

文章编号: 0253-2239(2001)05-0563-04

包层模耦合抑制的 B/Ge 共掺光敏光纤*

龚岩栋 王智 关雅莉 简水生

(北方交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

摘要: 光纤光栅的包层模耦合造成的布拉格波长短波长带损耗限制了光栅的使用范围。分析了同时具有下陷内包层和光敏内包层的光敏光纤可以在相当程度上抑制包层模耦合, 并采用化学汽相沉积工艺制作了硼和锗共掺(B/Ge)的光纤, 在其下陷内包层内也掺入了适量的硼和锗, 具有一定的光敏性, 经用相位掩膜法写入紫外光纤光栅证实该光敏光纤不但具有较大的光敏性, 而且确实抑制了包层模耦合。

关键词: 光纤; 光栅; 光敏性; 包层模; 耦合

中图分类号: TN253 文献标识码: A

1 引言

1978年 Hill^[1]对紫外光纤光敏性的发现和1989年 Meltz^[2]首次用干涉法写出通信波长的光纤光栅给现代光纤通信带来了深刻的变革, 它已被用于制作色散补偿器、滤波器、波分复用器和传感器等各个方面, 光纤光栅在未来的光纤通信系统中所起的作用将是非常重要和无法替代的, 光纤光栅将会有大批量的、极其广泛的应用前景。因此紫外写入光纤光栅技术的研究已是国际上的研究热点^[3]。

光敏光纤则是紫外写入光栅的物理基础, 普通掺杂光纤中的紫外光敏性有限, 不能写出高反射率的光栅, 除非采用氢载等增敏技术^[4]。然而氢载技术不能在拉丝时在线写入光栅, 从而不能大批量快速生产光栅, 并且不在线写入方式降低了光纤的强度。现在已发现硼锗共掺光敏光纤具有非常高的光敏性^[5], 已可能拉丝时在线写入强反射率光栅。但是在一般折射率剖面的光敏光纤中, 正向传播的 LP₀₁模经光栅反射不仅耦合回反向传播的 LP₀₁模, 还会耦合进包层模以及辐射模, 最终泄漏或被高折射率的涂覆层吸收^[6]。这个耦合在布拉格波长的短波长边带产生了一系列损耗带, 在高反射率光栅中尤为严重, 这些损耗带限制了光栅在波分复用系统中的使用^[7]。鉴于光纤光栅的重要性, 因此需要专门研究可抑制包层模耦合的高光敏性光纤。

2 光纤的光敏原理

只有光敏性较强的光纤中才能写出适应现代高速光纤通信需要的高反射率、宽带宽的光纤光栅。图1是在不同的折射率调制量下光栅反射率和带宽的关系。从图可以看出, 要想制作适应于高速通信速率(反射率达100%)的光栅器件, 光致折射率变化量要达10⁻³以上。从色心模型出发, 当光纤中的锗含量越多时, 则锗氧缺陷也就越多, 紫外光敏性也就会越强, 因此含锗浓度较高的高掺锗光纤首先被用于研制光敏光纤, 但锗的高浓度掺杂不可避免地会提高纤芯的折射率(相对折射率 $\Delta > 2\%$), 增大光纤的数值孔径, 又会引发光纤损耗的增大以及与通信光纤接续时的接头损耗。

我们也曾研制过高掺锗的光敏光纤^[8], 但其光敏性不够理想。

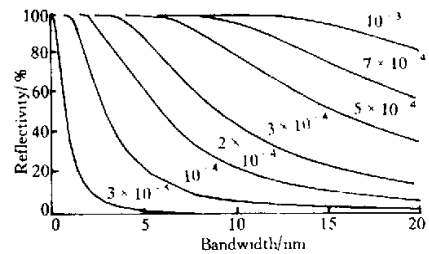


Fig. 1 Grating reflectivity as function of bandwidth for different photoinduced index modulation

硼最初是用来降低光纤包层的折射率, 后来偶然发现即便不用氢载处理, 它与锗共掺也可以大幅度提高光纤的光敏性, B/Ge 光纤现已成为国际上写紫外光纤光栅的首选光纤。B/Ge 光纤的紫外光敏

* 国家自然科学基金(69977003)、高等学校骨干教师资助计划资助项目、北京交通大学论文攀登基金部分资助。

收稿日期: 1999-12-02; 收到修改稿日期: 2000-02-01

性是现在发现的不用氢载处理的光纤中光敏性最高的, Δn 可达 10^{-3} 以上, 远高于普通光纤中的 10^{-5} 和高掺锗光纤中的 10^{-4} 。硼元素增加光敏性的机理尚不能定论, 但有一点是可以定论的, 即光纤中掺入硼后当紫外曝光时会释放应力, 引起较大的调制折射率, 这可以从结构模型得到解释。B/Ge 光纤纤芯中的锗含量仍然是高锗光纤中的锗含量, 但是由于硼能降低折射率, 所以掺入适量的硼使纤芯的折射率降低到了普通单模光纤的高度并与其相匹配, 从而降低光纤接续损耗。

3 包层模抑制原理

光纤中存在导模、包层模和辐射模, 如图 2 所示。若光纤是单模光纤, 则导模只有一个, 即 LP_{01} 模。正向传播的 LP_{01} 模在光栅的作用下, 满足相位匹配条件, 会耦合进反向传播的模式:

$$\beta_{LP_{01}}(\lambda) + \beta(\lambda) = \Omega_z = \Omega \cos\theta, \quad (1)$$

其中 $\Omega = 2\pi/\Lambda$ 为光栅波数, Λ 为光栅周期, θ 角为写入闪耀角, $\beta_{LP_{01}}$ 、 β 分别为正向基模和反向传播模式的传输常数。对于反向传输的各个模式中, 不同的模式在不同的波长处满足上面的匹配条件。所以光纤中的主要能量除了耦合进反向基模外, 还会耦合进反向高阶模式, 即包层模, 并进而辐射泄漏, 从而造成布拉格波长短波长一边较宽范围内的损耗。

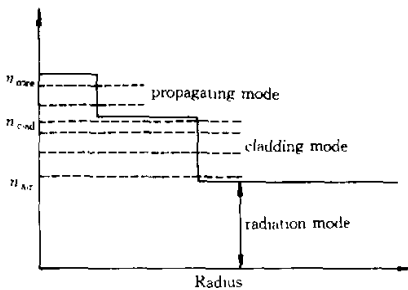


Fig. 2 All modes in fiber

由于基模的模场主要分布在纤芯内, 在包层也会有小一部分; 而包层模主要分布在包层, 在纤芯内也有小一部分。则抑制包层模耦合的方法是在光纤的横截面上, 即在模场重叠区域内制造一个均匀的光敏区域, 使这个光敏内包层是下陷的, 这样它可以减小包层模在纤芯区的分布, 从而减小其与基模的模场重叠面积, 进一步减小包层模耦合。

从耦合理论出发, LP_{01} 和 LP_{mn} 模间的有效折射率耦合调制强度 Δn_{eff} 可表示为^[9]:

$$\Delta n_{\text{eff}} = \iint_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \Delta n(r, \varphi) \psi_{01}(r, \varphi) \psi_{mn}(r, \varphi) r dr d\varphi, \quad (2)$$

其中 $\Delta n(r, \varphi)$ 为光栅的折射率调制深度, $\psi_{01}(r, \varphi)$ 和 $\psi_{mn}(r, \varphi)$ 为 LP_{01} 和 LP_{mn} 模的归一化场强分布。在具有圆对称性的均匀调制光栅中, 通常可以将式中的 $\Delta n(r, \varphi)$ 提出来, 这虽然会有一定的误差, 但并不影响最终的结论。则上式成为:

$$N = \iint_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \psi_{01}(r, \varphi) \psi_{mn}(r, \varphi) r dr d\varphi. \quad (3)$$

从上式可以分析 LP_{01} 模和高阶包层模的耦合情况。归一化耦合因子 N 越大, 则包层模耦合越强, 短波长带损耗越大。 LP_{0n} 模的场分布 $\psi_{0n}(r, \varphi)$ 具有径向对称性, 场强与 φ 无关, 即 $\psi(r, \varphi) = \psi(r)$; 而 LP_{1n} 模场是非对称的, 并且当 φ 改变 180° 时场改变符号, 即 $\psi(r, \varphi) = -\psi(r, \varphi + \pi)$ 。因此对于 LP_{1n} 模, 其归一化耦合因子等于零, 所以在没有写入闪耀角的均匀折射率调制的光纤光栅中, 不存在 LP_{01} 模和反向传播的 LP_{1n} 模之间的耦合。因此在没有闪耀角的均匀调制的光纤光栅中, 包层模损耗是由 LP_{01} 模和反向传播的高阶 LP_{0n} 模之间的耦合造成的。

用 Galerkin 方法计算光纤的特性参数^[10], 并用 (3) 式计算不同参数情况下的耦合因子。光纤结构是 W 型, 纤芯高度是绝对折射率差 $\Delta n = 4.5\%$, 纤芯半径为 $4 \mu\text{m}$ 。图 3、图 4 则分别是在不同的下陷包层深度和宽度下的耦合关系。图中各条曲线除最上的为反向 LP_{01} 模的耦合系数外, 另 7 条曲线从下至上依次 LP_{02} 模、 LP_{03} 模直到 LP_{08} 模。

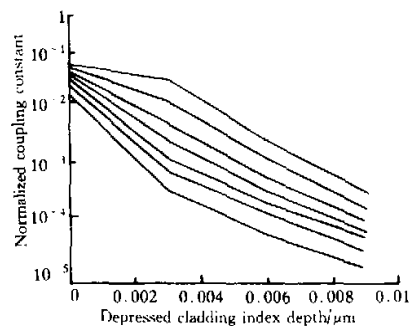


Fig. 3 The dependence of N for the first eight LP_{0n} modes at different depressed cladding refractive index depth (fiber core radius $4 \mu\text{m}$ while inner clad radius $8 \mu\text{m}$)

模拟结果表明当内包层折射率下陷深度越深、包层越宽时, LP_{01} 模越限制于纤芯, 高次 LP_{0n} 模越

分布于包层;则 LP_{01} 模和反向 LP_{01} 模的耦合因子越大,而 LP_{01} 模和反向的高次 LP_{0n} 模间的耦合因子越小,包层模耦合损耗越小。因此我们设计的新型光纤结合上面两种方案,既具有光敏内包层,又是折射率下陷的,即内包层也是由硼锗共掺制成,但最后的折射率低于纯 SiO_2 的外包层,而且折射率越低,下陷区越宽对抑制包层模损耗越有效,但硼的掺入量要考虑光敏性大小的适配。

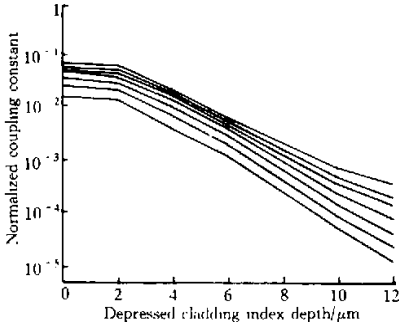


Fig. 4 The dependence of N for the first eight LP_{0n} modes at different depressed cladding refractive index width (fiber core radius $4 \mu\text{m}$ while inner clad index depth 0.002)

4 测试结果

从前面的分析可知,为了抑制包层模耦合损耗,下陷区越深、越宽,效果越好,但考虑到实际的化学汽相沉积工艺的限制,以及考虑到为了得到较大的下陷深度而尽量在包层掺入硼时反而会降低光敏性,因此内包层下陷深度不能太深。同时设计合理的加下陷包层的多包层光纤结构还可以降光敏光纤的温度系数一个数量级以上。

采用化学汽相沉积工艺,使用 BCl_3 和 $GeCl_4$ 作为掺剂。纤芯掺入摩尔分数为 0.1 的 GeO_2 和摩尔分数为 0.2 的 B_2O_3 ,内包层掺入摩尔分数为 0.02 的 GeO_2 和摩尔分数为 0.04 的 B_2O_3 ,保持下陷包层宽度与纤芯半径宽度比为 2 。由于硼元素独特的物理化学性质,沉积较为复杂,沉积折射率剖面不易控制。而由于硼和锗元素在芯、包层中的掺入量的肯定不同而要求包层与纤芯具有同等的光敏性也是比较困难的。另外我们在光纤制作的缩棒过程时,可以通过控制还原条件,如通入氢气等,增大光纤的光敏性;而光纤在拉丝时增大拉丝应力可以提高光敏性。图 5 为我们制作的 B/Ge 共掺的光纤预制棒折射率剖面。但在试制过程中发现 B/Ge 光纤在拉丝时纤芯折射率会下降,下降量与硼和锗的浓度比有

关,下降的原因可能与硼的熔点较低有关,因此制作的光纤预制棒的折射率高度比最终光纤中要大,约为 5.5% 。最后拉出的光纤的纤芯折射率高度可降为 4.5% ,与普通单模光纤的一样高以减小接续损耗,光纤中 LP_{11} 模的截止波长是 1210 nm 。当用来写入掺铒光纤放大器的 980 nm 抽运源用光栅时,预制棒的纤芯高度应略高一些并要进行进一步的套管,以使 LP_{11} 模的截止波长位于 900 nm 左右。

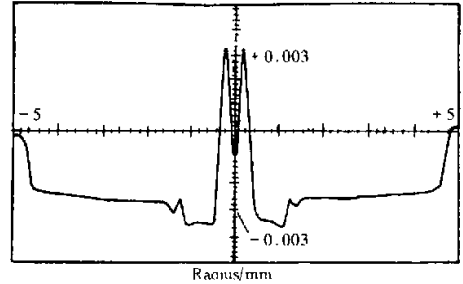


Fig. 5 Index profile of B/Ge codoped photosensitive fiber preform

不用氢载处理,采用相位掩膜法在光敏光纤中写入紫外光纤光栅,使用 248 nm 波长宽带 KrF 准分子激光器照射,每个脉冲 140 mJ ,脉冲重复率 5 Hz ,垂直于光纤曝光时间约 3 min 。为了在密集波分复用系统中使用,包层模耦合、带宽和反射率都要求考虑。写出的 14 cm 长的均匀光栅反射率可达 21 dB 以上, 3 dB 带宽为 0.18 nm 。

图 6 是用我们研制的 B/Ge 共掺光敏光纤中写入光栅的透射谱。如果去除掺铒光纤放大器光源本身的功率不平坦性,最大包层模的耦合损耗低于 1.0 dB ,远小于在同样情况下用氢载的普通光纤中写入光栅时的 $2 \text{ dB} \sim 3 \text{ dB}$ 的包层模耦合损耗。实验还发现,B/Ge 光敏光纤具有比氢载光纤更大的光敏性,曝光 1 s 即出现反射峰, 45 s 时达到 8 dB 的反

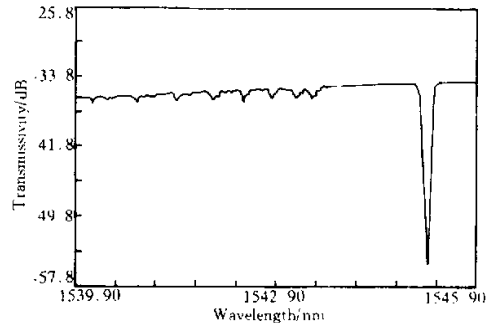


Fig. 6 Transmission spectrum of gating written in B/Ge fiber

射率;而在同样情况下,对氢载的 Corning SMF-28 光纤,4 s 出现反射峰,90 s 达到 8 dB 的反射率。另外在传统的氢载光纤中,为使光谱稳定,后期的退火处理是必须的。而本光敏光纤则免除了光纤的前期氢载和后期退火的处理。实验中还发现使用标准的匹配包层光纤(Corning SMF-28)写入光栅时,当有一定的写入闪耀角时,虽有短波长带的包层模耦合损耗,但没有所谓的“鬼”光栅出现,即不会出现一个或多个与布拉格波长反射率相当的反射峰。而带下陷包层的光纤则当有一定的写入闪耀角时可能会出现“鬼”光栅,这是由于耦合进了反向高阶 LP_{1n} 模所致。

总结 分析了同时具有下陷内包层和光敏内包层的光敏光纤可以抑制包层模耦合损耗,采用化学汽相淀积光纤生产工艺制作了优化结构的硼和锗共掺(B/Ge)的带光敏下陷内包层的光纤,经写入紫外光纤光栅证实该光敏光纤确实在一定程度上抑制了包层模耦合。

参 考 文 献

- [1] Hill K O, Fujii Y. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application of reflection filter fabrication. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **32**(10):647~649
- [2] Meltz G, Morey W W. Formation of Bragg gratings in optical fibers by transverse holographic method. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(15):823~825
- [3] Brilland L, Pureur D, Bayon J F *et al.*. Slanted gratings UV-written in photosensitive cladding fibre. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(3):234~236
- [4] Lemaire P J, Atkins R M, Mizrahi V *et al.*. High pressure H_2 loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO_2 doped optical fibers. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(13):1191~1193
- [5] Williams D L, Ainslie B J, Armitage J T *et al.*. Enhanced UV photosensitivity in boron codoped germanosilicate fibres. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(1):45~47
- [6] Hewlett S J, Love J D, Meltz G *et al.*. Cladding-mode coupling characteristics of Bragg grating in depressed-cladding fibre. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(10):820~822
- [7] Oh K, Kim J M, Seo H S *et al.*. Suppression of cladding mode coupling in Bragg grating using $Ge_2O-B_2O_3$ codoped photosensitive cladding optical fibre. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(5):423~424
- [8] Gong Yandong, Li Tangjun, Jian Shuisheng. Research on high Ge-doped fiber with high UV photosensitivity. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 1999, **21**(5):346~348
- [9] Hewlett S J, Love J D, Meltz G *et al.*. Coupling characteristics of photo-induced Bragg gratings in depressed and matched-cladding fibre. *Opt. & Quant. Electron.*, 1996, **28**(10):1641~1615
- [10] Sharma A, Banerjee S. Chromatic dispersion in single mode fibers with arbitrary index profiles: A simple method for exact numerical evaluation. *J. Lightwave Technology*, 1989, (12):1991~1923

B/Ge Co-Doped Photosensitive Fiber with Suppression of Cladding Mode Coupling

Gong Yandong Wang Zhi Guang Yali Jian Shuisheng

(Institute of Lightwave Technology, Northern Jiaotong University, Beijing 100044)

(Received 2 December 1999; revised 1 February 2000)

Abstract: Cladding mode coupling will lead loss on the short wavelength side of Bragg wavelength and thus limits the grating's wide use. A novel photosensitive fiber design is proposed that have both the depressed cladding and the photosensitive inner cladding in the same fiber. It can suppress cladding mode coupling in some extent. B/Ge co-doped fiber grating with depressed cladding also doped with boron and germania was fabricated. The transmission spectrum of written grating in it verified its larger photosensitivity and suppression of cladding mode coupling.

Key words: fiber; grating; photosensitivity; cladding mode; coupling