

# 新型光纤光栅 的制作、实验及应用研究

The Fabrication, Experiment and Application Research  
of the Novel Fiber Grating

厦门大学博士学位论文摘要库

## 摘要

本文主要以长周期光纤光栅(LPFG: Long Period Fiber Grating)和布拉格光纤光栅(FBG: Fiber Bragg Grating)作为研究对象,在光纤光栅的制作、应用、模式耦合和新器件的开发等方面做了大量、细致的研究。

首先,根据长周期光纤光栅的模式耦合理论,用数值分析的方法来模拟其在不同参数条件下的传输谱线,并与实验结果对照,证明计算结果的有效性。同时,基于测量布拉格光纤光栅的传输谱线,通过数值计算布拉格光纤光栅的色散方程并寻找满足布拉格相位匹配条件的解来得到光纤光栅的纤芯直径和折射率,计算结果在误差范围内符合实际情况,该方法为测量阶跃型光纤光栅参数提供了一种新的途径。在数值计算中通过引入二分法来提高计算效率。

其次,采用紫外光刻的方法在覆盖聚合物的D型光纤(D-Fiber)和拉锥光纤(Tapered Fiber)上制作光纤光栅,取得一定的实验结果。

最后,提出并实现一种克服马赫-曾德(Mach-Zehnder)干涉仪偏置相位漂移所引起信号衰弱的补偿新方法。

**关键词:** 长周期光纤光栅、布拉格光纤光栅、光刻技术、马赫-曾德干涉仪弱信号补偿、二分法数值计算

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## Abstract

The dissertation mainly focuses on the LPFG (Long Period Fiber Grating) and FBG (Fiber Bragg Grating). Many deep researches have been done on the fabrication, application, coupled-mode theory, novel device design of the fiber grating.

In the thesis, firstly the transmission spectrum of LPFG is numerical analyzed under the different condition, based on the coupled-mode theory. Compared with the experimental result, the numerical one proves to be correct. Besides, FBG's core diameter and refractive index are estimated through numerically calculating the dispersion and phase-matching equations, which coefficients come from measuring the transmission spectrum of FBG. The computing result closes to the experimental one, which provides a new method to measure the step-index FBG's parameter. The bisection method is used to improve computing efficiency during the numerical calculation.

Secondly, the novel fiber grating device has been fabricated on the D-fiber and tapered fiber covered by polymer using the method of Ultraviolet Light Photolithography. Much experimental result have been obtained.

Finally, weak signal compensation new method is proposed and realized in Mach-Zehnder interferometer, affected by its bias phase-shift.

**Key Words:** Long Period Fiber Grating, Fiber Bragg Grating, Photolithography, Signal compensation in M-Z interferometer, Bisection method

## 目 录

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 第一章 绪论.....                     | 1  |
| § 1.1 光纤光栅的发展历史.....            | 1  |
| § 1.2 本文的主要工作和创新之处.....         | 5  |
| 本章参考文献.....                     | 6  |
| 第二章 长周期光纤光栅及其模式耦合分析.....        | 7  |
| § 2.1 长周期光纤光栅(LPFG)的制作及其应用..... | 7  |
| 2.1.1 LPFG 的制作方法.....           | 7  |
| 2.1.2 LPFG 的应用.....             | 11 |
| § 2.2 LPFG 模式耦合分析.....          | 15 |
| 2.2.1 LPFG 中的模式和场分布.....        | 15 |
| 2.2.2 模式耦合分析.....               | 19 |
| 2.2.3 模拟计算及其分析.....             | 21 |
| 小结.....                         | 26 |
| 附件 A.....                       | 27 |
| 本章参考文献.....                     | 30 |
| 第三章 基于拉锥光纤和 D 型光纤光栅的制作.....     | 32 |
| § 3.1 设计方案.....                 | 32 |
| § 3.2 光在 D 型和拉锥光纤中传输的基本特点.....  | 34 |
| § 3.3 制作方法及工艺.....              | 35 |
| 3.3.1 D 型光纤和拉锥光纤制作方法.....       | 35 |
| 3.3.2 新器件的制作工艺.....             | 35 |
| 3.3.3 模板制作工艺.....               | 37 |
| 3.3.4 光刻工艺.....                 | 37 |
| § 3.4 实验测量及分析.....              | 38 |
| 小结.....                         | 42 |
| 本章参考文献.....                     | 43 |

|  |    |
|--|----|
| 第四章 模拟计算布拉格光纤光栅等效芯径和折射率 .....          | 44 |
| § 4.1 布拉格光纤光栅的模式耦合 .....               | 44 |
| § 4.2 光纤光栅参数计算方法 .....                 | 46 |
| § 4.3 结果及分析 .....                      | 48 |
| 小结 .....                               | 49 |
| 本章参考文献 .....                           | 50 |
| 第五章 克服 Mach-Zehnder 干涉仪信号衰弱的新方法 .....  | 51 |
| § 5.1 基于 FBG 传感器的解调系统及其信号处理方案 .....    | 51 |
| § 5.2 基于 Mach-Zehnder 干涉仪弱信号补偿方案 ..... | 53 |
| 5.2.1 波长解调原理 .....                     | 53 |
| 5.2.2 M-Z 干涉仪中信号衰弱及其解决办法 .....         | 54 |
| § 5.3 初步的实验结果及分析 .....                 | 55 |
| 小结 .....                               | 56 |
| 本章参考文献 .....                           | 56 |
| 总结与展望 .....                            | 58 |
| 致 谢 .....                              | 59 |

# 第一章 绪论

## § 1.1 光纤光栅的发展历史

光纤光栅(Fiber Grating)是近年来发展极为迅速、应用非常广泛的光无源器件之一。尤其在光通信传输、光传感器、DWDM、激光器等中发挥了非常重要、独特的作用,具有非常广阔的应用前景。

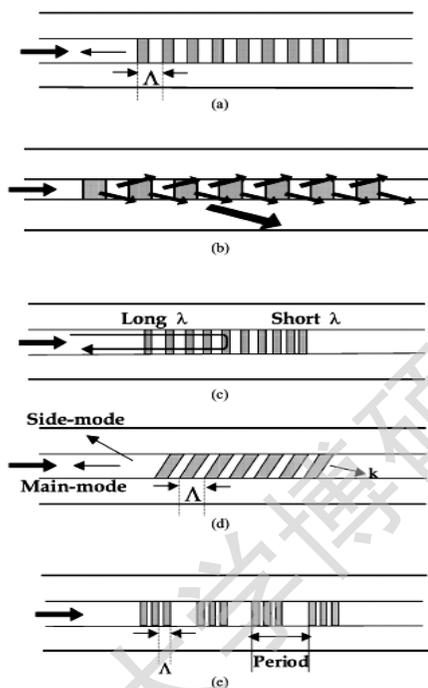


图 1-1 光纤光栅的类型 a) FBG b) LPFG c) 啁啾光栅 d) 闪耀光栅 e) 取样光栅

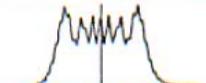
光纤光栅,顾名思义,即利用某种手段使得光纤的物理结构沿轴向呈规律性分布,用来改变光在其中传播路径的一种光学器件。这种物理结构沿轴向主要表现为光纤纤芯折射率的周期性的分布。按照光纤光栅周期的数量级可粗劣分为短周期光纤光栅FBG(布拉格光纤光栅, Fiber Bragg Grating)和长周期光纤光栅 LPFG (Long Period Fiber Grating),对应的周期分别在几个微米和几百个微米左右。当然根据不同纤芯折射率的分布,光纤光栅还可以分成啁啾光栅(chirped fiber grating)、闪耀光栅(tilted fiber grating)、取样光栅(sampled fiber grating)等等。如图1-1所示<sup>[1]</sup>。

1978年,加拿大渥太华通信研究中心(Canadian Communications Research Centre(CRC), Ottawa, Ont., Canada) Hill K.O.<sup>[2]</sup>成功地在光导纤维上写上周期性的光栅,从此第一根光纤光栅诞生了。1988年, Meltz G.<sup>[3]</sup>发明了光纤光栅紫外光(Ultraviolet Light)侧写入技术,开创了光纤光栅实用化的新纪元。这是继掺铒光纤放大器技术之后,光纤通信领域又一巨大的成就。所谓光纤的光敏性是指激光通过掺杂光纤时,光纤的折射率将随光强的空间分布发生相应的变化。如用激光干涉

条纹(全息照相)侧面辐照掺锗光纤,就可得到光纤光栅,但用 500°C 以上高温可擦抹。这种光栅制作简单,在光纤技术、光纤通信、光纤传感中有相当重要的应用。

通常制作布拉格光纤光栅均采用紫外光干涉法、相位掩模法等掺锗光纤或者载氢光纤上写布拉格光栅。通过改变光栅纤芯折射率的调制,来使光栅的传输谱线具有某种特性。如表 1-1 所示<sup>[4]</sup>:

表 1-1 几种光栅的特性

| Fiber grating type     | Refractive index modulation format  | Reflective spectrum format   |
|------------------------|---|--|
| Uniform fiber gratings |    |    |
| Tapered fiber gratings |    |    |
| Chirped fiber gratings |    |    |
| Moire fiber gratings   |   |   |
| Tilted fiber gratings  |  |  |

由于光纤光栅具有很多优点:如插入损耗小、Bragg中心波长反射率高、成本低、抗电磁干扰强、对温度和应力敏感等等,因此光纤光栅被广泛地运用到光通信的各个领域,普遍认为这是继掺铒光纤放大器技术(Er-Doped Fiber Amplifier)之后,光纤通信技术的又一次飞越。

首先,光纤光栅在传感器方面应用的研究已越来越引起人们的重视。这种用紫外光在光敏光纤纤芯中制作的光栅不仅具有易与光纤连接、低损耗、光谱特性好、可靠性高等特点,而且作为传感元件,它还具有其它传感器无可比拟的优点:即用波长来表示感应的信息,并且这个绝对参量不受光源功率的波动或连接、耦合损耗的影响。此外,在一根光纤中可以连续制作多个光栅,一致性非常好,所制得的光

栅阵列与时分复用和波分复用技术相结合，就可作为分布式传感元件埋入材料和结构内部或贴装在其表面，对其温度、压力、应变等实现多点监测。通常情况下 FBG 对应力的敏感表现在布拉格中心波长随应力的漂移<sup>[5]</sup>：830nm 波段约为  $0.64 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 、1300nm 波段约为  $1 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 、1550nm 波段约为  $1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ （其中  $\epsilon$  表示应力的单位，即一米长的光纤被拉长一微米所产生的微小应力，表示为  $1 \mu\epsilon$ ）；而对温度的敏感表现在波长漂移为：830 nm 波段约为  $6.8 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 、1300nm 波段约为  $10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ，1550nm 波段约为  $13 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。因此可以通过测量 FBG 中心波长的漂移量来检测温度、应力；或者通过温度、应力来调谐光栅的中心波长，达到调谐波长的目的。

近年来随着光密集波分复用(DWDM)技术的普及，对光源的线宽和稳定性提出的要求也越来越高。随着光纤制作技术(如材料掺杂)等的进展，特别是Bragg光纤光栅实用化技术的成熟，极大地促进了光纤激光器的研制（其原理图如图1-2所示）。其中光纤光栅作为调谐激光器中心波长的关键器件来实现选择波长的作用<sup>[6]</sup>。例如将 Bragg 光纤光栅作为法布里-珀罗（Fabry-Perot）腔运用到分布反馈激光器中实现稳定的全光纤型DFB激光器<sup>[7]</sup>；或用FBG组成拉曼光纤激光器（如图1-3所示）。此外光纤光栅在LD稳频方面起到重要的作用，如FBG可做泵浦激光器的稳频器（反射镜），其原理如图1-4所示。

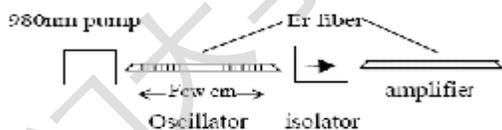


图 1-2 FBG 用在单模激光器原理示意图

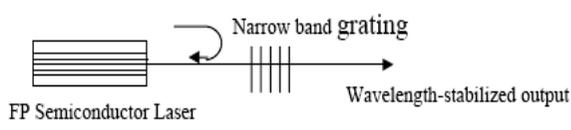


图 1-4 FBG 作为泵浦激光器反射镜

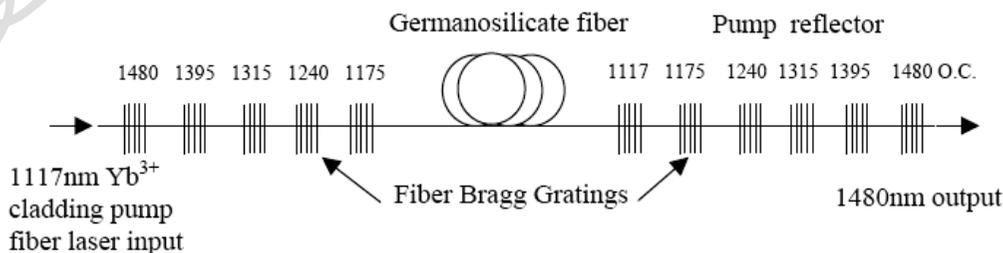


图 1-3 五阶级联 Raman 光纤激光器原理示意图

随着光通信系统比特率需求的增加，信号色散成为影响通信质量的直接原因，因此色散补偿成了一个极为重要的问题。线性啁啾光纤布拉格光栅（Chirped Fiber Bragg Grating）具有很强的色散补偿能力，已被用于高速长距离光纤传输系统的色散补偿的方法（其原理如图1-5所示）。同时FBG还广泛地应用于波峰复用(WDM)的上下路分插复用器(OADM: Optical Add/Drop Multi plexer)中的选波长器件，如图1-6所示。

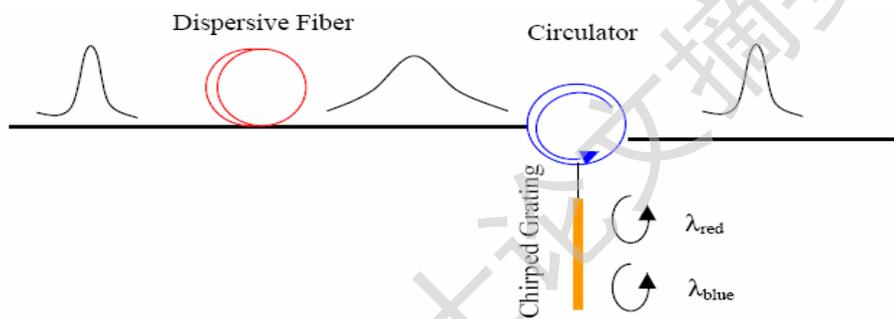


图 1-5 FBG 色散补偿示意图

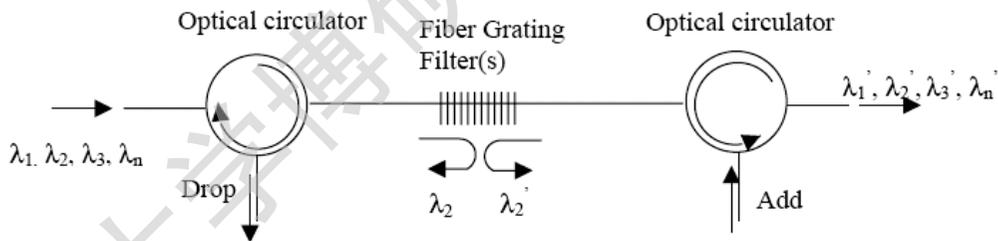


图 1-6 FBG 运用在 OADM 中的原理图

此外，利用长周期光纤光栅结构简单、附加损耗小、带宽大、无背向反射、成本低廉等优点，选择适当的光栅周期，使光栅将一定波长的光耦合至包层而迅速损耗掉，因此作为一种性能优良的滤波器，目前已被广泛地运用在掺铒光纤放大器EDFA增益平坦<sup>[8][9]</sup>。

目前，光纤光栅已经成为光通信领域中研究的热点之一，它将对光纤通信技术的发展 and 进步起到深远的影响。

## § 1.2 本文的主要工作和创新之处

本文对长周期光纤光栅(LPFG)和布拉格光纤光栅(FBG)的制作、应用、以及相关的模式耦合理论进行了深入、细致的研究,并采用数值分析方法对两种光纤光栅的传输特性进行了仿真,计算时将二分法运用到数值求解光纤光栅模式耦合方程、色散方程中,极大地提高了求解效率。此外本文还尝试采用聚合物(Polymer)来作为长周期光栅的包层,并首次采用光刻的方法来实现了新型长周期光纤光栅器件,在实验方面取得了一些进展。同时提出了用 Mach-Zehnder 干涉仪来解调 FBG 传感时测量信号衰弱的新补偿方案。

本文创新之处在于:

1. 首次采用聚合物和振幅模板光刻的方法在 D 型光纤(D-fiber)和拉锥光纤(Tapered fiber)上初步制作出可调谐的新型长周期光纤光栅器件。在国内首次采用我们自行研制的 D 形光纤制作了 Bragg 光纤光栅,并采用一种聚合物(PDMS)涂覆于光纤包层,观察到明显的波长位移现象,为将这种光纤和方法应用于传感及可调器件打下了良好基础。
2. 提出了一种基于布拉格光纤光栅(FBG)的传输谱线,通过数值计算求解阶跃型布拉格光纤光栅的相位匹配条件方程组来计算其纤芯直径和折射率的新方法。
3. 提出一种解决光纤干涉仪检测光纤布拉格波长微小交流变化时偏置漂移的新方法。

## 本章参考文献

- [1] Byoung-ho Lee, "Review of the present status of optical fiber sensors" [J], *Optical Fiber Technology*, 9 (2003): 57-79
- [2] Hill K. O., Fujii Y., Johnson D. C., and Kawasaki B. S., "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication," *Appl. Phys. Lett.*, 32:647-649, 1978.
- [3] Meltz G., Morey W. W., Glenn W. H., Farina J. D., Proc. OFS' 88, Pap. ThBB5-1, pp: 163-166, 1988
- [4] Jiping Wen, "Introduction of fiber gratings", *Final Report for ENEE 785B*, downloaded from Google.
- [5] Rao Y.J., "Fiber Bragg grating sensors: principles and applications" [J], in: K.T.V. Grattan, B.T. Meggitt (Eds.), *Optical Fiber Sensor Technology*, 2: 355 - 389, Chapman & Hall, London, 1998
- [6] Tao Yu; Huafeng Zhao; Shan Huang, et al. "F-P monitoring of FBG external cavity laser diode for DWDM application" [J], *CLEO/Pacific Rim 2003 - The 5th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics*, 1: 230-230, Dec. 2003
- [7] Winnall, S.T., Lindsay, A.C., "DFB semiconductor diode laser frequency stabilization employing electronic feedback and Bragg grating Fabry-Perot interferometer", *Photonics Technology Letters*, IEEE, 11(11):1357-1359, Nov. 1999
- [8] Harurnoto M., Shigehara M., Suganurna, H. "Gain-flattening filter using long-period fiber gratings", *Journal of Lightwave Technology*, 20(6):1027 - 1033, June 2002
- [9] Ik-Bu Sohn, Jang-Gi Baek, Nam-Kwon Lee, et al "Gain flattened and improved EDFA using microbending long-period fiber gratings", *Electronics Letters*, 38(22):1324-1325, Oct 2000

## 第二章 长周期光纤光栅及其模式耦合分析

### § 2.1 长周期光纤光栅(LPFG)的制作及其应用

#### 2.1.1 LPFG 的制作方法

##### A. 逐点写入法

逐点写入技术是制备长周期光纤光栅的基本方法之一。它是先将紫外光聚焦在光纤芯子的某一点上进行曝光,待曝光完成后将光纤水平移动一个光栅周期的距离再对下一点进行曝光。这一过程不断重复直到写完所有的光栅条纹为止。用来曝光的光源一般采用倍频的 244nm 氩离子激光器、193nm ArF、248nm KrF 准分子激光器<sup>[1]</sup>照射载氢光纤的芯子。这种方法在原理上具有灵活性,对光栅的折射率调制结构可以任意进行设计制作。但用这种方法制作光栅时,只能采用具有光敏性的掺锗石英光纤,而且所形成的光栅热稳定性差。若要在普通光纤中写入光栅,在写入前必须提高光纤光敏性,比如高压氢载、掺杂 GeO<sub>2</sub> 等。在写入后必须对光栅进行退火以消除光栅中的不稳定成分。因此,这样制作的光栅成本高、效率低。随着长周期光纤光栅应用范围的扩展和使用数量的增加,提高制作效率和降低制作成本成为最主要的要求。

##### B. 氟激光写入法

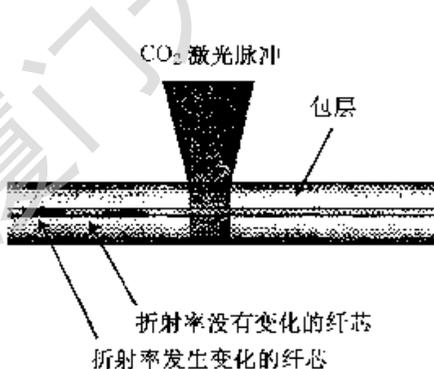
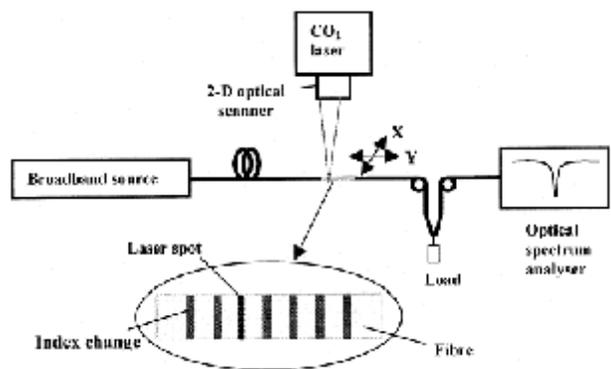
2001 年,Chen K. P. 和 Herman P. R. 等人<sup>[2]</sup>用短波长 157nm 氟(F<sub>2</sub>)脉冲激光器在未载氢处理标准单模光纤上(Corning SMF-28)和载氢光纤上写出强耦合损耗峰(>20dB)的长周期光栅,对应激光每脉冲的功率分别为 2.7mJ/cm<sup>2</sup>和 5mJ/cm<sup>2</sup>。退火处理后的长周期光纤光栅具有强耦合损耗、光谱旁瓣小、边带损耗低等特点,而且该方法制作光栅的速度是 248nm KrF 激光器的 250 倍。

##### C. 聚焦二氧化碳激光脉冲写入法

聚焦 CO<sub>2</sub> 激光是一种在工业和医疗行业广泛应用的激光,用这种激光曝光光纤

可以在纤芯中产生永久性的折射率变化,因此人们用它来制作光栅。贝尔实验室的 Davis 等人<sup>[3]</sup>用波长为  $10.6\ \mu\text{m}$  的聚焦  $\text{CO}_2$  激光脉冲逐点曝光光纤制作了 LPFG, 如图 2-1 所示。实验中所用的单个光脉冲的能量约为  $0.5\text{W}$ , 每点曝光时间为  $300\text{ms}$ 。光纤的位移和准直由计算机精确控制,并在光纤上方安装了成像系统,严密监控光纤,确保光纤在光栅的形成过程中没有变形。这种方法具有高度可控性,可用于普通的通信光纤。当然,与用紫外光源一样,加氢可以提高光栅的写入效率,缩短写入时间。由于用这种光源制作 LPFG 时不存在紫外光吸收,如果光纤没有变形的话,所以产生折射率变化的机理可能是由于聚焦  $\text{CO}_2$  激光脉冲引起玻璃中残余应力的释放和(或)玻璃的致密化<sup>[4]</sup>。该方法的优点是可以在任何光纤上写入长周期光栅,但是制作 LPFG 的效率不高,技术还有待改进。

近来,重庆大学光电工程系的饶云江博士<sup>[5]</sup>采用高频千赫兹  $\text{CO}_2$  激光器在光纤上写上长周期光栅,如图 2-2 所示。与低频  $\text{CO}_2$  激光脉冲写入法<sup>[3]</sup>相比,该方法通过显著提高聚焦在光纤上的能量来有效地提高写入效率,从而使光纤被照射芯子和包层的折射率显著增大。实验采用脉宽调制的 RF 驱动电路控制功率  $10\text{W}$ 、 $5\text{kHz}$ 、 $10.6\ \mu\text{m}$  的  $\text{CO}_2$  激光器(SYNRAD, Inc.),输出的激光束用焦距为  $100\text{mm}$  的 ZnSe 透镜聚焦成直径为  $50\ \mu\text{m}$  的光斑。因此瞬时聚焦在光纤上的能量高达  $6.67\text{W}/\text{ms}$ ,而每个沿光纤轴向上的写入点被照射的能量为  $7.4\text{J}/\text{mm}^2$ ,被照射后光纤用显微镜观察,并

图 2-1  $\text{CO}_2$  激光器写 LPFG 示意图图 2-2  $\text{CO}_2$  激光器写 LPFG 实验装置示意图

没有物理上的变形和破坏，而且所制备出来的长周期光纤光栅对垂直于激光照射方向上的应力不敏感。

#### D. 飞秒激光写入法

2002年, Dragomi r A. 和 Ni kogosyan D. N. 等人<sup>[6]</sup>采用 264nm 高强度  $400\mu\text{J}$ 、飞秒(27 femtosecond)、重复频率为 27Hz 的激光脉冲照射载氢单模光纤(FI excore FORC fiber)。当入射能量为  $300\text{J}/\text{cm}^2$ , 写入周期为  $300\mu\text{m}$ , 周期数为 70 个时, 所写出的长周期光栅在 1355nm 处的损耗峰高达 28dB。

#### E. 振幅掩模法

振幅掩模法<sup>[7]</sup>是制备长周期光纤光栅的另一基本方法。它是使紫外光通过掩模后将掩模图案成像到光纤的芯子上从而实现光纤的写入。这种方法对紫外光源的相干性没有要求, 可实现光栅的批量生产。但不同的光栅需使用不同的掩模板, 制作的灵活性不高。此外, 在用金属掩模板制作光栅时为了缩短写入时间, 准分子激光器必须以很大的功率工作, 一般大功率的激光器比较难获得。

#### F. 离子注入法

用紫外光写入光栅的成本高、效率低。日本的 Fuj i maki 等人<sup>[8]</sup>用离子注入代替紫外光曝光光纤。这种方法将高能量  $\text{He}^{2+}$  离子注入到各种石英玻璃中可产生高达 0.01 的折射率变化! 变化的原理可能是玻璃结构的致密化。利用此特性可制作高性能的光栅。它的缺点也是在包层中会感生很高的折射率变化。不过, 这一缺点可以通过选择窄间距的掩模板, 使离子只注入到纤芯中来解决。

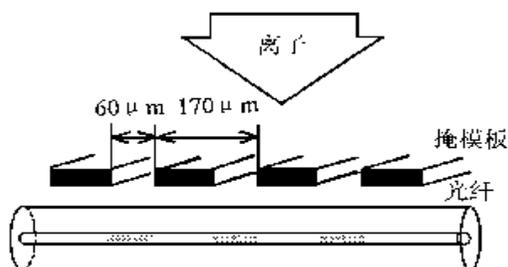
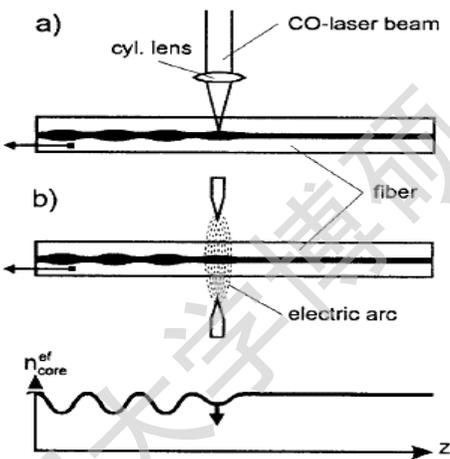


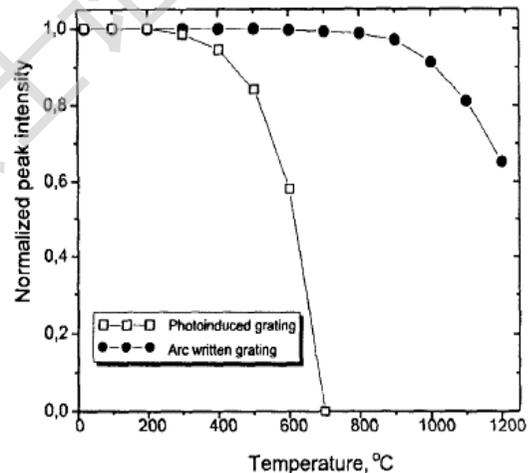
图 2-3 离子注入法实验示意图

## G. 热扩散法

1997年,俄罗斯科技物理学院(General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences)光电研究中心的 Dianov E. M. 等人<sup>[9]</sup>用一氧化碳激光器(CO laser)和电弧加热的方法在芯子掺杂氮的普通光纤上写上长周期光栅。实验采用 SPCVD 法制成阶跃掺氮单模光纤,其芯包折射率差 0.012,截止波长  $0.92\ \mu\text{m}$ ,包层直径  $120\ \mu\text{m}$ 。制作过程中设置 CO 激光器  $800\text{W}/\text{cm}^2$  的强度、照射时间为 1 秒来加热,从而使芯子里的氮有效地扩散到包层里去。实验结果计算出被芯子照射部分的折射率提高了  $3.6 \times 10^{-4}$ 。制出的长周期光纤光栅能够耐热到  $1200^\circ\text{C}$ ,而普通的 UV 光照射掺锗光纤所制作出来的 LPFG 最多只能在低于  $600^\circ\text{C}$  的环境内工作。因此显示了其在



高温下工作的特性。



## H. 蚀刻法

1999年台湾国立大学电子工程系 Lin C. Y. 等人<sup>[10]</sup>用蚀刻的方法制作出长周期光纤光栅。所制作出来的 LPFG 在  $2.2\text{nm}$  的损耗峰漂移范围内,耦合峰值损耗能够在  $1.2\text{dB}$  到  $29\text{dB}$  内通过应力调谐。在制作过程中,无需使用任何光照。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库