

# 光 纤 通 信

1980-2

上海光通信会战办公室情报组

## 长波段光纤通信的展望

韩复儿

### 一、前言

在光纤研制的初期，认为光纤窗口是在0.85微米波段的附近。碰巧，当时研制的半导体激光器其发光波长也是在这个波段附近。直至目前，光纤通信的各种试验，基本上是在0.85微米的波段附近，并已达到了可以实用的水平。后来发现光纤的传输损耗在1.0~1.7微米的长波段为更小，因此就纷纷研究长波段的光纤通信。综合起来，光纤通信在长波段有以下六个优点：

1. 传输损耗小。这能使光纤通信的中继间距大大地增长。
2. 长波段光纤材料的色散小，这样就可提高光纤通信的传输速率。
3. 为光的复用提供了条件。根据目前的技术已能做到隔200 Å宽复用一個信道，而不影响光传输的质量。在1.0~1.7微米波段处的两端，波长差为700 Å，理论上计算可以复几十条光束，这就能使一根光纤的传输容量提高几十倍，由此可见，发展长波段的光纤通信，就能实现大容量的多路通信传输方式。
4. 光的瑞利散射因波长变长而变小，这是因为光瑞利散射的大小是与 $\lambda^{-4}$ 成比例关系。
5. 容易设计光隔离器，因为在波长大于1.2微米时，光隔离器用的钕铁石榴石法拉第旋转元件的吸收损耗只有0.1分贝/45°。

6. 由于波长变长，满足单模传输条件的光纤芯径和光缆直径也相应增大。这非常有利于单模光纤的连接和制作。

由于长波段光纤通信有如此多的优点，所以在最近二、三年内，国外对研究长波段光纤通信就非常重视。

## 二、长波段的开辟

1970年首次证实了光纤有可能代替同轴电缆而成为新的传输介质，以后，光纤的传输损耗逐年递减，而光纤传输的有效性能逐年提高。图1表示了用光纤传输三次群PCM信号时，其中继间距逐年增长的情况（光纤用半导体激光器，不考虑光纤连接时的损耗）。从图中可知：1974年，光纤传输损耗最小的波段是在0.85微米附近，中继间隔为8公里。从技术上来讲，通过这一阶段的研究工作，已明确了光纤损耗最小的波段是在长波段（即1~1.6微米的

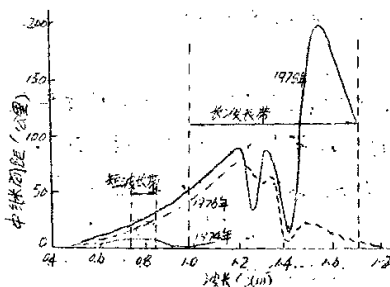


图1 长波段的发展和中继间距的延长

波段)；1976年，光纤传输损耗最小的波段是在1.2微米，中继间隔为80公里，从技术上看，这时已弄清了光纤传输损耗的机理，



电话公司通信研究所扩大长波段半导体激光器波长的历史。

正如前述，半导体激光器首先是在 0.85 微米附近的短波段处被应用，而在 1 ~ 1.6 微米的长波段处正在逐步被扩大应用，那么在更长的波段上其应用将会如何发展呢？这可见图 3 所示：图左侧表示了半导体材料如果成份改变，那么在各自的波段上有可能制成半导体激光器的发光元件（在长波段上，将会是低温下的连续振荡），其中接近于使用范围的就是  $\text{AlGaAs}$  和  $\text{InGaAsP}$ 。图的右侧， $\text{Si IMPATT}$  和电子管其振荡是发生在电磁波的波段范围内，由此可见，在 1.6 微米以上更长的波段上也是有可能利用半导体激光器来作为光纤通信的光源。问题在于这样的波段上，不可能实现光纤低损耗传输的要求。

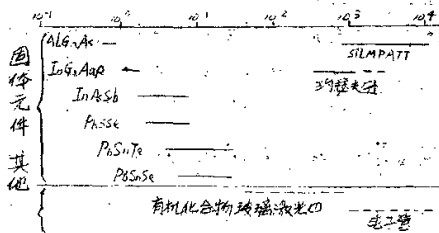


图 3 超长波段固体元件的发展

迄今为止，已实现室温连续振荡的长波段半导体激光器有三种，即  $\text{InGaAsP/InP}$ ； $\text{GaAsSb/AlGaAsSb}$ ； $\text{InGaAs/InGaP}$ 。其中以  $\text{InGaAsP/InP}$  双异质结半导体激光器的性能最好，它将是未来光纤通信中最有希望的光源。其发展过程大致如下：1975

年，美国麻省理工学院林肯实验室用掺铟的  $P-InP(III)$  作衬底，实现了  $P-InP/InGaAsP/InP$  双异质结半导体激光器在室温脉冲相干振荡（波长为  $1.105$  微米，阈值电流密度为  $4\text{KA}/\text{cm}^2$ ，外量子效率为  $17.5\%$ ）。自此以后，研究这种激光器的单位越来越多。不久，日本电报电话公司，东京工业大学及国际电报电话公司等单位也先后实现了室温脉冲相干振荡。1976年3月，美国林肯实验室又采用质子轰击技术，制作了条宽为  $25$  微米的条形  $InGaP/InP$  双异质结激光器，并实现了室温连续相干振荡。振荡波长为  $1.1$  微米，最低阈值电流是  $265$  毫安。在1977年第九次国际固体元件会议上，该实验室又作了这种激光器寿命可达  $8000$  小时以上还未见退化的报告。同年5月，日本国际电报电话公司又研制成振荡波长为  $1.3$  微米，寿命为一万小时以上的  $InGaAsP/InP$  半导体激光器，并作了寿命试验和退化试验，试验结果，在室温连续工作时阈值电流是  $120 \sim 250$  毫安，脉冲工作时约为  $20$  毫安。

由于室温连续振荡寿命超过一万小时的  $InGaAsP/InP$  双异质结半导体激光器的出现，不仅为光纤通信在长波段的实用提供了重要的条件，而且还展示了长波段半导体激光器的发展方向，并已成为长波段半导体激光器研究的主流。目前主要研究长波段半导体激光器的单位有美国麻省理工学院林肯实验室，贝尔实验室，RCA研究所，日本电报电话公司武藏野电气通信研究所，日本国际电报电话公司，东京工业大学（见表1）等。另外，日本富士通研究所、苏联列别杰夫物理研究所、英国普莱塞公司，法国汤姆逊公司等单位也都在研制。

| 研 制 单 位               | 时 间    | 材 料                      | 波 长<br>( $\mu\text{m}$ ) | 寿 命<br>(小时) | 阈值电流或阈值电流<br>密度 ( $\text{KA}/\text{cm}^2$ ) |
|-----------------------|--------|--------------------------|--------------------------|-------------|---------------------------------------------|
| 美国麻省理工<br>学院肯实验室      | 1977 年 | $\text{GaInAsP/InP}$     | 1.15                     | 8000        |                                             |
|                       | " "    | $\text{GaAsSb/AlGaAsSb}$ | 1.15                     | 1500        |                                             |
|                       | " "    | $\text{InGaAs/InGaP}$    | 1.15                     | 1100        |                                             |
| 美国 RCA 研究所            | 1976 年 | $\text{InGaAs/InGaP}$    | 1.06~1.12                |             | 1 $\text{KA}/\text{cm}^2$                   |
| 美国贝尔实验室               | 1975 年 | $\text{GaAsSb/AlGaAsSb}$ | 1.0                      | 11          | 2~2 $\text{KA}/\text{cm}^2$                 |
| 日本 KDD 公司             | 1977 年 | $\text{GaInAsP/InP}$     | 1.3                      | 10000       | 1 $\text{KA}/\text{cm}^2$                   |
| 日本东京工业大学              | 1978 年 | $\text{GaInAsP/InP}$     | 1.2~1.5                  |             | 4~5 $\text{KA}/\text{cm}^2$                 |
| 日本 NTT 武藏野<br>电气通信研究所 | 1977 年 | $\text{GaInAsP/InP}$     | 1.3                      | 3000        |                                             |

表 I 室温连续振荡的长波长双异质结半导体激光器的主要研制单位及水平

## 2 探测器

目前, 研制长波段探测器的材料有锗,  $\text{InGaAs}$ 、 $\text{GaAsSb}$  和  $\text{GaAsP}$  等。这些材料中, 主要是  $\text{InGaAsP}$ , 其次是锗。用这种材料制成的探测器有以下三种: 光电二极管、雪崩光电二极管、肖特基光电二极管。

为了提高光接收的灵敏度, 在很多场合下, 是使用雪崩光电二极管 (APD), 雪崩光电二极管是根据雪崩现象来放大电流的, 其灵敏度高 (即量子效率高), 而且通过放大所产生的噪音和暗电流引起的噪音也较低。

在可见光至波长为 1 微米的波长范围内, 硅雪崩光电二极管 (Si-APD) 的特点是灵敏度高, 而且由雪崩放大产生的噪声也较低, 响应速度快。图 4 表示了用光纤传输 PCM 信号时, 在 0.85 微米的

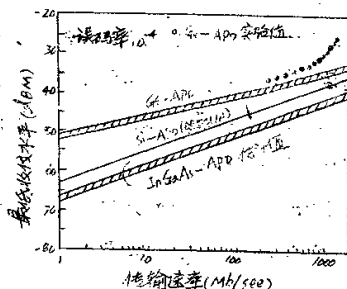


图 4 雪崩光电二极管的最低收信水平

波段处, 各种探测器最低接收电平和传输速率之间的关系。

当波长提高到 1 微米以上时, 由于硅雪崩光电二极管的灵敏度要下降, 因此一般不用硅材料来制作探测器, 而是用锗以及  $\text{InGaAs}$ 。

$\text{GaAsSb}$ 、 $\text{InGaAsP}$ 等Ⅲ-V族化合物半导体材料来制作探测器。其中以锑材料在实际中用得最多。图4也表示了锑雪崩光电二极管 ( $\text{Ge-APD}$ ) 的最低接收电平。在图上的黑圈是表示实验值。由图可知,在0.85微米的波段处,锑雪崩光电二极管的噪声要比硅雪崩光电二极管噪声大5~10分贝,这主要是因为锑雪崩光电二极管的暗电流大而引起的。而在1~1.6微米处的波段上,由于锑材料的频带间隙要比硅材料的频带间隙窄,因此用锑材料制成的雪崩光电二极管的灵敏度要比硅材料制成的雪崩光电二极管要高。另外从图4中还可以看出,迄今为止,由Ⅲ-V族化合物半导体材料制成的 $\text{InGaSb}$ 雪崩光电二极管其收信的最小值也要比锑雪崩光电二极管收信的最小值高。

当前研制1~1.6微米长波段探测器的国家有美国、日本、法国和英国。研制单位有美国的贝尔实验室、林肯实验室、麻省理工学院、加利福尼亚电子材料研究所,罗克威尔研究中心,利诺斯大学、日本电报电话公司的武藏野通信研究所、川岗大学电子研究所、名古屋大学、法国的汤姆逊无线电电报公司研究中心实验室、英国的艾伦克拉克研究中心等。

表I和II分别列出了目前美国、法国、英国、日本等国长波段用光电二极管和雪崩光电二极管的一些性能指标水平。

表II 美国、日本、法国的雪崩光电二极管

| 材料组分                                                                        | 工艺   | 结构               | 响应波长(nm)  | 响应时间               | 量子效率            | 雪崩增益 | 击穿电压              | 时间  | 单位                  |
|-----------------------------------------------------------------------------|------|------------------|-----------|--------------------|-----------------|------|-------------------|-----|---------------------|
| In <sub>0.53</sub> Ga <sub>0.47</sub> As                                    | LPE  |                  | 1.0~1.7   | 10ns               |                 | >100 | 21(伏)             | 78年 | 贝尔实验室               |
| In <sub>0.17</sub> Ga <sub>0.83</sub> As                                    | LPE  | 肖特基<br>位置<br>APC | 1.06      | <200PS             | 50 %<br>30 %    | >250 |                   | 74年 | 林肯实验室               |
| In <sub>0.12</sub> Ga <sub>0.88</sub> As                                    |      |                  |           |                    |                 |      |                   |     |                     |
| As <sub>0.02</sub> Ga <sub>0.58</sub> Al <sub>0.42</sub> Sb <sub>0.98</sub> | LPE  | 台型               | 1.0~1.4   | <60RS              | 75 %            | 17   | 30~40(伏)          | 78年 | 罗克威尔研究中心            |
| In <sub>0.53</sub> Ga <sub>0.47</sub> As                                    | LPE  | " "              | 1.3       | 2~4ns              | 75 %            | 100  | 10nA<br>(暗电流)     | 78年 | 法国汤姆逊无线电<br>报公司研究中心 |
| In <sub>0.76</sub> Ga <sub>0.24</sub> As <sub>0.53</sub> P <sub>0.42</sub>  | LPE  | " "              | 1.2       | 150PS              | 45 %            | 12   | 65~75             | 78年 | 林肯实验室               |
| In <sub>0.89</sub> Ga <sub>0.11</sub> As <sub>0.74</sub> P <sub>0.26</sub>  | LPE  | " "              |           |                    |                 | 8~5  | 57                | 78年 | 日本武藏野通信研究所          |
| InGaAsP                                                                     | LPE  | " "              | 1.6       |                    | 70 %            | <10  | 31~35             | 78年 | 贝尔实验室               |
| In <sub>0.84</sub> Ga <sub>0.16</sub> As <sub>0.34</sub> P <sub>0.66</sub>  | LPE  | 台型和<br>平面型       | 0.98~1.1  | 60ns               | 65 %            | 12   |                   | 78  | 罗克威尔研究中心            |
| In <sub>0.75</sub> Ga <sub>0.52</sub> P <sub>0.48</sub>                     | LPE  | 台型               | 1.06      |                    |                 | 2    | 72                | 79  | 林肯实验室               |
| 锗                                                                           | 平面扩散 | 平面型              | 0.6~1.6   | 100PS              | 42 %<br>(1.3nm) | 50   | 23~33             | 78年 | 日本武藏野通信研究所          |
| In <sub>0.77</sub> Ga <sub>0.23</sub> As <sub>0.51</sub> P <sub>0.49</sub>  | LPE  | 平面自<br>保护环       | 0.94~1.24 | 300PS(上升<br>和下降时间) | 60 %<br>(~15v)  | 3000 | 200PA(暗<br>电流) 35 | 79年 | 日本电气研究所             |



表I 美国、日本、英国的光电二极管

| 材 料 组 分                                                                    | 工 艺 | 结 构 | 响应波长(nm) | 量子效率<br>(10~20) % | 响应时间 | 研 制 单 位      | 研制时间       |
|----------------------------------------------------------------------------|-----|-----|----------|-------------------|------|--------------|------------|
| In <sub>0.70</sub> Ga <sub>0.30</sub> As <sub>0.73</sub> P <sub>0.27</sub> | LPD | 台型  | 0.95~1.4 |                   |      | 名古屋大学        | 78年        |
| In <sub>0.78</sub> Ga <sub>0.22</sub> As <sub>0.47</sub> P <sub>0.53</sub> | "   | "   | 1.17     | 60 %              |      |              |            |
| In <sub>0.72</sub> Ga <sub>0.28</sub> As <sub>0.66</sub> P <sub>0.33</sub> | "   | "   | 1.30     | 65 %              |      |              |            |
| In <sub>0.59</sub> Ga <sub>0.31</sub> As <sub>0.66</sub> P <sub>0.33</sub> | "   | "   | 1.36     | 60 %              |      | 美国贝尔实验室      | 78年        |
| In <sub>0.59</sub> Ga <sub>0.41</sub> As <sub>0.88</sub> P <sub>0.12</sub> | "   | "   | 1.51     | 70 %              |      |              |            |
| In <sub>0.53</sub> Ga <sub>0.47</sub> As                                   | "   | "   | 1.68     | 60 %              |      |              |            |
| In <sub>0.88</sub> Ga <sub>0.12</sub> As <sub>0.25</sub> P <sub>0.75</sub> | "   |     | 1.06     | 22 %              |      |              |            |
| In <sub>0.34</sub> Ga <sub>0.16</sub> As <sub>0.34</sub> P <sub>0.66</sub> | "   | 台型  | 1.05     | 54 %              |      | 加利福尼亚电子材料研究所 | 77年<br>78年 |
| Ga <sub>0.3</sub> Al <sub>0.7</sub> Sb                                     | "   |     | 1.2      | 54 %              |      | 日本电子研究所      | 78年        |
| In <sub>0.88</sub> Ga <sub>0.17</sub> As <sub>0.40</sub> P <sub>0.60</sub> | "   |     | 1.15     |                   |      |              |            |
| In <sub>0.76</sub> Ga <sub>0.21</sub> As <sub>0.49</sub> P <sub>0.51</sub> | "   |     | 1.21     |                   |      | 美国伊利诺斯州大学    | 78年        |
| In <sub>0.73</sub> Ga <sub>0.27</sub> As <sub>0.63</sub> P <sub>0.37</sub> | "   |     | 1.31     | 48 %<br>(在1.27nm) |      |              |            |
| InGaAs                                                                     | VPD |     | 1.15~    | 80 %              |      | 英国艾伦克拉克研究中心  | 78年        |



## 四、其他长波段的器件

### 1. 固体激光器

固体激光器作为光通信的光源，曾经一度被认为能和半导体激光器相媲美。目前它虽有些应用，但应用仍停留在有限的范围内。在出现波长为1微米以上的半导体激光器之前，曾经考虑过把  $\text{AlGaAs}$  固体激光器发出波长为0.8微米的光转换成波长为1.05微米或1.25微米的光来用作长波段光纤通信的光源。固体激光器有光谱纯度高、频率稳定性好的优点，但它不能像半导体激光器那样可直接进行频率的调制，同时输出功率也不够稳定。

在用于固体激光器的晶体上，有杂质添加型和直接化合物型这两种，前者是用激光活性离子作为杂质来置换一部分成为母体的构成离子，后者是把激光活性离子作为晶体的构成离子而包含在晶体内部。杂质添加型代表性的晶体是  $\text{Na}^{3+}$  : YAG，由它产生的激光并不适于作光通信的光源，主要用于激光加工。直接化合物型代表性的例子是把  $\text{Na}^{3+}$  离子作为活性离子包含在晶体内部，即  $\text{LiNdF}_4\text{O}_{12}$  (简称 LNP) 以及  $\text{NdF}_4\text{O}_{12}$ 。现已研究成功用 LNP 的小型 and 稳定的固体激光器。而有关用半导体激光器来激发 LNP 发出激光的一个例子，可具体见图6所示。图6表示了这种激光器的结构和输出的光谱。(图见下页)

### 2 非交互的器件

光隔离器和光循环器之类非交互性的器件在光中继器上是必不可少的，它们都是利用了法拉第效应的非交互性能。如果要制成小型且性能又好的非交互性器件，就要采用法拉第旋转角大而光吸收

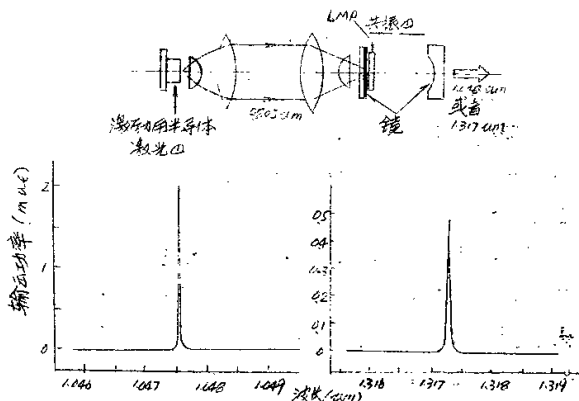


图5 LNP激光器的构造和输出光谱

损耗不大的材料，但具有法拉第旋转角大的 YIG 等磁性体在 0.8 微米的波段附近，由于其不透明，因此光吸收损耗大，故不宜使用。为此就采用了含有稀土元素的磁性玻璃和高性能永久磁铁组合的方法，来制成光隔离器之类的非交互性器件。当波长超过 1.1 微米时 YIG 变为透明了，于是就能利用它来制成小型且性能又好的光隔离器和光循环器。另外，由于目前使用的光纤不具有偏振光的特性，所以在非交互性的器件上，就不应有偏振光的动作。目前已研制成功由 YIG 制成的长波段光纤通信用的光隔离器和光循环器。

### 五、长波段的材料发展过程和动向

长波段的材料在近十年中有了较快地发展。约在 1970 年，首先研究了作为光调制器的衬底材料，同时掌握了拥有光学效应的

$\text{LiTaO}_3$ 、及  $\text{LiNbO}_3$  等光学晶体的培育方法，并且已能做出优质的晶体。其次，为制作快速高效率的光偏振器，又研制成功了  $\text{TeO}_2$  光学晶体。1970年至1975年，为应用全息照相技术来研制信息存储和处理输入装置的需要，开始研究了  $\text{PLET}$  和  $\text{Pb}_2\text{GeO}_{11}$  等光开关材料，以及利用它们的空间调制器等。

在1970年，光技术有二个应用领域，其一是光通信，其二是广义的光信息处理技术。为开辟光信息处理技术的应用领域，就进行了全息照相技术的研究，正由于这样的需要，开始研究了光学晶体、光偏向器、空间调制器等，光技术在这个方向上的应用，由于当时光学信息存储（光记忆材料）的材料没有解决好，所以没有达到预想的进度要求。

从1975年起，开始了固体激光器的晶体研究工作，也就是开展了对  $\text{LiNdP}_4\text{O}_{12}$  晶体的培育工作，同时还研究了使用这种晶体来制作小型和高性能的固体激光器，从此也就证实了固体激光器作为长波段光纤通信用的光源，在技术上是有可能的。此外，也同样于1975年开始，由于  $\text{Tl}$  扩散方法的出现，在  $\text{LiNdO}_3$  等具有光电效应的晶体上，可形成光波导，这样就可制作光调制器和光开关等元件。以后随着长波段光纤通信的发展，培育  $\text{InP}$ 、 $\text{GaSb}$  等优质半导体材料来制作衬底的工艺也就格外重要了，同时，还开始探索了新的其它材料。

以上是长波段材料大致发展过程，今后随着集成光学的进展、光纤通信装置必将沿着下列方向发展：集成各种光器件的光中继器、集成光路、光多路中继器、使用激光记忆装置的图象应答系统……等。

## 六、结束语

随着长波段光纤通信器件的发展,1978年,日本电报电话公司首先成功地进行了长波长53公里的无中继传输实验。在该实验中,采用了芯径为30微米,外径为150微米的梯度型光纤,纤维的典型段长为2.4公里,22根纤维用熔融接续法连接起来,总长为53.35公里,在1.27微米的长波段处,总损耗(包括接头损耗在内)为35分贝,平均损耗达0.66分贝/公里。光源采用12微米条宽的 $\text{InGaAsP}$ 双异结激光器。当室温对它连续振荡于1.27微米的波长,在19°C时,阈值电流为12毫安,而在130毫安驱动电流时输出功率为0.5毫瓦,在阈值电流4毫安以上时,光谱以四个纵横模扩展,其间隔为 $10\text{\AA}$ 。探测器用锗雪崩光电二极管,量子效率为55%,过剩雪崩噪声系数为0.85,在倍增因素为10时,暗电流值是0.5微安。整个实验过程中,光纤通信系统工作得很稳定,没有任何串话,感应杂音以及在接头反射等的任何影响,完全适合于电话局和海峡之间的无中继传输方式。最近,该公司又通过改变激光器发射波长等措施,已实现了62.3公里无中继的传输实验。与此同时,美国、西德、法国等一些国家进行了一系列长波段光纤通信系统的实验,从而完全肯定了光纤通信向长波段发展是必然的趋势。

综上所述,从长波段光纤通信器件的发展来看,目前还处于试验发展阶段,如要付诸实用还存在着不少问题,尤其是在长波段的单模激光器和光电雪崩管等方面尚处于探索阶段,很多问题有待于突破。由此可见,光纤通信的发展势头正方兴未艾,其前景当拭目以待。