

长周期光纤光栅谐振波长的特性研究*

舒学文¹⁾ 朱雪梅²⁾ 王青林²⁾ 江 山²⁾ 黄德修¹⁾

1), 华中理工大学光电子工程系, 武汉 430074
2), 武汉邮电科学院固体器件所, 武汉 430074

摘 要 研究了长周期光纤光栅谐振波长与光纤参数及光栅周期的变化关系, 发现高阶包层模与低阶包层模具有完全不同的特点, 在各种参数变化时两者的谐振波长向相反的方向移动。通过实际制作周期分别为 100 μm 和 400 μm 的光栅证实了这种差别。得到了一些有益于长周期光栅设计和制作的结论。

关键词 光纤光栅, 长周期光纤光栅, 谐振波长。

1 引 言

用紫外激光书写在光纤芯中的、周期大于 1 μm 的长周期光纤光栅近两年引起了人们极大的兴趣^[1]。这种新颖的光纤器件可以把芯区传输的导模能量耦合到包层模中从而造成与波长相关的传输损耗, 是一种很好的带阻滤波器。它具有易于制作、附加损耗小、后向反射小、与偏振无关和体积小等优点。长周期光纤光栅可广泛应用于光纤通信和传感领域中, 例如作为掺铒光纤放大器的增益平坦器^[2]、抑制放大器自发辐射噪声的带阻滤波器^[1]、稳定 980 nm 抽运激光器^[1]以及多种光纤传感器^[3]。

长周期光纤光栅作为波长相关的损耗器件, 根据需要设计其谐振波长是一个非常关键的问题。对于此问题虽然已有不少研究者深入探讨过, 但他们大都把注意力集中在导模与低阶包层模的耦合谐振特点上, 而对于导模与高阶包层模的耦合谐振特点的探讨还不充分。例如他们观察到长周期光纤光栅成栅时谐振峰向长波方向漂移, 退火时则向短波回漂^[1]。实际上如下文实验所观察的, 这仅是低阶模的特点。本文在研究长周期光纤光栅的谐振波长与受光纤参数变化及光栅周期影响的情况时, 发现高阶包层模与低阶包层模具有完全相反的变化特点, 并通过制作周期分别为 100 μm 和 400 μm 的光纤光栅从实验上证实了这种差异的存在。本文的结果对于设计制作长周期光纤光栅有一定指导意义。

1 长周期光栅谐振波长的计算

长周期光纤光栅把纤芯中传输的基模(LP_{01} 模)能量耦合到正向传输的包层模(LP_{0m} 模)

* 国家自然科学基金(69587003)资助项目。

收稿日期: 1998-11-27; 收到修改稿日期: 1999-03-26

中，第 m 阶包层模的谐振波长为^[1]

$$\lambda^m = \Lambda(n_{01} - n_{cl}^m), \tag{1}$$

其中 n_{01} 和 n_{cl}^m 分别是基模和第 m 阶包层模的模式有效折射率。由此看出要求出谐振波长，关键是求出各阶模式的有效折射率。因此先考虑弱导近似下，阶跃光纤中 LP 模式有效折射率的求解。为方便起见，先定义下面一些与模式有效折射率 n_{eff} 相关的量：

$$\left. \begin{aligned} u &= r_{co}k_0 \sqrt{n_{co}^2 - n_{eff}^2}, & u' &= r_{cl}k_0 \sqrt{n_{cl}^2 - n_{eff}^2}, \\ v &= r_{cl}k_0 \sqrt{n_{eff}^2 - n_{ex}^2}, & v' &= r_{cl}k_0 \sqrt{n_{eff}^2 - n_{cl}^2}, \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

上式中光纤参数如图 1 所示的来定义， k_0 为真空中的波数，且下文中用 J_n 、 I_n 、 K_n 、 Y_n 来表示各阶通常的或修正的贝塞尔函数。先考察导模 LP₀₁，其场分布为圆对称，沿径向分布为^[5]

$$\phi = \begin{cases} A_0 J_0 u(r/r_{co}), & r \leq r_{co} \\ A_1 I_0 v'(r/r_{cl}) + A_2 K_0 v'(r/r_{cl}), & r_{co} \leq r \leq r_{cl} \\ A_3 K_0 v(r/r_{cl}). & r \geq r_{cl} \end{cases} \tag{3}$$

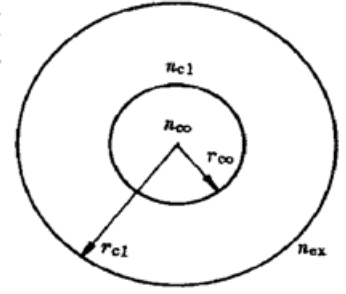


Fig. 1 Profile of a single mode fiber with parameters defined

上式 A_0 为归一化系数，系数 A_1 、 A_2 、 A_3 可由芯与包层交界面的边界条件决定，且可写为下列方程组

$$\begin{vmatrix} J_0(u) & -I_0(v'b) & -K_0(v'b) & 0 \\ uJ_0'(u) & -v'bI_0'(v'b) & -v'bK_0'(v'b) & 0 \\ 0 & -I_0(v') & -K_0(v') & K_0(v) \\ 0 & -v'I_0(v') & -v'K_0(v') & vK_0(v) \end{vmatrix} \begin{bmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} = 0, \tag{4}$$

式中 $b = \frac{r_{co}}{r_{cl}}$ 。要使上式有非零解，其系数矩阵行列式须为零，由此可得到以下色散方程^[5]

$$\frac{J_0(u) - K_0(v'b) K_0(v) + I_0(v')}{J_0(u) + I_0(v'b) K_0(v) - K_0(v')} = \frac{I_1(v'b)K_1(v')}{I_1(v')K_1(v'b)}, \tag{5}$$

这里符号 $\hat{\cdot}$ 表示对贝塞尔函数采取下列运算(Z 即 J、I、K、Y)

$$\hat{Z}_n(x) = Z_n(x) / [xZ_{n+1}(x)]. \tag{6}$$

用数值逼近方法就可求解(5)式，从而可求得导模 LP₀₁ 模的有效折射率。

再来考虑包层模 LP_{lm}。由于通常长周期光栅只有圆对称的 LP_{0m} 包层模与基模有较大的耦合系数^[4]，因而这里只考虑 $l = 0$ 的情形。与导模的推导过程类似，可得包层模的色散方程^[5]

$$\frac{J_0(u) - Y_0(u'b) K_0(v) - J_0(u')}{J_0(u) - J_0(u'b) K_0(v) - Y_0(u')} = \frac{J_1(u'b)Y_1(u')}{J_1(u')Y_1(u'b)}, \tag{7}$$

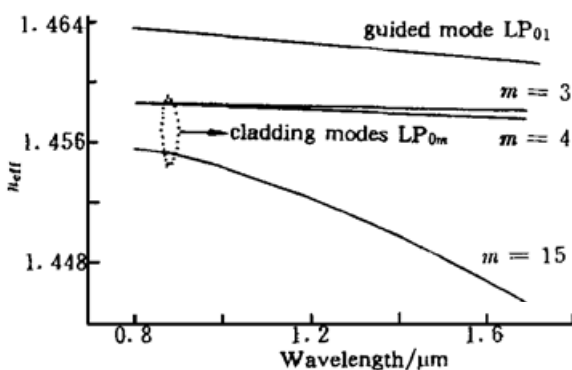


Fig. 2 Plots of effective refractive index of guided mode and cladding modes

可用数值法求解(7)式，从而求出包层模式的有效折射率。图 2 是在假定芯和包层半径分别为 4.15 μm 和 62.5 μm，折射率分别为 1.4648 和 1.4587 的情形下所计算的模式有效折射率随波长的变化曲线，其中仅画出了几个典型模式。

计算得到了有效折射率，就可根据(1)式求出谐振波长的位置。具体采用的方法是将(1)式改写为

$$\Lambda = \frac{\lambda^m}{n_{01} - n_{cl}^m},$$
 然后视左右两边分别为波长的函数

并画出曲线(左边为常数故为直线)，其交点即为谐

振波长位置。

2 长周期光栅谐振波长的变化特点

下面分别讨论光纤参数和光栅周期变化引起长周期光栅谐振波长变化的特点，在讨论光纤参数的每次变化时，都需要用上节的办法来重新求有效折射率。

长周期光纤光栅谐振波长随纤芯与包层的平均折射率差 Δ 的变化如图 3 所示。图中曲线

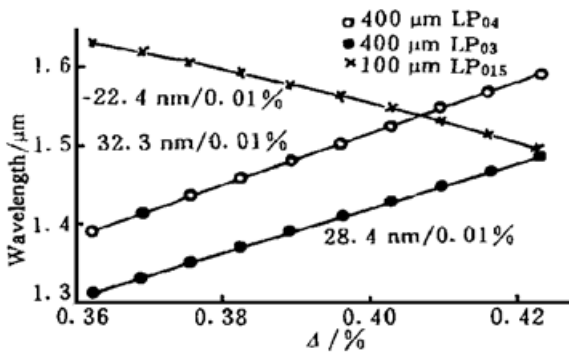


Fig. 3 Plots of resonant wavelengths as a function of Δ with different order cladding modes

分别是典型的高阶包层模 ($\Lambda = 100 \mu\text{m}$ 的 LP_{015} 模) 与典型的低阶包层模 ($\Lambda = 400 \mu\text{m}$ 的 LP_{04} 、 LP_{03} 模) 的谐振波长随 Δ 的变化关系(这里无论是芯或包层折射率的变化都导致基本一致的结果), 其中芯与包层半径分别取为 $4.15 \mu\text{m}$ 和 $62.5 \mu\text{m}$ 。从图 3 可看到各阶模式的谐振波长随平均折射率差的变化都近似呈线性关系。各条曲线的斜率已在图中标明, LP_{03} 模比 LP_{04} 模的斜率稍小, 随 Δ 增大两者间距逐渐拉大。特别注意到高阶 LP_{015} 模的斜率为负值, 随 Δ 增大反而减小, 具有与低阶 LP_{04} 、 LP_{03} 模完全相反的变化趋势。

可以预料, 在光栅写入的过程中 (Δ 增大的过程), 低阶模的谐振波长将向长波方向漂移, 而高阶模的谐振波长将向短波方向漂移; 在光栅退火后 (Δ 减小), 低阶模的谐振波长将向短波方向回漂, 而高阶模的谐振波长将向长波方向回漂。

图 4 所示是纤芯半径的微小变化对各包层模式谐振波长的影响情况, 其中包层半径为 $62.5 \mu\text{m}$, $\Delta = 0.41\%$ 。图中显示各阶模式的谐振波长与芯半径大小也近似成直线关系。从图中标明的斜率来看芯半径对各阶包层模式都有很大的影响, 低阶模式 (LP_{04} 、 LP_{03} 模) 比高阶模式 (LP_{015} 模) 受芯半径变化的影响更大些, 但两者变化趋势相反: 低阶模的谐振波长随芯半径增大向长波移动, 而高阶模的谐振波长随芯半径增大向短波移动。

图 5 示出包层半径的微小变化对各阶模式谐振波长的影响情况, 其中芯半径为 $4.15 \mu\text{m}$, $\Delta = 0.41\%$ 。从图 5 看出高阶包层模和低阶包层模的谐振波长随包层半径的变化依旧近似呈线性关系, 但与芯半径的影响相反, 低阶模具有负的斜率, 而高阶模具有正的斜率。特别注意到, 高阶包层模受包层半径的微小变化非常敏感, 低阶包层模式所受影响很小。从图中看

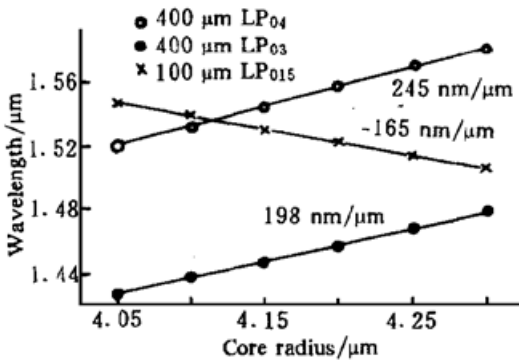


Fig. 4 Plots of resonant wavelengths as a function of core radius with different order cladding modes

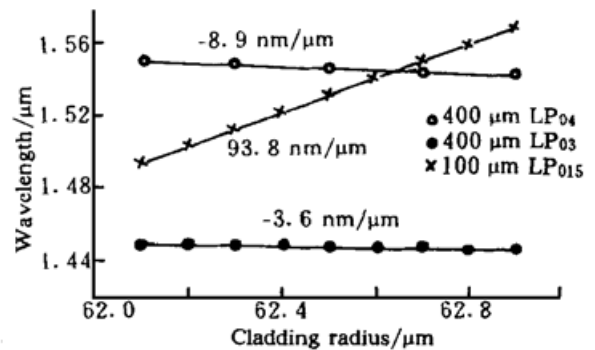


Fig. 5 Plots of resonant wavelengths as a function of cladding radius with different order cladding modes

到包层半径对 LP_{015} 模的影响比对 LP_{04} 模式的影响大近 10 倍。从图 4、图 5 所看到芯和包层半径对谐振波长的影响可以想到, 即使用同样的掩模板、同样的辐照条件在同种光纤中制作长周期光栅, 也可能由于光纤本身的半径误差导致谐振波长有一定差异。

长周期光纤光栅的周期与各阶包层模式谐振波长的关系如图 6 所示。图中用 m 标明了 LP_{0m} 包层模式的阶数, 计算所用光纤参数为 $\Delta = 0.41\%$, 芯与包层半径分别为 $4.15 \mu\text{m}$ 和 $62.5 \mu\text{m}$ 。从图 6 可看到随着包层模式阶数的增大, 在 $1.21.7 \mu\text{m}$ 波段各条曲线的斜率 ($d\lambda/d\Lambda$) 由正值逐渐地转变为负值。例如周期 $400 \mu\text{m}$ 附近的光栅的 LP_{04} 模的斜率约为 $2.65 \text{ nm}/\mu\text{m}$, 而周期 $100 \mu\text{m}$ 光栅的 LP_{015} 模的斜率约为 $-37 \text{ nm}/\mu\text{m}$ 。另外可看到模式阶数较高的光栅, 其谐振波长对光栅周期变化较敏感, 例如 $100 \mu\text{m}$ 的光栅会发生导模与 LP_{015} 包层模的谐振, 当周期变为 $110 \mu\text{m}$ 时, 导模与 LP_{015} 包层模的谐振将消失。观察图 6 还可得到这样一条结论, 即周期较大(例如大于 $300 \mu\text{m}$) 的光栅一般不会发生导模与高阶包层模的耦合谐振, 而周期较短(例如小于 $100 \mu\text{m}$) 的光栅一般不会发生导模与低阶包层模的耦合谐振。此外, 还可注意到 LP_{04} 和 LP_{05} 包层模的谐振波长在很大的周期范围内具有线性变化的特点。利用它们的这一特点对于设计长周期光纤光栅是很有好处的, 例如制作周期为等差数列的一系列掩模板并配合其他一些微调技术(例如再曝光技术)可以将谐振波长控制在任意所需的波长上。前面所讨论的情况都假定了光栅周期的占空比为 1:1。事实上如果占空比发生变化, 则长周期光栅的谐振波长也会发生变化。如图 7 所示为光栅周期占空比对高阶包层模式 ($\Lambda = 100 \mu\text{m}$ 的 LP_{015} 模) 和低阶包层模 ($\Lambda = 400 \mu\text{m}$ 的 LP_{04} 、 LP_{03} 模) 谐振波长的影响情况, 所用光纤参数为 $\Delta = 0.41\%$, 芯与包层半径分别为 $4.15 \mu\text{m}$ 和 $62.5 \mu\text{m}$ 。从图 7 中看到高阶模与低阶模对周期占空比变化依旧呈相反的趋势, 随占空比增大高阶模的谐振点向短波移动, 低阶模的谐振点向长波移动, 还可看到各阶模移动的幅度大致相等。虽然可通过占空比来改变谐振波长, 但计算还发现占空比为 1:1(即 5:5)时光栅引起导模与包层模的耦合最强, 与之偏离越大则耦合越弱, 故一般选取占空比为 1:1 是较合适的。

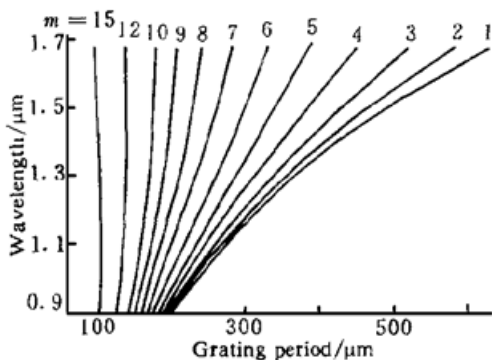


Fig. 6 Plots of resonant wavelengths as a functions of grating period with different order cladding modes. m is the order number

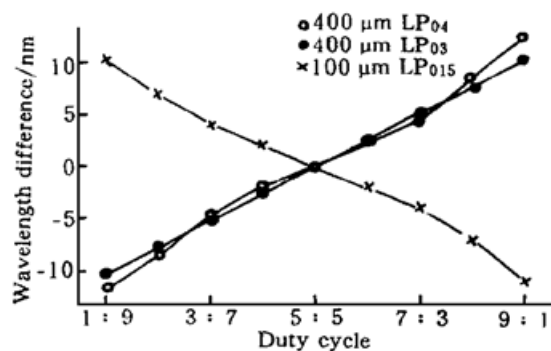


Fig. 7 Plots of resonant wavelengths as a function of duty cycle of grating period with different order cladding modes

3 实验结果

为了从实验上证实高阶包层模与低阶包层模具有完全不同的变化特点, 采用了周期分别为 $100 \mu\text{m}$ 和 $400 \mu\text{m}$ 的振幅掩模板来实际制作长周期光纤光栅, 两种掩模板的周期占空比均为 1:1。实验装置如图 8 所示, 紫外光源采用波长为 248 nm 的 KrF 准分子激光器, 辐照时脉

冲能量约为 350 mJ, 脉冲重复频率为 20 Hz, 光斑大小约 $22 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ 。实验所用光纤为康宁标准单模通信光纤, 事先已在 $1.013 \times 10^7 \text{ Pa}$ 下氢载 30 天。写入光栅时, 每隔 1 分钟记录一次各阶模式谐振点的位置, 观察随总曝光量增大时谐振波长的漂移情况。实验观察到周期 $100 \mu\text{m}$ 光栅的 LP_{015} 包层模的谐振波长随曝光时间增加逐渐向短波方向漂移, 如图 9 所示。这表明平均折射率差的增大导致高阶模谐振点向长波漂移的理论预言是正确的。写入周期为 $400 \mu\text{m}$ 的光栅时, 所观察的 LP_{04} 包层模谐振波长的漂移情况也画在图 9 中。可看到随曝光时间的增加它向长波方向移动。两者随曝光时间的变化并非线性是由于芯与包层平均折射率差随曝光时间非线性地增长导致的。制成的两个光栅置于 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 高温箱退火 30 小时后, 发现 $100 \mu\text{m}$ 光栅的 LP_{015} 包层模向长波回漂约 102 nm, 而 $400 \mu\text{m}$ 光栅的 LP_{04} 包层模向短波回漂约 38 nm。在进一步的实验中还测量了 LP_{015} 和 LP_{04} 包层模随温度的变化情况, 发现 LP_{015} 模随温度增加谐振波长向短波漂移, 而 LP_{04} 模随温度增加谐振波长向长波漂移, 两者均呈线性变化, 温度敏感系数经测定分别为 $-0.101 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 和 $+0.067 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。这表明高阶模与低阶模对温度变化(实际上温度变化导致了光纤和光栅参数的变化)也表现出相反的行为。以上结果表明, 实验所观察到的长周期光栅谐振波长的移动规律与理论预言的变化规律完全一致。本文作者对实验结果也进行了计算模拟, 发现计算波长与实际波长稍有差别。这主要是由于对具体光纤的参数及其变化后的参数尚缺乏非常准确的数据所造成的。

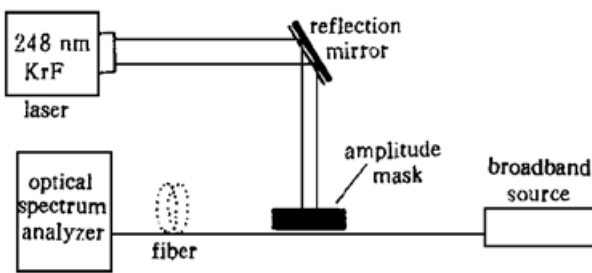


Fig. 8 Experimental setup for long-period grating fabrication

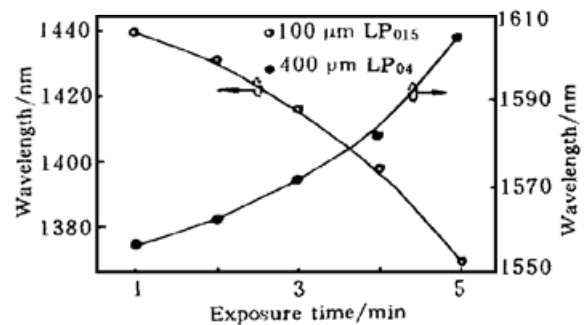


Fig. 9 Measured resonant wavelengths as a function of exposure time with different cladding modes in two gratings

结 论 总结前述结果和讨论, 可以得到下面一些结论:

1) 周期较短(如 $100 \mu\text{m}$ 附近)的长周期光纤光栅通常只有导模与高阶模的谐振, 周期较长(如 $400 \mu\text{m}$ 附近)的长周期光纤光栅通常只有导模与低阶模之间的谐振, 而高阶模与低阶模有不同的特点, 在光纤或光栅参数变化时它们的谐振波长向相反的方向变化。

2) 长周期光栅的谐振波长与光纤参数(芯和包层的折射率及半径)在理论上有着复杂的关系, 但很多情况下表现出近似线性的关系, 因而可根据其大致斜率在设计制作中对各包层模式的谐振波长作出估计。

3) 纤芯半径的微小差别对低阶和高阶包层模的谐振波长均造成较大影响, 包层半径对低阶模影响较小而对高阶模影响很大, 因此光纤本身带来的半径误差将使谐振波长的设计带来一定的影响。

4) 一些包层模式如 LP_{04} 、 LP_{05} 模在较大周期范围内谐振波长与光栅周期变化有线性关系, 利用这个特点可为设计带来方便。

5) 周期占空比导致各阶包层模的谐振波长在较小范围内变化, 考虑到耦合强度, 通常取占空比 1:1 是合理的。

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**(1): 5865
- [2] Vengsarkar A M, Pedrazzani J R, Judkins J B *et al.*. Long-period fiber grating based gain equalizers. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(3): 336338
- [3] Bhatia V, Vengsarkar A M. Optical fiber long-period grating sensors. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(9): 692694
- [4] Erdogan T. Cladding-mode resonances in short- and long-period fiber grating filters. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1997, **14**(8): 17601773
- [5] Unger H G. *Planar Optical Waveguides and Fibres*. Oxford, England: Clarendon, 1977. 312313

A Study of Characteristics of Resonant Wavelengths of Long-Period Fiber Gratings

Shu Xuewen¹⁾ Zhu Xuemei²⁾ Wang Qinglin²⁾
Jiang Shan²⁾ Huang Dexiu¹⁾

1), Department of Optoelectronics, Huazhong University of Sciences and Technology, Wuhan 430074
2), Solid Devices Institute, Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications, Wuhan 430074

(Received 27 November 1998; revised 26 March 1999)

Abstract The variation relationships among resonant wavelengths, fiber parameters and grating period of long-period fiber gratings (LPGs) are studied. It is found that the high order cladding modes are quite different from the low order ones. Their resonant wavelengths are shifted toward opposite directions as the parameters vary. This difference was confirmed by fabrication of two LPGs with period of 100 μm and 400 μm respectively. Some useful results for design and fabrication of LPGs are obtained.

Key words fiber gratings, long-period fiber gratings, resonant wavelengths.