

光纤光栅的制作方法*

贾宏志 李育林 忽满利

(中国科学院西安光机所, 西安, 710068)

摘要: 介绍了各种周期性光栅的制作方法, 包括纵向驻波干涉法、横向全息曝光法、点光源写入法、位相母板复制法, 以及非周期性光纤光栅的制作方法, 并分析比较了各种制作方法的优缺点。

关键词: 光纤光栅 啁啾光栅 制作方法

Fabrication methods of fiber gratings

Jia Hongzhi, Li Yulin, Hu Manli

(Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xi'an, 710068)

Abstract: Many methods for fabricating periodic gratings (including standing wave coherent method, transverse holographic method, point-by-point method, phase mask method) and chirped gratings are introduced. The advantages and disadvantages of these methods are compared.

Key words: optical fiber gratings chirped gratings fabrication methods

引 言

光纤光栅由于其在光纤通信、光纤传感及集成光学等领域内巨大的现实和潜在的应用价值而日益受到人们的关注。早在 1978 年, 加拿大通信研究中心的 K. O. Hill 等人用驻波干涉法制成了世界上第一根光纤光栅^[1]。由于这种方法写入效率低, 并且光栅周期完全取决于入射光的波长, 因此, 其后 10 年对光纤光栅的研究并未形成高潮。直到 1989 年, 美国东哈特福德联合技术研究中心的 G. Meltz 等人用 244nm 紫外光双光束全息曝光法成功的制成了光纤光栅^[2], 克服了驻波干涉法的缺点, 从而在世界范围内掀起了光纤光栅的研究高潮。此后, 又出现了更加有效的相位母板复制法和准分子激光单脉冲在线写入法。下面对各种周期性和非周期性光纤光栅的制作方法作一介绍。

1 周期性光纤光栅的制作方法

目前, 制作周期性光纤光栅的方法大致可分为四类: 纵向驻波干涉法、横向全息曝光法、点光源写入法、位相母板复制法。

1.1 纵向驻波干涉法^[1]

这是加拿大通信研究中心的 K. O. Hill 等人首次发现光纤光敏性的方法。它利用注入光纤的入射光和从光纤另一端面返回的反射光在光纤内形成驻波, 经过一定时间曝光后使光纤芯的折射率形成周期性分布而制成光纤光栅。

驻波干涉法制作光纤光栅的优点是装置较简单, 缺点是 Bragg 反射波长仅由写入光波长

*国家自然科学基金资助。

决定,而且写入效率低,光栅很长(Hill的实验中光栅为1m)。

1.2 双光束全息干涉横向写入法^[2~10]

这种方法是1989年美国东哈特福德联合技术研究中心的G. Meltz等人首先实现的。将一小段掺锗光敏裸光纤在两束相干紫外光束交叠区域所形成的干涉场中曝光,引起纤芯折射率的周期性扰动,从而形成光栅,如图1所示。

与纵向驻波干涉法相比,G. Meltz等人提出的紫外双光束全息干涉横向写入法写入效率大大提高,并且可以通过改变两干涉光束之间的夹角来调整光栅的周期,易于获得所希望的Bragg反射波长。但这种方法也有其缺点:一是对光源的相干性要求较高,二是对系统的稳定性要求较高。

采用多脉冲全息曝光技术制作光纤光栅时,在整个曝光时间内,要求干涉条纹沿光纤轴向的漂移小于0.5 λ (λ 为光栅周期, $\lambda = \lambda_B / 2n_0$)。对Bragg波长为800nm的光纤光栅, λ 约为280nm,因此,由机械震动或热漂移引起的分束器、反射镜和调整架产生的小至140nm的位移,都将“洗去”正在形成的光栅。为解决这个问题,美国海军研究实验室(NRL)的C. G. Askins等人在1992年采用单脉冲紫外光全息曝光法制成了Bragg光栅^[3]。实验制成的Bragg光栅长度为2mm,反射波长755~773nm,最大反射率2%。1993年,英国南安普顿大学的J. L. Archambault等人采用单脉冲紫外光全息曝光法制成了反射波长为1550nm、反射率高达99.8%的Bragg光栅^[4,5],他们使用的光栅具有更高的光敏性,单脉冲能量达到40mJ。

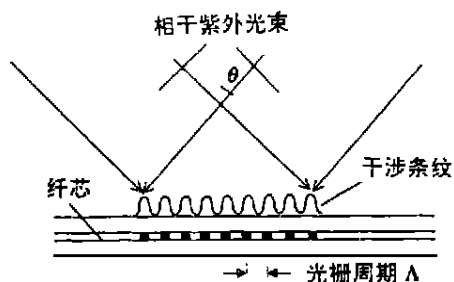


图1 横向全息干涉法写入 Bragg 光栅示意图

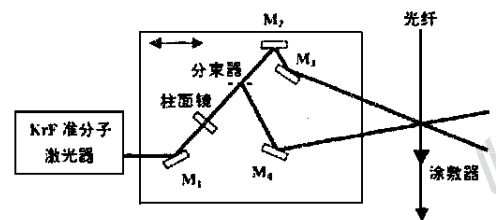


图2 在线写入法实验装置示意图

单脉冲紫外光全息曝光法的提出不仅仅降低了对系统稳定性的要求,更重要的是它使在光纤拉制过程中写入光栅成为可能。假设在光纤拉制过程中光纤的运动速度为1m/s,则在单脉冲持续期间(20ns),光纤仅移动20nm,相对于光栅周期来说(Bragg波长为800nm的光栅,其周期约为280nm),这是很小的。1993年,英国南安普顿大学的L. Dong等人首先报道了他们在光纤拉制过程中采用单脉冲紫外光全息曝光法写入Bragg光栅的实验结果^[6],美国海军研究实验室(NRL)的C. G. Askins等人也于1994年报道了他们相似的实验结果^[7]。图2是在线写入法实验装置图。

由于在线写入法的每个光栅单元都是用单个激光脉冲写入的,因此,其生产率在理论上只受激光器触发速率(几个赫兹)的限制,这就使光纤光栅的大批量低成本的生产成为可能,使光纤光栅技术真正地从实验室走到实际应用中来。

1.3 点光源写入法^[11~14]

这种方法是利用一点光源,沿光纤长度方向等间距地曝光,使光纤芯的折射率形成周期性分布而制成光纤光栅。1990年,加拿大通信研究中心的K. O. Hill等人采用249nm的KrF准分子激光器在光纤中逐点写入栅距为590 μ m的光栅,该光栅可以将光纤中传输的基模耦合到高阶模^[11]。1993年,该研究组又制成了栅距为1.59 μ m的光栅^[12],并在1500nm处观察到三

阶 Bragg 衍射。1998 年, D. D. Davis 等人报道了采用 $10.6\mu\text{m}$ 的 CO_2 激光脉冲逐点写入长周期光栅的方法^[13]。这种方法的优点是灵活性高, 周期容易控制, 可以制作变迹光栅; 对光源的相干性没有要求。缺点是由于需要亚微米间隔的精确控制, 难度较大, 而且受光点几何尺寸限制, 光栅周期不能太小, 适于写入长周期光栅。图 3 是逐点写入光纤光栅实验装置示意图。

1998 年, 香港理工大学的 M. S. Y. Liu 等人采用微透镜阵列将一平行的宽束准分子激光聚焦成平行等间距的光条纹, 投影到光敏光纤上, 在光纤中写入了长周期光栅^[14]。这种方法写入的光栅周期取决于相邻透镜之间的中心间距, 受透镜尺寸的限制, 光栅周期也不能太小, 适于制作长周期光栅。

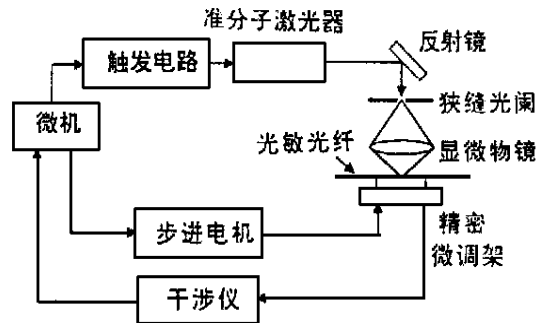


图 3 点光源逐点写入光纤光栅实验装置示意图

1.4 相位母板复制法

这种方法是将光敏光纤贴近位相光栅母板, 利用位相光栅母板近场衍射所产生的干涉条纹在光纤中形成折射率的周期性扰动, 从而形成光纤光栅, 首先在 1993 年由加拿大通讯研究中心的 K. O. Hill^[15] 和美国 AT & T 贝尔实验室的 D. Z. Anderson^[16] 几乎同时分别提出。D. Z. Anderson 采用的是斜入射方法, 即紫外光以一定的倾角照射相位母板, 用此方法得到的光纤光栅的周期与母板的刻蚀周期 P_M 相同。目前更常用的方法是正入射, 通过适当选择母板的刻蚀深度, 可以将零级衍射光强抑制到小于入射光强的 5%, 而 ± 1 级衍射光的能量达到入射光能量的约 40%, 所以, 制作光纤光栅是可以不考虑零级衍射光的作用, 此时光纤光栅的周期 $\Lambda = P_M/2$ 。

用相位母板复制法制作光纤光栅的优点是: 工艺简单, 重复性好, 成品率高, 便于大规模生产; 光栅周期与曝光用的光源波长无关。缺点是母板制作成本较高, 一块母板只能制作一种固定周期的光纤光栅, 但用光学系统放大或拉伸光纤的办法也可制作周期稍有不同的光栅^[17, 18]。

2 非周期性光纤光栅的制作方法^[19~22]

非周期性光纤光栅又称为啁啾光栅(chirped gratings), 其反射带宽比均匀周期的 Bragg 光栅宽很多, 可用于光通信中超高速率色散补偿、超短脉冲压缩或光栅传感器中。啁啾光栅的制作方法, 原则上可分为两大类: 栅距非均匀(即 Λ 随 z 连续变化) 或折射率非均匀(即 n_{eff} 随 z 连续变化)。

1993 年, Byron 等人首次提出制作非均匀光栅的方法^[19]: 采用锥形光栅在均匀周期干涉条纹中曝光, 造成 n_{eff} 随 z 连续变化而形成非均匀光纤光栅, 由此获得的反射带宽为 2.7nm 。此外, 在均匀周期干涉条纹中对弯曲光纤曝光也可获得非均匀光栅^[20], 这时造成光栅周期随 z 变化, 在 7.5nm 的反射带宽范围内可获得大于 99% 的反射率。

1994 年, C. Farries 等人^[21] 提出了一种更加方便而又可控的制作非均匀光栅的方法: 用曲率不等的两波面叠加产生的非均匀干涉条纹对光纤曝光, 以获得非均匀光栅。图 4 是其原理图。

244nm 的紫外光线经分束镜分束后分别被反射镜 M_1, M_2 反射, 然后经过两个不同焦距

的柱面镜(焦距分别为 104nm 和 100nm) L_1, L_2 形成两弯曲的波面,这两个不同曲率的波面经柱面镜聚焦后产生不均匀的干涉条纹,从而在光敏光纤中写入啁啾光栅。通过调节 L_1, L_2 的相对位置,可以调节啁啾光栅的反射带宽。实验中获得了反射率 96%,带宽达 44nm 的啁啾光栅。

用相位母板法也可制作啁啾光栅,曝光时使光纤与相位母板之间成一倾斜角,从而使光纤光栅的周期沿光纤 z 轴方向变化,形成啁啾光栅。也可以在制作母板时使其周期不均匀,用这样的母板也可制作啁啾光栅^[22]。

3 结束语

光纤光栅由于在光通讯、光纤传感及集成光学等领域具有巨大的应用前景而受到广泛关注,目前国内外对光纤光栅制作技术的研究也很活跃。光纤光栅制作技术的研究目标是要做到写入效率高、对光源的相干性要求低、便于工业化生产,啁啾光栅的制作则要求能精确控制啁啾量。

参 考 文 献

- 1 Hill K O, Fujii Y, Johnson D C *et al.* A P L, 1978; 32(10): 647 ~ 649
- 2 Meltz G, Morey W W, Genn W H. Opt Lett, 1989; 14(15): 823 ~ 825
- 3 Askins C G, Tasi T E, Williams G M *et al.* Opt Lett, 1992; 17(11): 833 ~ 835
- 4 Archambault J L, Reekie L, Russell P St J. Electron Lett, 1993; 29(1): 28 ~ 29
- 5 Archambault J L, Reekie L, Russell P St J. Electron Lett, 1993; 29(5): 453 ~ 455
- 6 Dong L, Archambault J L, Reekie L *et al.* Electron Lett, 1993; 29(17): 1577 ~ 1578
- 7 Askins C G, Putnam M A, Friebele E J. Opt Lett, 1994; 19(2): 147 ~ 149
- 8 Kashyap R, Armitage J R, Wyatt R *et al.* Electron Lett, 1990; 26(11): 730 ~ 731
- 9 Fertein E, Legoubin S, Douay M *et al.* Electron Lett, 1991; 27(20): 1838 ~ 1839
- 10 Patrick H, Gilbert S L. Opt Lett, 1993; 18(18): 1484 ~ 1486
- 11 Hill K O, Malo B, Vineberg K A *et al.* Electron Lett, 1990; 26(16): 1270 ~ 1272
- 12 Malo B, Hill K O, Bilodeau F *et al.* Electron Lett, 1993; 29(18): 1668 ~ 1669
- 13 Davis D D, Gaylord T K. Electron Lett, 1998; 34(3): 302 ~ 303
- 14 Liu M S Y, Tam H Y, Du W Ch. Proc SPIE, 1998; 3491: 301 ~ 305
- 15 Hill K O, Malo B, Bilodeau F *et al.* A P L, 1993; 62(10): 1035 ~ 1037
- 16 Anderson D Z, Mizrahi V, Erdogan T *et al.* Electron Lett, 1993; 29(6): 566 ~ 568
- 17 Martin J, Ouellette F. Electron Lett, 1994; 30(10): 811 ~ 812
- 18 Rourke H N, Baker S R, Byron K C *et al.* Electron Lett, 1994; 30(16): 1341 ~ 1342
- 19 Byron K C, Sugden K, Bricheno T *et al.* Electron Lett, 1993; 29(18): 1659 ~ 1660
- 20 Sugden K, Bennion I, Molony A *et al.* Electron Lett, 1994; 30(5): 440 ~ 442
- 21 Farries C, Sugden K, Reid D C J *et al.* Electron Lett, 1994; 30(11): 891 ~ 892
- 22 Kashyap R, Mc Kee P F, Campbell R J *et al.* Electron Lett, 1994; 30(12): 996 ~ 997

*

*

*

作者简介: 贾宏志,男,1968年出生。在读博士生。目前主要从事光纤光栅的研究。

收稿日期: 2000-03-24

收到修改稿日期: 2000-05-29

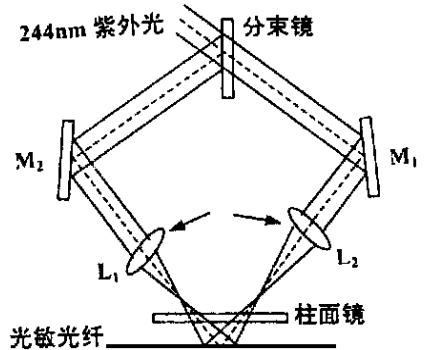


图4 用非均匀干涉条纹写入啁啾光栅装置示意图