率高的接收器。现已研制出 $2\text{--}5\mu\text{m}$ 的HgCdTe探测器,峰值波长 $3.5\mu\text{m}$ ,探测率 $6\times 10^{10}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ ,响应率为 $4\times 10^4\text{cm}\mu\text{V}/\mu\text{W}$ ,响应时间为 $10^{-6}\text{--}10^{-9}$ 。目前工作温度为 $77\text{K}$ ,争取进一步提高到室温。

较仔细地研究了 $\text{In}_{(1-x)}\text{As}_x\text{PySb}_{(1-y)}/\text{In}$ 的外延生长条件,选取了最佳外延层的固相组分,即 $x=0.2$ 和 $y=0.09$ 。生长出了InAsPSb pn结。p型层的载流子浓度为 $2\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ ,结深为 $0.8\mu\text{m}$ ,n型层是非掺杂的,浓度为 $2\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ ,厚度为 $1.4\mu\text{m}$ ,这种结构形式适合于PIN光电探测器应用。

**3. 理论和计算工作** 提出了光波导的电磁耦合场量子理论。电磁耦合场量子既有光学的特性,又有材料元激发属性。玻璃中不同波矢的电磁耦合量子之间的弹性散射损耗即Rayleigh散射损耗;非弹性散射损耗造成玻璃中电磁耦合量子的多声子吸收。从理论上计算了氟化物玻璃光纤的极限的散射和吸收损耗。建立了粗糙表面电子激发态量子理论,研究了光纤界面缺陷对损耗和模的影响。

在以往已建立的根据玻璃成分计算玻璃的物理性质的计算体系的基础上,用离子结构模型推导出半经验公式,根据氟化物玻璃的成分可直接计算玻璃的折射率,密度、平均色散、多声子吸收和光纤的材料色散和零色散波长。计算结果与实验值吻合较好,已引起国际上的重视。

在即将进行的总体试验中,将采用本项目研制出的低损耗的氟化物玻璃光纤( $<20\text{dB}/\text{km}$ )、连续运转的III-V族半导体激光器(工作温度 $>77\text{K}$ )、高灵敏的和快速响应的HgCdTe半导体探测器,先建立一个光纤损耗及散射测试系统,进一步在 $2.5\mu\text{m}$ 红外波长进行信息传输试验。

#### 四、氟化物玻璃光纤近期应用的可能性研究

今后,中红外光纤通信能否得到应用,关键在于氟化物玻璃光纤的进展。理论和实验都已证明氟化物玻璃光纤的Rayleigh散射可达到 $0.01\text{dB}/\text{km}$ (在 $2.5\mu\text{m}$ ),但当前氟化物玻璃光纤的总损耗在 $1\text{dB}/\text{km}$ 左右,主要为亚微观散射和杂质吸收损耗。我们已弄清了这些损耗的产生原因和防止办法,正通过实验加以改进。此外,氟化物玻璃光纤还存在纤维强度、双折射和超长长度的拉丝等问题有待研究解决。美国Corning玻璃公司正努力研究气相输运和沉积的方法制备超纯氟化物玻璃。据英国通信实验室(BTRL)分析,在消除亚微观散射后各种杂质含量分别控制在 $1\text{--}5\text{ppb}$ 间,能实现的损耗为 $0.035\text{dB}/\text{km}$ ,这也是目前几家主要实验室努力的目标。总之,最近 $2\text{--}3$ 年是实验室判断氟化物玻璃光纤作为超低损耗长距离光纤通信的可能性的关键时期。

目前各国密切注意和积极开展的是在近几年氟化物玻璃光纤取得阶段成果的基础上,先发展近期的应用,主要方面有:

1. 用于 $2\text{--}5\mu\text{m}$ 激光器的光纤传输,如 $\text{CO}_2$ 气体激光( $5\mu\text{m}$ ),HF或DF化学激光( $2.6\mu\text{m}$ 和 $3.8\mu\text{m}$ )以及 $\text{Er}^{3+}$ :YAG固体激光( $2.9\mu\text{m}$ )。
2. 红外光纤遥感光谱仪,在 $2\text{--}5\mu\text{m}$ 波长范围有许多气体吸收峰(如NO,OH, $\text{NO}_2$ , $\text{NH}_2$ 等),国外有公司开发产品。

3. 用于热象仪和红外玻璃传感器。
4. 军用的红外遥感和传感器方面。

发展掺杂氟化物玻璃光纤作为纤维激光器和放大器,这是近来各方面所热心研究的,如掺 $\text{Nd}^{3+}$ 或 $\text{Er}^{3+}$ ,可在光纤通信波长 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 处作中继放大器;掺 $\text{Er}^{3+}$ , $\text{Ho}^{3+}$ 、 $\text{Tm}^{3+}$ 的氟化物玻璃光纤在 $2.7\mu\text{m}$ , $2.08\mu\text{m}$ , $2.3\mu\text{m}$ 产生激光,在医学和通信上有重要作用。

本项目在以往掺稀土离子氟化物玻璃的光谱和发光研究工作的基础上,已开展了稀土掺杂的氟化物玻璃光纤的研究,掺 $\text{Nd}^{3+}$ 氟化物玻璃光纤在 $1.06\mu\text{m}$ 已产生激光,正在进行 $1.33\mu\text{m}$ 的 $\text{Nd}^{3+}$ 掺杂玻璃光纤的激光放大实验和掺 $\text{Er}^{3+}$ 光纤的 $1.56\mu\text{m}$ 和 $2.9\mu\text{m}$ 的发光激光实验,以及筹建红外光纤激光器总体实验系统。

## STUDY ON THE PHYSICS BASIS OF FIBER COMMUNICATION IN MIDDLE IR WAVELENGTH REGION (2—5 $\mu\text{m}$ )

Gan Fuxi

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

### Abstract

Fiber communication has been developed as a new kind of technology since 1970s, which leads to a revolution in the field of communication. In order to reduce the loss of optical fiber, the operating wavelength for fiber communication has been shifted to long wavelength gradually, from 0.8 to 1.3 then to  $1.55\mu\text{m}$ . Up to now, the operating wavelength of fused silica glass fiber has approached its limit value and its loss is close to the theoretical value. In recent years, many advanced countries have paid more attention to the studies of fiber communication in middle IR wavelength region (2—5 $\mu\text{m}$ ). IR fiber such as fluoride glass fiber whose minimum loss (to be projected to  $10^{-2}$ — $10^{-3}\text{dB/km}$ ) is much lower than that of the silica glass fiber ( $0.2\text{dB/km}$ ) can be used for repeaterless telecommunication in more than hundreds of kilometers.

On the physics basis we are exploring the possibility of long distance communication and the crux of technology in long wavelength IR fiber communication in this project. Fundamental researches were combined with the developing of optical components. While centering our studies on fluoride glass fibers, semiconductor lasers, detectors, and other components used in IR fiber communication, we also study the micro-mechanism of absorption loss, optical dispersion and light scattering in fibers and the theory of waveguide and transmission characteristics in IR fiber communication. Now we have produced low loss fluoride glass fibers, Ga InAsSb / GaSb semiconductor laser device and HgCdTe IR detector. General test for the optical fiber communication in the wavelength region 2—3  $\mu\text{m}$  is going to be done in our laboratory. New research results about the new type of fluoride glass fibers, the properties and structures of the glasses and fibers, micro-and submicro-defects in the glasses and fibers, calculating of optical properties of the fibers, nonlinear optical effect as well as measuring and testing techniques were acquired.