

# 2~5 $\mu\text{m}$ 超长波段红外光纤通信的发展

于福熹

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海, 201800)

评述了新的光纤通信,特别是长距离光纤通信的发展,这种光纤通信是基于超低损耗的氟化物玻璃纤维;讨论了氟化物玻璃纤维的进展和存在的问题;报道了我国应用于红外光纤通信的氟化物玻璃纤维、半导体激光器以及其它元件的研究结果;分析了长距离无中继的光纤通信的可能性。

**关键词:** 光纤通信, 红外, 氟化物玻璃, 激光器, 探测器。

## 1 引言

光纤通信的出现是信息传输的一场革命。光纤通信具有信息容量大,重量轻,占用空间小,抗电磁干扰,串音小,保密性强等明显优点。以石英光纤为基础的光纤通信已形成产业,每年铺设上千万 km 的通信线,造价迅速下降,目前成本已低于同轴电缆通信。1970 年代末建立了商用短波长(0.8~0.85  $\mu\text{m}$ )的多模光纤通信线路,中继距离为十几 km,传输速率为 34~140 Mbit/s(大约为 1500 路电话容量)。后来使用的工作波长为 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 140~280 Mbit/s,中继距离为 30~40 km。近年来光纤通信波长为 1.55  $\mu\text{m}$ (石英玻璃光纤的最小损耗波长)传输速率达到 280~560 Mbit/s,中继距离达到 50~80 km,光纤的色散数据为 20 ps/nm·km。

从今后信息发展的角度来看,目前光纤通信的局限在于:

(1) 信息容量小,比理论容量小 2~3 数量级。传输速率低,目前受传输方式、调制和开关元件结构的限制。

(2) 中继距离短,目前在百 km 内,还受光纤损耗的限制,目前石英玻璃光纤在 1.55  $\mu\text{m}$ ,最低损耗约为 0.2 dB/km,已接近理论极限损耗值 0.1 dB/km。

为了提高信息的容量和传输速率,对半导体激光器和探测器的结构和调制方式进行改进,采用波分复用或时分多路等技术,除可以提高光纤通信的容量外,传输率也可以提高到 1~2 Gb/s。相干光光纤通信是降低噪音和增加容量的主要手段。采用单模单频(调谐)窄线宽的激光器,如分布反馈(DBF)半导体激光器作光源,用位相调制和外差接收,可充分利用光频的极宽频带。目前在实验室用石英光纤在 1.56  $\mu\text{m}$  工作波长,相干光通信可做到 100 km 中 8 Gb/s 传输率,灵敏度为 20 dB。相干光通信估计到 1990 年代中期或末期在发达国

家可能达到实用阶段。

光纤通信的主要应用还是在通信干线上,长距离的通信是主要目标。如跨洲的海底光缆。美、英、法三国共同建设的贯穿大西洋的 TAT-8 工程,全程为 6680 km,传输速率为 280 Mb/s,工作波长为  $1.3\mu\text{m}$ ,中继距离为 70 km。日、美、澳、新四国计划共同铺设南太平洋光缆通信系统,海底光缆全长为 16000 km,计划 1991 年竣工并投入运转。目前的中继站均采用将光信号转换成电信号放大后再转换成光信号的传输方式,不仅系统复杂,价格高,而且不稳定。最近发展的掺稀土离子(如  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$ )玻璃光纤放大器,可以将光信号直接放大,这对长距离光纤通信是很大的发展。目前掺铒( $\text{Er}^{2+}$ )光纤放大器(EDFA)的增益可达到 20~30 dB。日本 NTT 曾用 25 个光纤放大器,在实验室进行了 2200 km 的传输实验。图 1 是非相干光(a)、(c)和相干光(b)、(d)用光纤放大器的  $1.56\mu\text{m}$  红外光纤通信的示意图<sup>[1]</sup>。

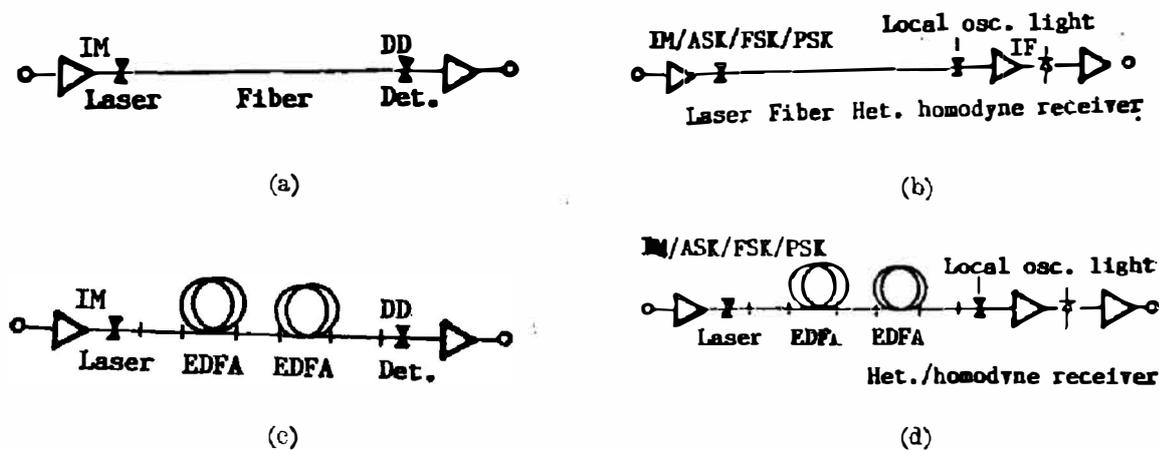


图 1 光通信的四种基本结构

(a) 普通的非相干光通信系统, (b) 相干光通信系统, (c) 有铒光纤放大器 EDFA 的非相干光通信系统, (d) 有铒光纤放大器 EDFA 的相干光通信系统

Fig. 1 Four basic types of optical fiber communication systems

(a) Noncoherent (conventional) IM-DD system (b) Coherent system (c) Noncoherent system with EDFAs (d) Coherent system with EDFAs

要增加无中继通信的距离,就要降低光纤的损耗。以熔石英为基础的光纤通信的发展来看,除了在工艺上降低阳离子和阴离子的杂质含量,以及减小宏观散射损耗外,要使通信工作波长向长波方向移动。由于材料的瑞利散射与光波长的四次方成反比,光通信的工作波长从 1970 年代约  $0.8\mu\text{m}$  移到 1980 年约  $1.3\mu\text{m}$  和  $1.55\mu\text{m}$ 。但是,由于受到熔石英玻璃的红外本征吸收(红外多声子吸收)的限制,熔石英为基础的光纤工作波长不能大于  $2\mu\text{m}$ 。因此,从 1970 年末开始,人们注意到要更换光纤材料。从各方面分析,认为氟化物玻璃是合适的光纤材料。从图 2 可知,氟化物玻璃的理论损耗值约为  $10^{-3}\text{ dB/km}$ ,最低损耗波长约为  $3\mu\text{m}$ 。1980 年中期人们注意到氟化物玻璃光纤的实验损耗值下降的趋势比早期熔石英光纤的损耗下降还快(见图 3),因此掀起了研究超长波段( $2\sim 4\mu\text{m}$ )红外光纤通信的热潮。表 1 列举了各时期光纤通信发展的概况。

我们在文献[4, 5]中介绍了超长波段红外光纤通信及我国进行的研究工作。本文主要介绍和分析这一研究领域的发展近况和今后的展望。

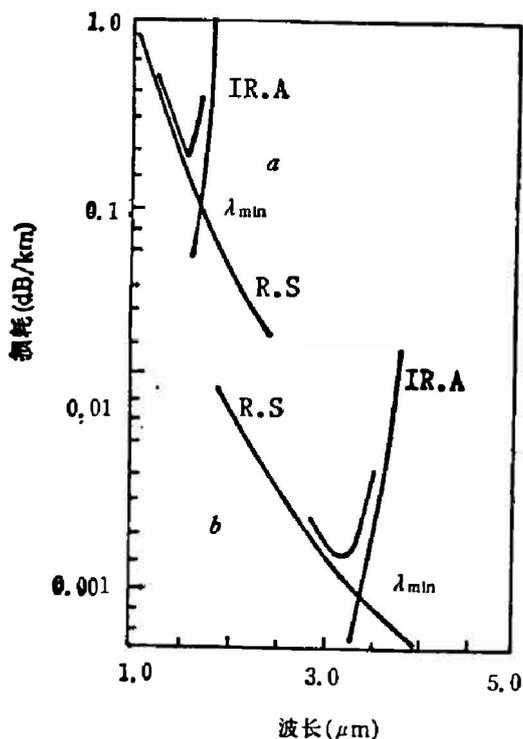


图2 石英玻璃和氟化物玻璃的损耗特性  
(a) 石英玻璃 (b) 氟化物玻璃 IR.A—红  
外吸收, R.S—瑞利散射

Fig.2 Optical loss characteristics of silica  
glass and fluoride glass

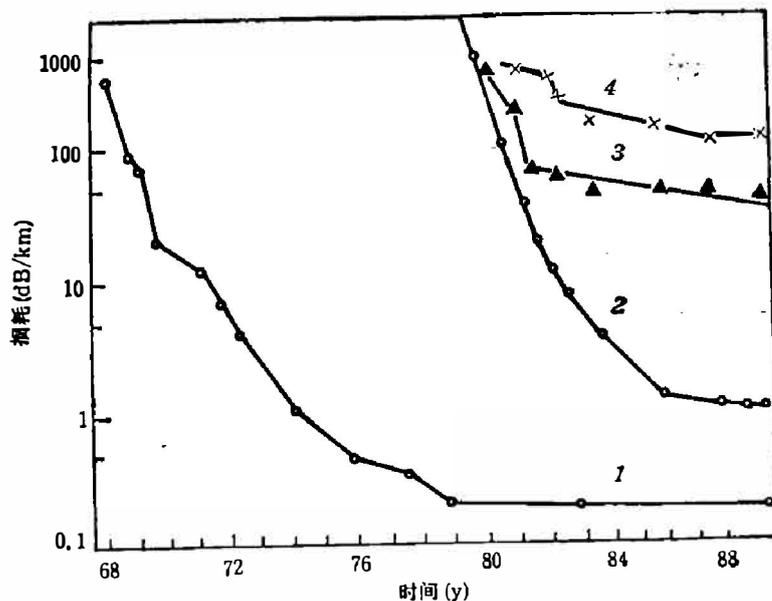


图3 各类光纤的损耗下降趋势

1—熔石英, 2—氟化物玻璃, 3—硫系玻璃  
4—晶体

Fig.3 Optical loss decrease tendency of  
different optical fibers

表1 光纤通信系统发展概况

Table 1 Development of Optical fiber communication systems

	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) IV~VI族铅盐激光器
探 测 器	Si 光电管	Ge, InGaAsP	InGaAsP	HgCdTe InAsPSb
损 耗 (dB/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

## 2 氟化物玻璃红外光纤的发展

新一代光纤通信中的核心问题是发展新的光纤材料. 在众多的红外玻璃中, 氟锆酸盐玻璃被认为是最有希望的超长波段红外光纤通信材料, 也是研究得最深入的重金属氟化物玻璃, 其中又以  $\text{ZrF}_4(\text{HfF}_4)\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3(\text{YF}_3)\text{-AlF}_3\text{-NaF}(\text{LiF})$  系统玻璃为最佳, 容易得到

无失透(结晶和分相)的玻璃,在软化温度区域有较低的粘滞活化能,扩大了拉丝工作的温度范围.表2列出了几种典型氟铝酸盐玻璃光纤芯料和皮料的化学组成.

表2 典型的氟化物玻璃光纤芯料和皮料的组成<sup>[6,7]</sup>

Table 2 Chemical compositions of core and clad of typical fluoride glass fibers

芯料组成 (mol%)	皮料组成 (mol%)
61ZrF <sub>4</sub> -32BaF <sub>2</sub> -3.9GdF <sub>3</sub> -3.1AlF <sub>3</sub>	59.5ZrF <sub>4</sub> -31.2BaF <sub>2</sub> -3.8GdF <sub>3</sub> -5.5lF <sub>3</sub>
51ZrF <sub>4</sub> -16BaF <sub>2</sub> -5LaF <sub>3</sub> -3AlF <sub>3</sub> -20LiF-5AlF <sub>3</sub>	53ZrF <sub>4</sub> -19BaF <sub>2</sub> -5LaF <sub>3</sub> -3AlF <sub>3</sub> -20LiF
56ZrF <sub>4</sub> -30BaF <sub>2</sub> -5LaF <sub>3</sub> -4YF <sub>3</sub> -5AlF <sub>3</sub>	55ZrF <sub>4</sub> -31BaF <sub>2</sub> -5LaF <sub>3</sub> -4NaF-5AlF <sub>3</sub>
60ZrF <sub>4</sub> -19BaF <sub>2</sub> -6LaF <sub>3</sub> -15NaF	57ZrF <sub>4</sub> -12BaF <sub>2</sub> -6LaF <sub>3</sub> -25NaF

氟化物玻璃具有比熔石英玻璃更良好的色散特性,由图4所示,在2~4 μm区域氟化物玻璃具有平坦的色散曲线,光纤的色散可小于10 ps/nm·km,这有利于展宽通信频带.氟化物玻璃的零色散波长约为1.7 μm<sup>[8]</sup>.

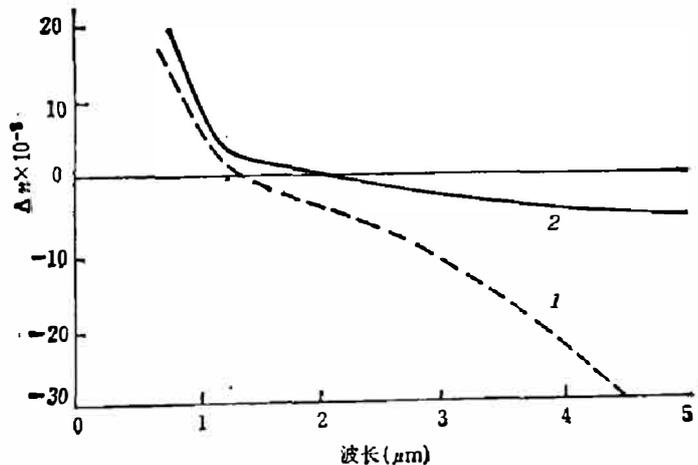


图4 熔石英玻璃和氟化物玻璃的色散曲线

1—熔石英玻璃, 2—氟化物玻璃

Fig. 4 Dispersion curves of silica glass and fluoride glass

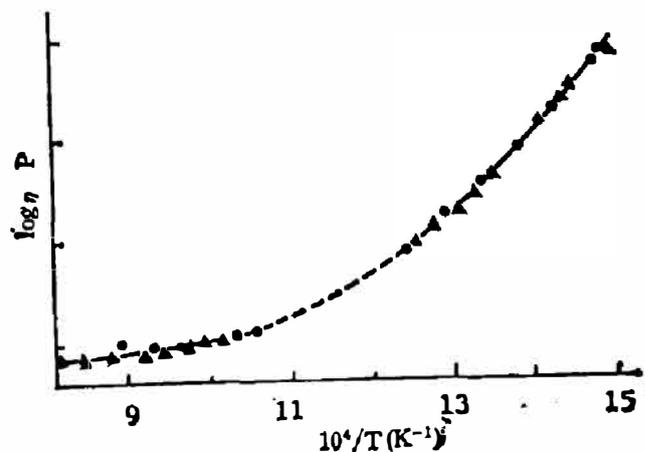


图5 氟化铝为基础(RAV)玻璃粘度与温度的关系

○ 实验值 ● 计算值

Fig. 5 Temperature dependence of viscosity of AlF<sub>3</sub>-based fluoride glass

图 5 表示氟化物玻璃在较宽温度范围内的粘度曲线<sup>[9]</sup>。氟化物玻璃成分的变化,对粘度的温度依赖关系的影响是不太大的.采用了特殊的拉丝工艺,目前氟化物玻璃可以连续拉制成上千米的纤维.

在物理和化学性质上,氟铝酸盐玻璃的化学稳定性和机械强度较差.发展新的氟化物玻璃系统,如以  $\text{AlF}_3$  为基础的氟化物玻璃 ( $\text{RF}_2\text{-AlF}_3\text{-YF}_3$ ) 其化学稳定性比以  $\text{ZrF}_4$  为基础的玻璃好得多(见图 6),但是氟铝酸盐玻璃的抗失透性能差,有待于进一步改进<sup>[10]</sup>.以氟化钪和稀土氟化物为基础的玻璃,如  $\text{BaF}_2\text{-ZnF}_2\text{-InF}_3\text{-YbF}_3\text{-ThF}_4$  等,红外多声子吸收限制波长更趋长波方向,化学稳定性也好,但玻璃的失透倾向和含钪玻璃的放射性等问题使玻璃的制备和应用带来困难<sup>[7,11]</sup>.表 3 列举了这几类氟化物玻璃的物理化学性质并与熔石英玻璃相比较.

由上述可知,氟化锆玻璃的性能还待进一步改善,而新的氟化物玻璃系统和组成也有待进一步研究和发展.降低氟化物光纤的损耗无疑是发展红外光纤通信的首要工作,光纤的总损耗值与长度有关,这几年在制备单模光纤和在加长光纤的长度情况下对降低损耗的研究有了进展(见图 7).目前最佳的结果是 110 m 长光纤的总损耗为 0.65 dB/km,损耗最小的波长为 2.59  $\mu\text{m}$ ,其损耗光谱曲线见图 8<sup>[15]</sup>.图 8 中还列出各杂质的吸收峰.

氟化物光纤的总损耗主要由吸收损耗和光散射损耗两部分组成.氟化物玻璃的本征吸收损耗主要来源于红外多声子吸收.根据理论计算,氟化物玻璃的本征吸收损耗约为 0.003

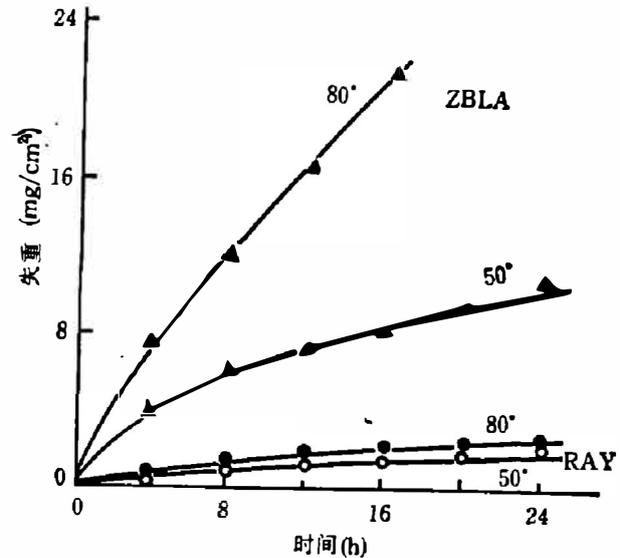


图 6 氟化锆为基础(ZBLA)和氟化铝为基础(RAY)的两种氟化物玻璃在不同温度下的失重

Fig. 6 Weight loss of  $\text{ZrF}_4$ -based and  $\text{AlF}_3$ -based fluoride glasses at different temperatures

表 3 若干氟化物玻璃的物理化学性质

Table 3 Physical and chemical properties of some fluoride glasses

性 质	57ZrF <sub>4</sub> 34BaF <sub>2</sub> 5LaF <sub>3</sub> 4AlF <sub>3</sub>	35AlF <sub>3</sub> 15YF <sub>3</sub> 50RF <sub>2</sub>	28.3ThF <sub>4</sub> 28.3YbF <sub>3</sub> 28.3ZnF <sub>2</sub> 15BaF <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
透光范围( $\mu\text{m}$ )	0.24~7.5	0.23~7.0	0.3~9	0.22~3.5
密 度( $\text{g/cm}^3$ )	4.62	3.87	6.43	2.20
转变温度( $^{\circ}\text{C}$ )	300	425	344	1190
熔 点( $^{\circ}\text{C}$ )	512	483	665	1710
折射率 $n_D$	1.519	1.427	1.54	1.458
膨胀系数( $10^{-7}^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	157	149	151	5.5
零色散波长( $\mu\text{m}$ )	1.7	—	1.8	1.3
化学稳定性	好	更好	更好	非常好

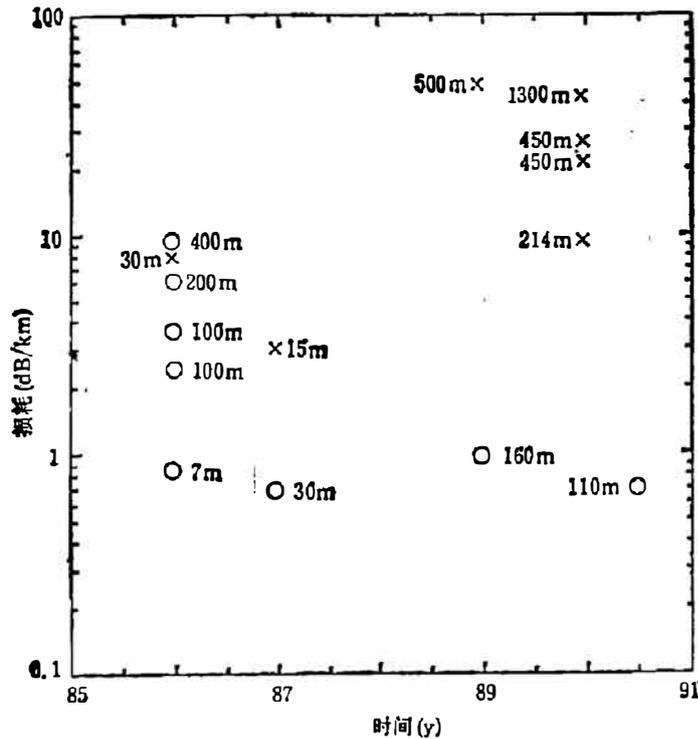


图7 氟化物玻璃光纤损耗图  
○ 多模光纤, × 单模光纤

Fig. 7 Optical loss diagram of fluoride glass fibers

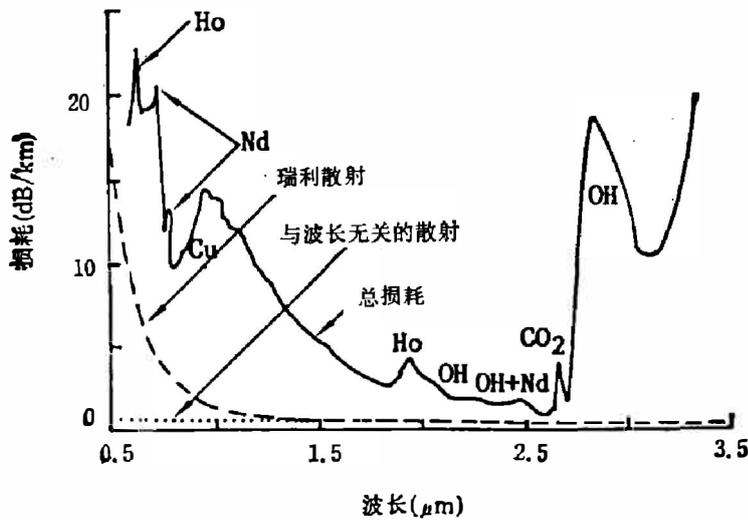


图8 110 m 光纤的总损耗

Fig. 8 Total optical loss of fluoride glass fiber of 110m length

dB/km<sup>[13,14]</sup>. 所以目前的损耗主要是杂质吸收损耗. 表4列举了目前可能达到和已经达到的原料中杂质含量, 以及由此引起的在 2.55 μm 的吸收损耗. 由此带来的玻璃中的总损耗值约为 0.188 dB/km<sup>[15]</sup>.

本征的散射损耗来源于瑞利散射, 它与材料的平均极化率的起伏有关. 根据理论估算, 瑞利散射在 2.55 μm 波长处为 0.007 dB/km<sup>[16]</sup>. 将可见光区域测定的结果, 根据与 1/λ<sup>4</sup> 的关系, 外推至 2.5 μm 波长, 可得目前氟化物玻璃光纤的瑞利散射损耗约为 0.02 dB/km. 这

是由于宏观的缺陷引起,大部分为析晶、分相、未熔化的氧化物和铂等颗粒的 Mie 散射,它的大小与波长的二次或三次方成反比.我们对玻璃中缺陷的分析,以及与散射损耗的关系做了较多的工作<sup>[17~19]</sup>.发现玻璃中主要是析晶颗粒  $\beta$ -BaZrF<sub>6</sub> 和 LaF<sub>3</sub> 等,尺寸在 1~5 μm 之间. Pt 和气泡的颗粒更小(0.1~1 μm),目前宏观散射和杂质吸收损耗大约各占一半.

用化学气相纯化和升华等方法,提高氟化物原料的纯度,使杂质的总含量控制在 10 PPb 以下,而且消除 >1 μm 的宏观散射颗粒,在近期内使氟化物玻璃光纤的损耗低于目前熔石英玻璃光纤的损耗(0.15 dB/km)是可以实现的.根据分析和判断我们认为在 2.56 μm,氟化物玻璃光纤的最低损耗约为 0.035 dB/km,这要求消除亚微米散射颗粒,把阴、阳离子杂质含量分别控制在 0.1 和 5 PPb.这还要经过多方面的努力<sup>[20]</sup>.另外还需要解决拉制有足够机械强度的长的光纤(>10km).

### 3 2~5 μm 红外半导体激光器的发展

现有光纤通信用的 0.85 μm GaAlAs/GaAs 和 1.3~1.55 μm GaInAsP/InP 异质结

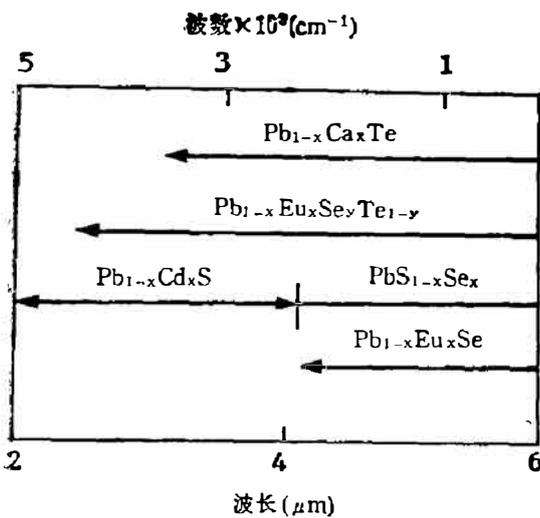


图 9 II~VI 族铅盐材料的光谱范围

Fig. 9 Spectral response range of II~VI group lead salt materials

激光器皆已商品化,而为 2~5 μm 红外光纤通信用的半导体激光器还正在研究中.实现 2~5 μm 波段中红外激光输出最有希望的材料是 IV~VI 族铅盐化合物及 III~V 族的 GaSb 基化合物.

#### 3.1 铅盐化合物半导体激光器

铅盐材料主要用  $Pb_{1-x}OdxS$ ,  $Pb_{1-x}OdxS_{1-y}Se_y$  和  $PbS_{1-x}Sex$  以及最近发展的  $Pb_{1-x}EuxSe$  和  $Pb_{1-x}EuxSe_yTe_{1-y}$  等.通过改变成分,可以获得 3~5 μm 的激光输出,但小于 3 μm 的铅盐激光器较难实现.图 9 表示上述材料的可调谐的光谱范围.近年来铅盐化合物半导体激光器在 3~5 μm 波段取得了进展,174K(4.4 μm)的激光器可连续工作,280K(3.8 μm)的激光器为脉冲工作<sup>[21]</sup>,它是用 PbTe 单晶做衬底,用 MBE 方法生长的 PbTe 作有源区,PbEuSeTe 作限制层材料的单量子阱激光器.用  $Pb_{1-x}EuxSe_yTe_{1-y}$  作有源区, $x=0.036$ , $y=0.044$  的激光器,目前可在 80K(2.6 μm)脉冲工作<sup>[22]</sup>,这是铅盐化合物半导体激光器能达到的最短波长.近来用 PbSe 单晶作衬底,PbEuSe 材料作限制层,PbSe 作有源区的双异质结激光器也研制成功,连续工作温度已达 174K(2.88 μm).

我们的铅盐化合物半导体激光器的工作集中在  $PbS_{1-x}Sex$  和  $Pb_{1-x}OdxS_{1-y}Se_y$  材料上<sup>[23]</sup>.带宽随组分和温度的变化可近似表达为:

$$E_g(X, Y, T) = 264.5 + 3600X + 140Y + (400 + 0.265T)^{1/2} \quad (\text{meV}).$$

用水平无籽晶气相运输生长技术,生长了具有低位错和合适载流子浓度的 N 型单晶,77K 载流子浓度为  $2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ .用自扩散法做成 P-N 结.用腐蚀做成台面条形激光二极管(见图 10),其性能见表 4.

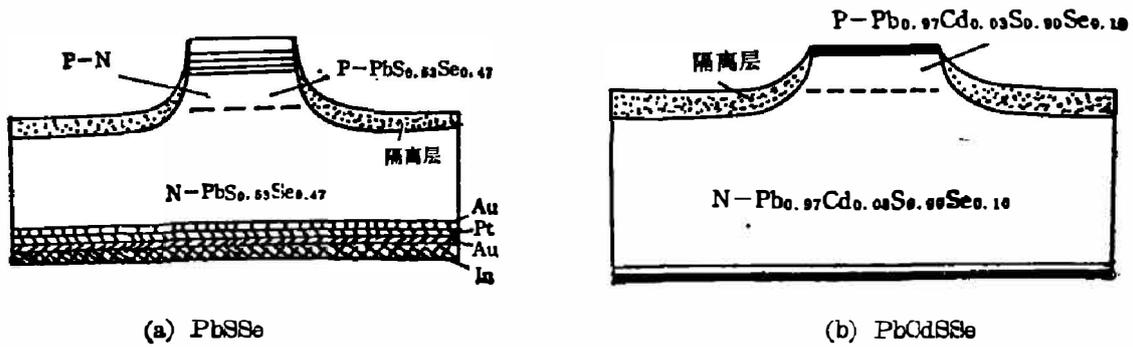


图 10 PbSSe 和 PbCdSSe 二极管激光器条形结构

Fig. 10 Band structure of PbSSe and PbCdSSe diode lasers

表 4 PbCdSSe 和 PbsSe 激光二极管性能

Table 4 Performances of PbCdSSe and PbsSe laser diodes

性能	PbCdSSe	PbSSe
阈值电流 (mA)	400 (15K)	16 (13K)
发射波长 (μm)	3.13	5.5
工作温度 (K)	>90	>30 (cw)
输出功率 (mW)	>1	>1

图 11 表示 PbSSe MH 激光器的发射光谱与阈值电流 ( $I$ ) 和温度 ( $T$ ) 的关系。

### 3.2 III~V 族化合物半导体激光器

从上可知,采用铅盐实现  $2.8 \mu\text{m}$  以下激光输出是较困难的,而目前氟化物玻璃的最低损耗波长为  $2.55 \mu\text{m}$  左右,因此,中红外光纤通信实用化光源的最有希望的材料是 GaSb 和

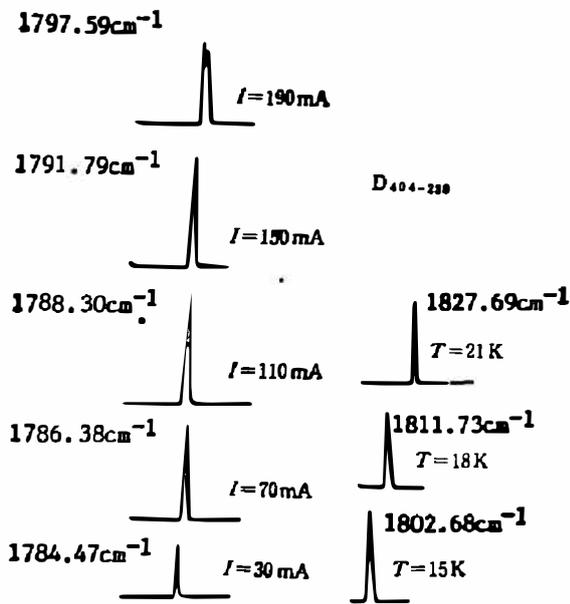


图 11 PbSSe MH 激光器的发射光谱和温度与阈值电流的关系

Fig. 11 Temperature and threshold current dependence of emission spectra of PbSSe MH laser

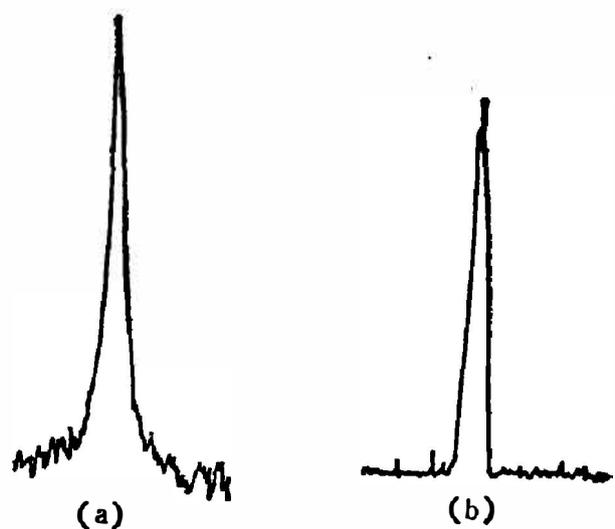


图 12 二极管激光器发射光谱

(a) GaAlAsSb/GaInAsSb DH 激光器  $\lambda_p = 2.063 \mu\text{m}$   
 (b) InAsPSb/InAs SH 激光器  $T_{th} = 0.7 \text{ A}$ ,  $\lambda_p = 3.09 \mu\text{m}$

Fig. 12 Emission spectra of diode lasers.

InAs 基的 III~V 族化合物. 在 GaSb 衬底上用 GaAlAsSb 作限制层, GaInAsSb 作有源层, 已在 2.2 μm (235K) [24] 和 2.55 μm (300K) [5] 做出双异质结(DH)连续激光器, 阈值电流密度在 2~5 kA/cm<sup>2</sup>. 在 InAs 衬底上, 用 InAsSbP 作复盖层, InAsSb 为有源层, 在 3 μm (77K) 获得脉冲激光输出, 阈值电流密度为 3 kA/cm<sup>2</sup> [9, 27]. 除了用 LPE 生长方法外, 还用 MOCVD 和 MBE 方法做出了外延超薄层 [28].

我们选用掺 Te 的 N 型 GaSb 单晶作基片, 用 LPE 工艺成功地做成 GaAlAsSb/GaInAsSb/GaAlAsSb/GaSb DH 激光器. 二极管激光器的发射光谱如图 12 所示. 根据晶格匹配和带宽的要求, 设计了图 13 所示的结构, 并获得表面平整光洁, 结线平直, 层次分明的结面. 采用电极条形和平面条形两种结构, 也制备了 InAsPSb/InAs 单异质结激光器. 激光器的特性如表 5 所示 [23].

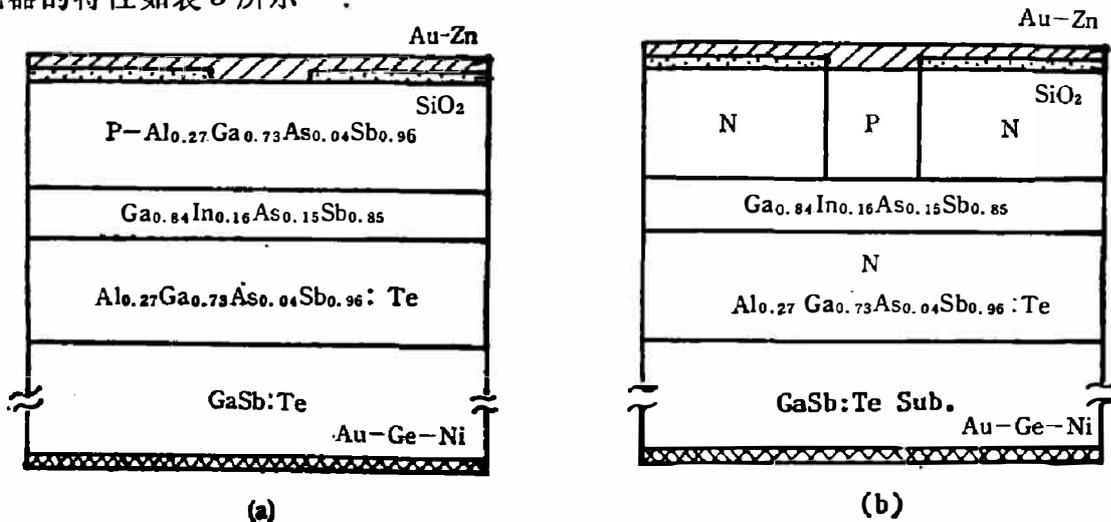


图 13 GaAlAsSb/GaInAsSb DH 激光器结构

(a) 电极条形结构, (b) 平面条形结构

Fig. 13 Structure of GaAlAsSb/GaInAsSb DH laser

表 5 GaAlAsSb/GaInAsSb DH 激光器和 InAsPSb/InAs MH 激光器的特性

Table 5 Performances of GaAlAsSb/GaInAsSb DH and InAsPSb/InAs MH lasers

特 性	GaAlAsSb/GaInAsSb	InAsPSb/InAs
阈值电流密度(kA/cm <sup>2</sup> )	4.8(82K)	0.95(14K)
发射波长(μm)	2.1	3.09
工作温度(K)	>200	
特征温度 T <sub>0</sub> (K)	>44	

综上所述, 要在中红外光纤通信中达到实用, 2~5 μm 半导体激光器必须在室温下连续运转, 要求有低的阈值电流和长的寿命. 目前的半导体激光器还有相当差距. 需要改进衬底单晶的质量, 降低位错密度, 改善 LPE 和 MBE 技术, 降低异质结晶格失配. 为实现 2.55 μm 波段通信, 还需要寻找更合适的材料.

### 4 2~5 μm 中红外半导体探测器

光纤通信系统中对探测器的基本要求是将光信号不失真地转变为电信号而不附加噪

声, 响应率高和响应速度快.  $0.8\sim 0.9\mu\text{m}$  波长范围大都使用硅探测器, 这已实现商品化.  $1.3\sim 1.6\mu\text{m}$  的探测器曾用锗探测器和  $\text{InGaAsP}$  探测器, 近来也有用  $\text{HgCdTe}$  探测器.  $2\sim 5\mu\text{m}$  中红外光纤通信用光探测器正在研究中, 目前主要有两大类型, 即 II~VI 族  $\text{HgCdTe}$  型以及 III~V 族  $\text{GaInAsSb}$  型和  $\text{InGaAsP}$  型.

#### 4.1 HgCdTe 光电探测器

在  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  材料中, 如选择  $x$  为  $0.3\sim 0.5$  基本上能复盖  $2\sim 5\mu\text{m}$  波段, 其次  $\text{HgCdTe}$  的电子迁移率高, 有可能获得渡越时间短, 频率响应宽的探测器. 由于它的电子有效质量小, 本征载流子浓度低, 这样就可能得到反向饱和电流低的探测器, 其噪声小, 探测率高, 又由于  $\text{HgCdTe}$  是一种直接能隙半导体, 吸收系数大, 可获得量子效率高的探测器. 针对  $1.3\mu\text{m}$  和  $1.55\mu\text{m}$  的光通信应用,  $\text{HgCdTe}$  探测器已经实用化<sup>[9,30]</sup>, 例如  $1.3\mu\text{m}$  的探测率达到  $3\times 10^{11}\text{cm Hz}^{1/2}/\omega$ , 响应时间通常为  $5\sim 10\text{ns}$ , 量子效率达到  $80\%$ .

表 6 HgCdTe 探测器性能

Table 6 Performances of HgCdTe detectors

温度(K)	探测率 ( $\text{cm Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ )	响应率 ( $4\times 10^4\mu\text{V}/\mu\text{W}$ )	响应时间(ns)
77	$10^{11}$	$4\times 10^4$	6
275	$10^{10}$	—	—

为了达到快速响应的目的, 器件的结电容要小, 扩散层要薄, 而漂移速度要大. 设计的三层结构的  $\text{HgCdTe}$  器件  $\text{N}^+\text{-N}^-\text{-P}$  如图 14 所示<sup>[31]</sup>. 为了保证有高的探测率, 根据零偏压阻抗与温度的关系, 探测器在低于室温  $20^\circ\text{C}$  下工作可使探测率提高 4 倍. 采用半熔法制备的  $x$  为  $0.29\sim 0.5$  (对应  $E_g$  为  $0.24\sim 0.59\text{eV}$ ) 的  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  单晶片, 经钝化处理后呈 N 型, 电子浓度  $n\leq 1\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ , 迁移率  $\mu>1\times 10^6\text{cm}^2/\mu\text{s}$  ( $77\text{K}$ ). 然后用两次热处理使它转变成 P 型. 用汞原子扩散法形成  $\text{N}^-$  层, 再用硼离子注入形成  $\text{N}^+$  层. 得到工作在  $2\sim 4\mu\text{m}$  的探测器的性能见表 6.

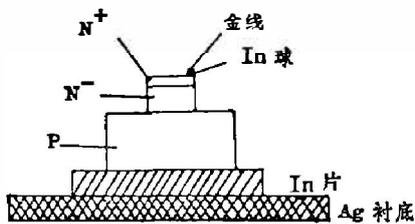


图 14 HgCdTe 红外探测器的结构  
Fi. 14 Structure of HgCdTe IR detector

#### 4.2 GaAsInSb 光电探测器

$\text{GaAlAsSb}/\text{GaInAsSb}/\text{GaSb}$  APD 探测器可用在  $2.5\mu\text{m}$  波长, 接收灵敏度可做到  $-50\text{dB}\cdot\text{m}$ , 通信码速接近  $1\text{Gbit/s}$ <sup>[3]</sup>, 英国电信研究中心(BTRL)报道了  $\text{InAsPSb}/\text{InAs}$  PIN 光电探测器量子效率为  $20\%$ , 波长在  $2.4\mu\text{m}$  时室温接收灵敏度为  $-32\text{dB}$ , 通信码速为  $140\text{Mbit/s}$ <sup>[33]</sup>.

我们研制的  $\text{InAsPSb}/\text{InAs}$  PIN 光电探测器, 室温探测率为  $1\times 10^9\text{cm Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ , 峰值在  $2.6\mu\text{m}$  的探测率为  $3\times 10^9\text{cm Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ , 量子效率为  $\sim 35\%$ , 响应

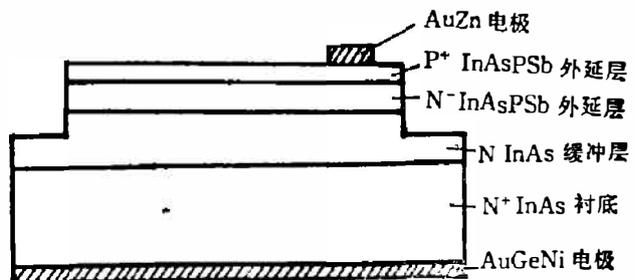


图 15 InAsPSb 探测器结构剖面图  
Fig. 15 Cross-section of InAsPSb detector

时间达 1.2 ns. 77K 时探测率达  $1 \times 10^{10} \text{ cm Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ , 量子效率  $\geq 50\%$  [34], 波长响应范围为 1.0~3.2  $\mu\text{m}$ . InAsPSb 探测器结构如图 15 所示.

2~5  $\mu\text{m}$  的半导体红外探测器估计可以较早实用化, 即在室温下工作, 有较高的探测率 (达到  $10^{11} \text{ cm Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ ) 和较短的响应时间 ( $\sim 1 \text{ ns}$ ). 利用较成熟的 Si 上 GaAs 工艺, 在 GaAs 上直接外延 InAsSb 薄膜, 以达到探测器和信号处理的集成.

## 5 2~4 $\mu\text{m}$ 红外光纤通信试验与展望

随着氟化物玻璃光纤, 中红外激光器和探测器的进展, 西欧主要光纤通信实验室已开始筹建 2~4  $\mu\text{m}$  光纤通信的总体实验. 法国国家通讯研究中心 (ONET) 已用 HF 化学激光器做光源 (输出波长为 2.6  $\mu\text{m}$ ), 用 HgCdTe 半导体探测器检测, 于 1987 年对几十米氟化物玻璃光纤进行了 140 Mbit/s 的信息传输实验 [35]. 英国通讯实验室 (BTRE) 用 Er<sup>3+</sup>:YAG 固体激光器做光源 (输出波长为 2.7  $\mu\text{m}$ ), LiNbO<sub>2</sub> 晶体做外调制, 用 InGaAs 半导体探测器检测, 对 70 m 氟化物玻璃光纤做了速率为 34 Mbit/s 的信息传输实验, 误码率为  $10^{-9}$ ; 还用 He-Ne 激光器 (输出波长为 3.3  $\mu\text{m}$ ) 进行速率为 240 Mbit/s 的信息传输实验; 目前改用 2.55  $\mu\text{m}$  GaInAsSb 半导体激光器做试验 [36]. 瑞典用 PbO<sub>2</sub>S 激光二极管做光源 (输出波长为 3.5  $\mu\text{m}$ ) 进行了光通信实验 [37]. 我国正在进行用上述自行研制的 GaAsInSb/GaSb 半导体激光器, HgCdTe 和 InAsPSb/InAs 半导体探测器以及损耗约为 50 dB/km 的氟化物玻璃光纤进行红外光纤通信的总体试验. 在 1~3 MHz 的调制频率下进行图象传输试验.

综上所述, 超长波长 (2~4  $\mu\text{m}$ ) 红外光纤通信是当前的重要前沿科学领域, 希望首先在材料和元件上有所突破. 预计今后 2~3 年内 2~4  $\mu\text{m}$  半导体激光器和探测器可以做到室温条件下连续运转, 调制频率可达到 1 GHz, 响应时间为 1 ns, 今后 5 年内可以实用化. 氟化物玻璃光纤的损耗在改进目前的工艺情况下, 有可能在今后 2~3 年内降至 0.15 dB/km, 今后 5 年内如果能开拓新的制备工艺方法 (如气相沉积法等), 有希望把损耗降到 0.04 dB/km, 光纤长度达到几 km, 那就可以判断, 超长波长红外光纤通信的实用化是 21 世纪的事.

但是, 在发展超长波长红外光纤通信中开发出来的氟化物玻璃光纤, 首先可以用做 2~5  $\mu\text{m}$  的激光传输用, 如 CO 气体激光 (5  $\mu\text{m}$ ), HF 或 DF 化学激光 (3~4  $\mu\text{m}$ ), 以及 Er<sup>3+</sup>、Ho<sup>3+</sup>、Tm<sup>3+</sup> 固体激光 (2~3  $\mu\text{m}$ ); 掺杂稀土玻璃光纤可以做红外光纤激光器和放大器. 2~5  $\mu\text{m}$  是重要的红外窗口, 包含许多气体的吸收峰 (如 NO, OH, NO<sub>2</sub>, NH<sub>2</sub> 等), 半导体激光器和探测器可以在红外遥感, 遥测和传感技术上得到重要的应用.

## 参 考 文 献

- 1 Okoshi T. *Optics & Photonics*, 1990; **1**: 12
- 2 Tran D O, Levin K H. *Proc. SPIE*, 1986; **48**: 618
- 3 Kanami T, Sakaguchi S. *Jan. J. App. Phys.*, 1986; **25**: 1468
- 4 干福熹, 李锡善. 大自然探索, 1987; **6**: 25
- 5 干福熹. 中国科学基金, 1990; **3**: 9
- 6 Tokiwa H, Mimura Y. *J. Light Wave Tech.*, 1985; **LT-3**: 569
- 7 Fonteneau G, Bouaggad A, Lucas J. *Mat. Sci. Forum.*, 1987; **19~20**: 41
- 8 Zhang Lipeng, Gan Fuxi. *Extended Abstracts for 5th Intern. Symp. on Halide Glasses*, 1988; **70**
- 9 Gan Fuxi, Zhang Haiyan. *Glastech. Ber.* 1990; **LXIII K**: 439

- 10 Gan Fuxi. *Proc. SPIE*, 1986; **683**: 25
- 11 Lucas J et al. *Proc. SPIE*, 1990; **1228**: 56
- 12 Carter S F et al. *Electronics Lett.*, 1990; **26**: 2115
- 13 France P W, Carter S F. *Proc. SPIE*, 1986; **618**: 51
- 14 张立鹏, 干福熹, 姜妍彦. *材料科学进展*, 1989; **3**: 360
- 15 Carter S F et al. *VII Intern. Symp. on Halide Glasses*, Lorne, 1991; **4**
- 16 Linwa M E. *J. App. Phys.*, 1984; **55**: 4052
- 17 Gan Fuxi, Chen Quanqing, Lee Ruihua. *J. Non-cryst. Solids*, 1989; **112**: 228
- 18 Li Ruihua, Deng Peizhen, Gan Fuxi. *Proc. SPIE*, 1990; **1327**: 40
- 19 Deng Peizhen et al. *Proc. 7th Intern. Symp. on Halide Glasses*, 1991; 3-1
- 20 France P W et al. *Telecom. Technol. J.*, 1987; **5**: 28
- 21 Partin, D L. *Proc. SPIE*, 1985; **587**: 86
- 22 Partin D L, Thrush C M. *App. Phys. Lett.*, 1984; **45**: 193
- 23 Gan Fuxi, Wang Hallong, *Proc. Fall 1990 Meeting of MRS*, Boston, 1990;
- 24 Caneu C et al. *App. Phys. Lett.*, 1987; **51**: 764
- 25 Bhan J et al. *Proc. SPIE*, 1987; **866**: 126
- 26 Kobayashi N, Horikoshi Y. *Jap. J. App. Phys.*, 1980; **19**: L-641
- 27 Mani H et al. *Electronic Lett.*, 1988; **24**: 1542
- 28 Bougnot B et al. *J. Electrochem. Soc.*, 1988; **135**: 1783
- 29 Shin S H, Pasko J G, Oheung D T. *Proc. SPIE*, 1987; **272**: 27
- 30 Pichard G, Meslage J, Day T N. *ECOC 83-9th European Conf. Opt. Commun.*, p. 479, (editor: Melchior H, Sollberger A.)
- 31 童斐明. 新一代光纤通信(论文集), 上海: 上海科学技术文献出版社, 1989; 21~25
- 32 Benoit J et al. *J. Opt. Commun.*, 1988; **9**: 55
- 33 Garnham R A et al. *Electronic Lett.*, 1988; **24**: 1416
- 34 Zhang Yonggang et al. *Rare Metals*, 1990; **9**: 46
- 35 Ronarc'h D, Guibert M, Pophillat L. *Proc. 6th Intern. Symp. on Halide Glass*, 1989; p. 431
- 36 Garnham R A, Stallard W A, Haigh J. *Proc. 5th Intern. Symp. on Halide Glass*, 1988; p. 52
- 37 Denti R. *Opt. Quantum Electron.*, 1988; **21**: 69

## DEVELOPMENT OF OPTICAL FIBER COMMUNICATION IN THE MIDDLE IR WAVELENGTH REGION (2~5 $\mu\text{m}$ )

GAN FUXI

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

In this paper the development of new fiber communications, especially the long distance fiber communication based on fluoride glass fibers with ultra-low loss, has been reviewed. The progress and problems in the development of fluoride glass fibers have been discussed. The research results of fluoride glass fibers, semiconductor lasers, detectors, and other components used in the IR fiber communication have been reported and the possibility of long distance repeaterless fiber communication analyzed.

**Key words:** fiber communication, infrared, fluoride glass, laser, detector