

验室已实现了  $3 \times 27\text{km}$  环路上以伪随码  $2.5\text{Gb/s}$  作了  $14000\text{km}$  的无误码(误码率  $< 10^{-12}$ )传输,并作了  $2 \times 2\text{Gb/s}$  的波分复用系统的  $10000\text{km}$  的实验。NTT 则以直路  $20\text{Gb/s}$  脉冲串列传输  $350\text{km}$ ,用  $10\text{Gb/s}$  脉冲串列传输  $1000\text{km}$ ,实现了  $1000000\text{km}$  的超长距离的传

输,并突破了 Gordon-Haus 极限。Nakazawa 等人利用在线同步调制进行  $160\text{Gb/s}$  WDM 孤子信号传输距离超过  $10000\text{km}$ ,后又进行了  $640\text{Gb/s}$  DWDM 孤子传输实验。另有一些较复杂的系统也能做到超长距离上的高码率传输<sup>[2]</sup>,这些实验研究为非线性光纤光孤子通信

的早日实现创造了有利条件。此外在现有线性光纤网上进行光孤子通信也激发了人们的极大兴趣。随着非线性光孤子通信理论和实验研究的不断深入以及技术上的突破,深信实用化的非线性光孤子通信为期不会很远。

### 参 考 文 献

- 1 Leclercetal O. Synchronous WDM Soliton regeneration:Towards 80~160Gbit/s transo-ceanicsystems. *Optical Fiber Technology*,1997, **3**(2):97-98
- 2 钟卫平. 全光非线性孤子通信系统技术. *物理*, 1999,**28**(1):619-623

## A Study on Nonlinear Soliton Communication Technology

WANG Runxuan

(Department of Physics, Baoji College of Arts and Science, Baoji 721007)

**Abstract** Nonlinear Soliton Communication is a brand -new,large -capacity and long -distance communication technology. As a development from the linear communication technology, it is one of the most promising means of communication in the 21st century. This paper introduces the basic principle, the key technology, the current research and the prospect of nonlinear soliton communication technology.

**Key words** Optic-fiber nonlinear, fiber dispersion, soliton, soliton communication

# 用 CO<sub>2</sub> 激光写入制作的长周期 光纤光栅的研究进展

严明 罗隽余 李莉莉

(上海交通大学物理系,上海 200240)

**提 要** 用耦合模理论对长周期光纤光栅进行了简要分析,概要叙述了 CO<sub>2</sub> 激光写入制作的长周期光纤光栅技术的最新进展。

**关键词** 长周期光纤光栅, 耦合模理论, CO<sub>2</sub> 激光

### 1 引言

近年来,长周期光纤光栅 LPPG,(long-period fiber grating)

由于其在光通信和光传感领域的诱人前景而得到广泛研究,它因极低的背向反射和很大的带宽被用

于 EDFA(掺铒光纤放大器)的增益均衡器、带阻型滤波器<sup>[1]</sup>、光谱整形及光纤传感器、与短周期的Bragg

光纤光栅相比,长周期光纤光栅具有更加灵活的写入方法。传统的写入方法是利用光纤在紫外区的光敏性,采用普通光纤载氢后或是在光敏光纤上直接照射 244nm 或 193nm 紫外光并用振幅掩模板写入。但这种方法制作的长周期光纤光栅灵活性较差,成本较高,在温度和应力作用下很不稳定。而近年来的研究表明,CO<sub>2</sub> 激光写入制作的长周期光纤光栅温度稳定性很好。下面就 CO<sub>2</sub> 激光写入制作长周期光纤光栅的方法作重点论述。

## 2 理论

尽管研究长周期光纤光栅有耦合模、有效折射率、传输矩阵等方法,但本文主要采用耦合模理论进行分析<sup>[2,3]</sup>。

在长周期光纤光栅中,芯层中传输的导波光(基模 LP<sub>01</sub>)与同向的包层的辐射模(LP<sub>0m</sub>)发生耦合(也有直接包层模耦合的例子,见后文),所以它是一种波长相关的损耗器件。

考虑到仅有芯层折射率发生了变化,在阶跃折射率光纤中,

$$n(r,z) = \begin{cases} n_1(z) & r \leq a_1 \\ \left[ 1 + \sigma(z) \left[ 1 + m \cos \left( \frac{2\pi}{\Lambda} z \right) \right] \right] & n_2, a_1 < r \leq a_2 \\ n_3 & r > a_2 \end{cases}$$

$\sigma(z)$ 为折射率沿轴向缓慢变化的包络。 $\Lambda$ 为周期。式中  $a_1$ 为纤芯半径,  $a_2$ 为包层半径。

由电磁场波动理论可知基模和包层模的一般耦合模方程可写成

$$\frac{dA^{\text{co}}}{dz} = i\kappa_{01}^{\text{co-co}} A^{\text{co}} + i \sum_v \frac{m}{2} \kappa_{1v-01}^{\text{cl-co}} A_v^{\text{cl}} \exp(-i2\delta_{1v-01}^{\text{cl-co}} z) \sum_v \frac{dA_v^{\text{cl}}}{dz}$$

$$= +i \frac{m}{2} \kappa_{1v-01}^{\text{cl-co}} A^{\text{co}} \exp(+i2\delta_{1v-01}^{\text{cl-co}} z)$$

其中  $\kappa_{01}^{\text{co-co}}$ 为芯层基模的耦合系数,  $\kappa_{1v-01}^{\text{cl-co}}$ 为包层辐射模与芯层基模的耦合系数,  $\delta_{1v-01}^{\text{cl-co}}$ 为微扰系数

$$\delta_{1v-01}^{\text{cl-co}} = (1/2)[\beta_{01}^{\text{co}} - \beta_{1v}^{\text{cl}} - (2\pi/\Lambda)],$$

其中  $\beta$ 为传播常数,  $\Lambda$ 为光栅周期。

运用同周期近似,仅考虑在相位匹配条件附近的情况,边界条件取成

$$A^{\text{co}}(z=-L/2)=1, A_v^{\text{cl}}(z=-L/2)=0,$$

考虑在  $-L/2 < z < L/2$  上,由  $\delta_{1v-01}^{\text{cl-co}} = 0$  可得位相匹配条件  $\beta_{01}^{\text{co}} - \beta_{1v}^{\text{cl}} = (2\pi/\Lambda)$ ,对应芯层与各阶包层耦合的中心共振波长,亦可写成

$$\lambda^m = \Lambda(n_{01} - n_{1v}^m)$$

其中,  $\lambda^m$ 为谐振波长,  $n_{01}$ 为基模有效折射率,  $n_{1v}^m$ 为  $m$ 阶包层模的有效折射率。

可见 LPFG 的光谱上将出现多个损耗峰,对应于各阶包层模。特别是对于 CO<sub>2</sub> 激光写入的光栅,实验中清楚地看到模场耦合的情况。

## 3 实验进展

CO<sub>2</sub> 激光写入长周期光纤光栅就目前研究情况看来,多集中于逐点写入法。逐点写入法是将光纤置于精密电控微动平台上,激光经透镜聚焦后照射到光纤上,通过计算机控制平台或光束的移动来写入

光栅(图1)。

### 3.1 CO<sub>2</sub> 激光写入纯硅芯的特种光纤

Fujikura公司的光电子实验室对纯硅芯光纤进行了研究<sup>[4]</sup>,纯硅芯光纤的芯层是纯二氧化硅,包层是掺少量氟的二氧化硅,掺氟的目的是使得包层折射率小于芯层。这种光纤由于包层的软化温度  $T_{\text{clad}}$  低于芯层的  $T_{\text{core}}$ ,在制作拉丝过程中施加轴向力使光纤有较大的残余内应力,透镜聚焦后的 CO<sub>2</sub> 激光对光纤的热作用使应力释放,在整个过程中光弹效应导致了折射率的变化(图2)。

实验中,制作的光纤芯层直径 10 $\mu\text{m}$ ,包层直径 125 $\mu\text{m}$ ,CO<sub>2</sub> 激光功率 9W,聚焦光束直径 100 $\mu\text{m}$ ,单次曝光时间 3s,多次曝光后光纤芯层折射率受调制形成周期性结构光栅,光栅周期约为 700 $\mu\text{m}$ 。通过对光纤芯层折射率的测量发现,在热作用前后,其相对折射率变化约为 0.1%。实验还对普通单模通信光纤采用同样的办法写入光栅,则经多次同样曝光后光谱几乎没有变化<sup>[5]</sup>。

在高温下,用这种应力释放方法制成的长周期光纤光栅比一般用光敏性写入的光栅具有更好的温度稳定性,中心波长的变化一般在 0.025nm/°C,一般的光栅则有

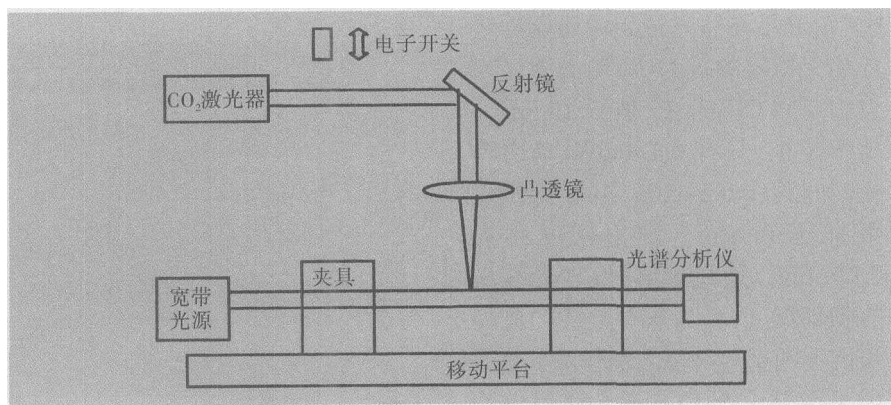


图1 聚焦 CO<sub>2</sub> 激光逐点写入制作 LPFG

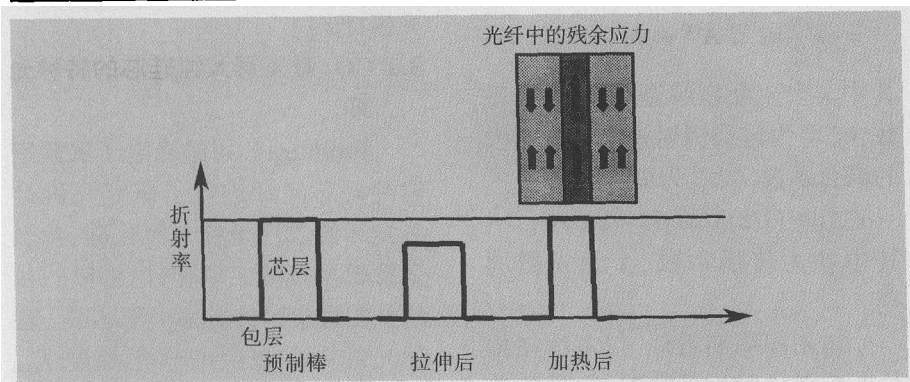


图2 纯硅芯光纤应力释放导致的折射率变化

0.046nm/°C。

此种方法制作的光栅在应力稳定性方面也表现优异,中心波长的变化为 0.1nm/N, 而一般光栅则为 1.1nm/N。

纯硅芯光纤制作的长周期光纤光栅的温度和应力特性可以归于纯硅和掺氟硅折射率随温度和应力变化表现出的不同特性<sup>[4]</sup>。

### 3.2 CO<sub>2</sub> 激光写入 B/Ge 共掺光纤

基本原理也是基于 CO<sub>2</sub> 激光的热作用,不同的是所用的是 B/Ge 共掺光纤,相对于上面的方法,只需要柱透镜聚焦即可,但写入过程中要在两端加上拉力<sup>[9]</sup>。

### 3.3 CO<sub>2</sub> 激光写入普通单模通信光纤

由于上述方法都是针对特种光纤,而通信系统中大量使用的是普通单模光纤。因此在普通光纤上写入长周期光纤光栅的方法也得到发展。贝尔实验室对此进行了研究<sup>[7-9]</sup>,光纤在写入过程中两端始终要加上恒定的拉力,所用的激光为自由空间 CO<sub>2</sub> 激光,波长 10.6μm,功率很小,只有 0.4~0.5W,单次曝光时间约在 0.2~0.3s 之间,聚焦光束直径 140μm,功率密度约为 7.7J/mm<sup>2</sup>。通过观测,发现光纤没有物理形变,可见这种方法的机理可能不同于熔融写入制作法。其原因可能是由于 CO<sub>2</sub> 激光照射点的局部残余轴向应力释放导致折射

率的调制或是 SiO<sub>2</sub> 的局部致密化。光纤光栅写入过程不须载氢<sup>[7]</sup>。

对折射率的测量结果表明,对未载氢的光纤,在入射 CO<sub>2</sub> 激光接触区域的方向上,包层折射率增大,其变化大小约为 0.02%,而载氢的光纤则表现不同,折射率调制周期是写入周期的一半,这些不同就是两种方式(载氢与不载氢)的光谱不同的由来。

实验研究发现,光强的不同导致不同的情况,即有“适度调制”和“强调制”之分,“适度调制”的光栅(写入强度 108mJ/周期),其在 1538nm 处的传输损耗为 -23.9dB,并且随光栅周期数的增加其损耗基本线性增加,而“强调制”的光栅(写入强度 116mJ/周期),单次曝光时间略有增加,随着写入过程的进行,1538nm 处的传输损耗先增加,达到最大耦合强度后因“过耦合”而减小直至消失,与此同时,

1490nm 处的传输损耗逐渐增大到 20dB。对近场模式的测量表明,越靠近共振波长,其模式耦合越强<sup>[9]</sup>。

当在高温下进行退火实验时,这种方法写入的光栅表现出了令人惊异的稳定性,而紫外光写入的光纤光栅在高温下数秒之内就会被擦除<sup>[9]</sup>。

另外,在普通单模通信光纤上用 CO<sub>2</sub> 激光引入锥形结构也能形成长周期光纤光栅<sup>[10]</sup>。

首先将光纤做成直径 15μm、长度 20mm 的锥体,然后用功率为 4W 的 CO<sub>2</sub> 激光一边加热一边以极低的速度拉伸光纤,这样能够形成重复等间距微结构的器件,典型值是周期 280μm,最小直径约 10μm。由于不存在基模,这种光栅是包层模之间强耦合的结果。随着写入周期的增加,一方面光栅中心波长发生变化,另一方面,损耗峰的半高全宽(FWHM)变得极低,在写入 55 个周期后,其半高全宽居然只有 9nm(图 3)。这种方法制作的长周期光纤光栅可用于窄带器件。

### 3.4 高频脉冲 CO<sub>2</sub> 激光写入制作长周期光纤光栅

上述方法均是采用连续 CO<sub>2</sub> 激光脉冲来制作长周期光纤光栅,但国内有报道采用高频脉冲 CO<sub>2</sub> 激光写入制作长周期光纤光栅<sup>[11]</sup>。利用聚焦高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲 1~

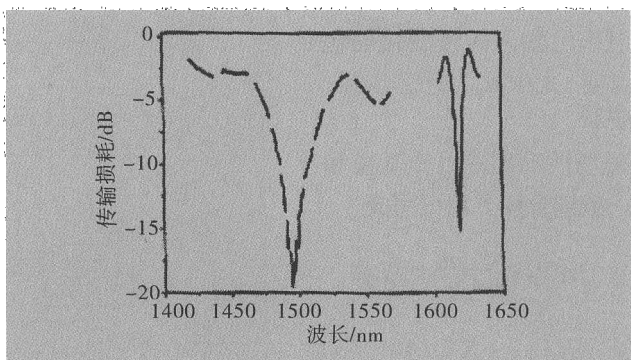


图3 长周期光纤光栅的传输谱线,虚线为 35 个周期 1550nm 附近,实线 55 个周期 1620nm 附近

10kHz 对光纤进行多次曝光,其中 CO<sub>2</sub> 激光被聚焦到 50~60 $\mu$ m 左右以增加单位面积光能量,CO<sub>2</sub> 激光脉冲宽度在 10~20 $\mu$ s 之间,以提高瞬间光能量。所用装置由聚焦高频 CO<sub>2</sub> 激光器、光纤两端的宽带光源和光谱分析仪构成。这一技术解决了现有技术不能进一步提高带阻比这一关键指标的难题。

#### 4 结论

综上所述,CO<sub>2</sub> 激光写入制作长周期光纤光栅方法有多样性,易行性等优点,其机理尚在研究中。这种方法对特种光纤,掺杂光纤和

普通通信光纤都适合。因为 CO<sub>2</sub> 激光引入的一般为光纤的永久不可逆的折射率变化,这种方法制作的长周期光纤光栅温度稳定性都很好。由于采用非敏化技术,大大减低了刻写的预处理工序,且原材料丰富,价格低廉。由于一般采用逐点写入法,设备造价低,可用电脑控制每个周期的长度,这样能一次刻写出不等周期的光纤光栅(如啁啾光栅)。同时也能在同一设备上刻写各种周期的光纤光栅。

对于 CO<sub>2</sub> 激光写入制作长周期光纤光栅的机理现在还没有一个很好的解释,对于特种光纤,主

要的原因是应力释放,但对于几乎没有残余应力的普通光纤,尚无很好的机理解释,人们猜想可能是由于玻璃材料的瞬间致密化导致折射率变化。

长周期光纤光栅作为一种带阻滤波的传输型全光纤器件,可用于 EDFA 的增益平坦,光分叉复用器(OADM)或光交叉互连单元等波长路由器件。由于 CO<sub>2</sub> 激光写入制作的长周期光纤光栅具有低成本,高稳定性特点,必将在全光通信网中得到广泛应用,此外在传感领域,CO<sub>2</sub> 激光写入制作的长周期光纤光栅也将有巨大的应用前景。

#### 参考文献

- 1 Vengsarkar A M, Lemaire P J, Judkins J B *et al.*. Long-period fiber gratings as band-rejection filters. *J.Lightwave Technol.*, 1996,14:58~65
- 2 Erdogan T. Fiber grating spectra. *J. Lightwave Technol.*, 1997, 15:1277~1294
- 3 Erdogan T. Cladding-mode resonances in short- and long-period fiber grating filters. *J.Opt.Soc.Am.A.*, 1997, 14:1760~1773
- 4 Yamasaki X, Akiyama M, Nishide K *et al.*. Characteristics of long-period fiber grating utilizing periodic stress relaxation *IEICE Trans.Electron.*, 2000,E83-C:440~443
- 5 Akiyama M, Nishide K, Shima K *et al.*. A novel long-period fiber grating using periodically released residual stress of pure-silica core fiber. *OFC'98, OSA Tech.Dig.Series*, 1998, 2, THG1
- 6 Han Y G, Park H S, Han W T *et al.*. Temperature stability and mechanical strength of long-period fiber gratings fabricated with CO<sub>2</sub> laser. *OFC'2000,OSA Tech.Dig.Series*, 2000, TuB3-1
- 7 Davis D D, Gaylord T K, Glytsis E N *et al.*. Long-period fiber grating fabrication with focused CO<sub>2</sub> laser pulses. *Electron.Lett.*, 1998, 34:302~303
- 8 Davis D D, Gaylord T K, Glytsis E N *et al.*. CO<sub>2</sub> laser-induced long-period fiber gratings: spectral characteristics, cladding modes and polarization independence. *Electron.Lett.*, 1998, 34:1416~1417
- 9 Davis D D, Gaylord T K, Glytsis E N *et al.*. Very-high-temperature stable CO<sub>2</sub> laser-induced long-period fiber gratings. *Electron.Lett.*, 1999, 35:740~741
- 10 Kakarantzas G, Dimmick T E, Birks T A *et al.*. Miniature all-fiber devices based on CO<sub>2</sub> laser microstructuring of tapered fibers. *Opt. Lett.*, 2001, 26:1137~1139
- 11 饶云江,发明专利:长周期光纤光栅制造方法及装置,公开号 CN 1355440A

### Research Development of Long-period Fiber Gratings Fabricated by CO<sub>2</sub> Laser

YAN Min LUO Shouyu LI Lili

(Department of Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

**Abstract** In this paper, long-period fiber gratings are analyzed by using the coupled mode theory, and recent development of the fabrication technology using CO<sub>2</sub> laser is briefly presented.

**Key words** long-period fiber grating, coupled mode theory, CO<sub>2</sub> laser