

拉锥型啁啾光纤光栅滤波器的研究*

尹彬[†] 柏云龙 齐艳辉 冯素春 简水生

(光波技术研究所, 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京交通大学, 北京 100044)

(2013年6月18日收到; 2013年7月10日收到修改稿)

本文主要对拉锥型啁啾光纤光栅滤波器进行详细的理论分析和实验研究. 结合传输矩阵法, 谐振理论和耦合模理论, 深入细致地分析了啁啾光纤光栅自身参数(光栅长度, 折射率调制幅度, 啁啾系数), 拉锥参数和锥区损耗对拉锥型啁啾光纤光栅滤波器透射谱的影响, 并研究拉锥对啁啾光纤光栅各波长反射率影响. 在此基础上进行相应的数值仿真及实验验证, 数值仿真与实验结果基本一致.

关键词: 光栅拉锥, 啁啾光栅, 传输矩阵法, 滤波器

PACS: 42.81.-i, 42.81.Dp, 42.79.Ci

DOI: 10.7498/aps.62.214213

1 引言

随着光纤光栅的飞速发展, 大量基于光纤光栅的光纤器件在光纤通信和光纤传感中得到广泛应用. 如滤波器, 光纤激光器, 复用/解复用器等^[1-5]. 在光纤激光器中, 光纤滤波器是核心器件之一, 光纤光栅是类属于光纤滤波器的优良滤波器件^[6,7].

Andrea Cusano 等人提出在均匀光纤光栅上直接拉锥, 观测其反射谱的变化规律并进行应力和温度实验^[8]. Dong 等提出在啁啾光纤光栅上拉锥, 通过监测啁啾光纤光栅反射谱带宽, 实现高灵敏度液位传感测试^[9]. 拉锥型啁啾光纤光栅在滤波器, 光纤传感, 光纤激光器等领域有广泛的应用前景. 本文提出在啁啾光纤光栅(chirped fiber bragg grating, CFBG)上拉锥能够实现透射型带通滤波器, 通过调整拉锥参数, 可以得到不同波长, 带宽和滚降特性的透射峰.

本文采用传输矩阵法分析拉锥型啁啾光纤光栅滤波器的传输特性. 深入细致地分析了啁啾光纤

光栅自身参数与拉锥参数对拉锥型啁啾光纤光栅滤波器透射谱特性的影响, 建立了拉锥型啁啾光纤光栅滤波器模型, 引入拉锥产生的损耗因子对拉锥型啁啾光纤光栅滤波器(下文简称拉锥型啁啾光纤光栅)模型进行修正, 并研究拉锥对啁啾光纤光栅各波长反射率的影响. 在此基础上进行实验验证.

2 理论分析

拉锥型啁啾光纤光栅结构模型如图1所示, 它可以看成是一种特殊结构的相移光纤光栅. 相移的产生是由于在啁啾光纤光栅上某一段拉锥导致的, 通过谐振理论分析, 锥区两端点相当于形成了一个法布里波罗(Fabry-Pérot, F-P)谐振腔. 由于是在啁啾光纤光栅上拉短锥(在光通信波段, 小于啁啾光纤光栅的周期), 锥区两端点之间的距离可以近似为无穷小, 因此谐振腔两侧的反射波长是一致的, 我们可以将拉锥型啁啾光纤光栅等效成F-P腔来分析^[10,11].

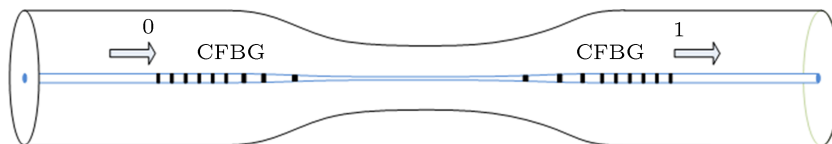


图1 拉锥型啁啾光纤光栅结构模型

* 国家重点基础研究发展计划(973项目)(批准号: 2010CB328206)、国家自然科学基金(批准号: 61107094, 61178008, 61275092)和中央高校基本科研业务费(北京交通大学)(批准号: 2013JBM017)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: 11111016@bjtu.edu.com

这里采用传输矩阵法分析拉锥型啁啾光纤光栅^[12], 尽管啁啾光纤光栅各点周期不同, 但可以将它分为 N 段长度相等的小段, 每一小段很短, 可以近似看成均匀光纤布拉格光栅, 每一小段具有不同的光栅周期 Λ_i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$). 我们在啁啾光纤光栅中加入由于拉锥引起的调制相移, 拉锥型啁啾光纤光栅的传输矩阵

$$F = F_N \times F_{N-1} \cdots F_i \times F_\varphi \times F_{i-1} \cdots F_2 \times F_1, \quad (1)$$

其中

$$F_\varphi = \begin{bmatrix} \exp(-i\varphi) & 0 \\ 0 & \exp(i\varphi) \end{bmatrix}.$$

相位角 $\varphi = \beta h$, 传播常数

$$\beta = \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda}, \quad (2)$$

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \rho_{\text{core}} \sqrt{(n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2)},$$

其中, λ 是波长, ρ_{core} 是纤芯半径, n_{core} 是纤芯折射率, n_{clad} 是包层折射率, V 是归一化工作频率^[14]. 当 V 减小到截止归一化频率 V_{cc} 即 ρ 减小到截止半径 ρ_{cc} 时, 基模 LP_{01} 全部以包层模的形式传播. 数值分析得到

$$V_{\text{cc}} = \sqrt{2/\ln(S)},$$

$$S = \rho_{\text{clad}}/\rho_{\text{core}}$$

$$= 125/8.3 = 15.06^{[15]},$$

其中 ρ_{clad} 是包层半径. 通过计算可以得到

$$V_{\text{cc}} = 0.859.$$

$$\rho_{\text{cc}} = \frac{V_{\text{cc}} \cdot \lambda}{\left(2\pi \cdot \sqrt{(n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2)}\right)} \approx 1.7 \mu\text{m},$$

本文只分析 $\rho_{\text{core}} > \rho_{\text{cc}}$ 拉锥情况下 (即基模 LP_{01} 部分能量还在光纤纤芯中传输) 的拉锥型啁啾光纤光栅. 通过数值仿真得到 $\rho_{\text{core}} > \rho_{\text{cc}}$ 时, ρ_{core} 改变时, 基模有效折射率基本保持不变, 因此在相同的工作波长条件下, 基模的传输常数基本保持不变, 相位角仅与锥区长度 h 有关. 由于锥区长度实验中无法准确测量, 我们将锥区长度转化为锥区最细位置半径, 由于拉锥过程体积 V_{m} 不变, 未拉锥前体积 $V_{\text{m}} = \pi\rho_{\text{clad}}^2 h$, 拉锥后锥区体积近似为

$$V_{\text{m}} = \frac{2\pi h \times (r^2 + r\rho_{\text{clad}} + \rho_{\text{clad}}^2)}{3},$$

r 表示拉锥后锥区最细位置的半径. 因此相位角 φ 与拉锥后锥区最细位置半径 r 有关.

3 数值仿真分析

3.1 拉锥型啁啾光纤光栅透射峰波长与拉锥位置和锥区最细位置半径的关系

首先我们分析拉锥型啁啾光纤光栅透射峰波长和拉锥位置的关系, 这里设定拉锥其他参数不变, 只改变拉锥位置. 拉锥后锥区最细位置半径 $r = 57.5 \mu\text{m}$, 啁啾光纤光栅的参数 $n_{\text{eff}} = 1.4628$, 折射率调制幅度 $\overline{\delta n_{\text{eff}}} = 1 \times 10^{-4}$ 啁啾系数 $c = 0.6 \text{ nm/cm}$, 光栅长度 $L = 5 \text{ mm}$, 如图 1 所示, 采用区间 $[0, 1]$ 表示整段拉锥型啁啾光纤光栅. 通过传输矩阵法分别仿真拉锥位置位于 $1/2, 2/5$ 和 $2/3$ 处的拉锥型啁啾光纤光栅透射谱, 如图 2(b) 所示.

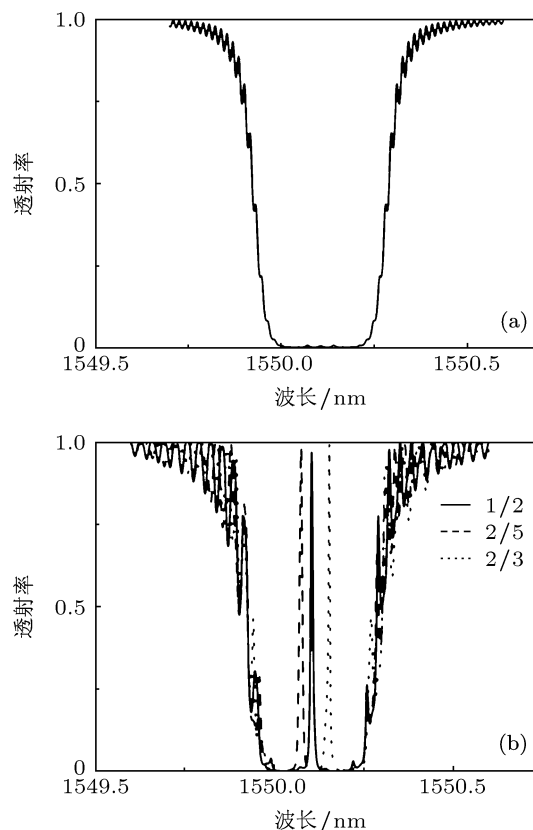


图 2 (a) 未拉锥的啁啾光纤光栅透射谱; (b) 拉锥型啁啾光纤光栅拉锥点分别在 $1/2, 2/5, 2/3$ 位置的透射谱

将图 2(a), (b) 两图对比可以看出拉锥型啁啾光纤光栅透射谱出现一个很窄的透射峰, 在啁啾光纤光栅中心位置拉锥, 透射峰出现在啁啾光纤光栅透射谱的中心附近. 拉锥型啁啾光纤光栅透射峰波长会随拉锥位置的不同而发生变化, 只改变拉锥位置而其他参数不变时, 拉锥型啁啾光纤光栅透射峰的透射率基本不变. 因此, 通过在啁啾光纤光栅

的不同位置拉锥,可以得到具有不同透射峰波长的滤波器.

其次分析拉锥型啁啾光纤光栅透射峰的透射率与锥区最细位置半径的关系.通过数值仿真得到在中心位置处拉锥,具有不同的锥区最细位置半径的拉锥型啁啾光纤光栅透射谱如图3所示.从图3中可以看出,拉锥型啁啾光纤光栅的锥区最细位置半径变化时,锥区长度随之变化,相位角会发生变化,其透射谱透射峰的透射率发生变化.这里还可以看到由拉锥产生相位角不是 $\pi/2$ 的奇数倍时,啁啾光纤光栅在中心位置拉锥的透射谱透射峰波长会偏离啁啾光纤光栅的中心波长处.因此通过设置拉锥参数,可以得到具有不同透射率的拉锥型啁啾光纤光栅滤波器.

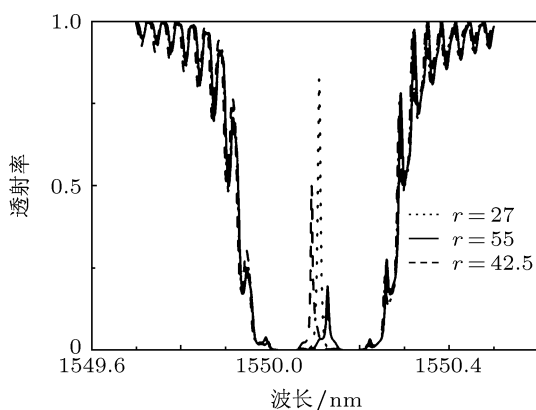


图3 拉锥型啁啾光纤光栅锥区最细位置半径为27 μm, 42.5 μm, 55 μm时的透射谱

3.2 拉锥型啁啾光纤光栅透射谱与光栅总长度, 折射率调制幅度和啁啾系数的关系

首先我们分析拉锥型啁啾光纤光栅透射谱与光栅总长度的关系,改变光栅总长度 $L = 50\text{ mm}$, 70 mm , 90 mm ,其他参数保持不变,得到拉锥型啁啾光纤光栅透射谱与光栅总长度的关系图4.拉锥型啁啾光纤光栅的总长度分别为50 mm, 70 mm, 90 mm时,其透射谱透射峰的透射率基本不变,分别是0.95, 0.96, 0.98.拉锥型啁啾光纤光栅透射峰的波长和透射率都不发生变化,只是改变啁啾光纤光栅的带宽.因此拉锥型啁啾光纤光栅的光栅总长度变化对其透射谱的透射峰参数没有影响.

然后分析拉锥型啁啾光纤光栅透射谱与啁啾光纤光栅折射率调制幅度的关系,设定啁啾光纤光栅折射率调制幅度 $\overline{\delta n_{\text{eff}}} = 5 \times 10^{-5}$, 8×10^{-5} , 1×10^{-4} ,调整拉锥参数,使拉锥产生相位角为 $\pi/2$

的奇数倍和非 $\pi/2$ 的奇数倍,分别得到拉锥型啁啾光纤光栅不同折射率调制幅度下的透射谱,如图5所示.从图5中可以看出由拉锥产生相位角为 $\pi/2$ 奇数倍的拉锥型啁啾光纤光栅折射率调制幅度增大时,拉锥型啁啾光纤光栅透射谱透射峰处于光栅的中心位置,它的透射率保持不变,3 dB带宽减小,而由拉锥产生相位角为非 $\pi/2$ 奇数倍的拉锥型啁啾光纤光栅折射率调制幅度增大时,拉锥型啁啾光纤光栅透射谱透射峰仍处于光栅的中心位置,它的透射率减小,3 dB带宽也减小.

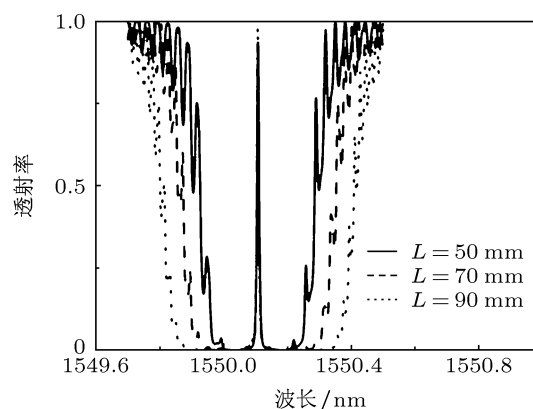


图4 拉锥型啁啾光纤光栅在不同光栅总长度下的透射谱

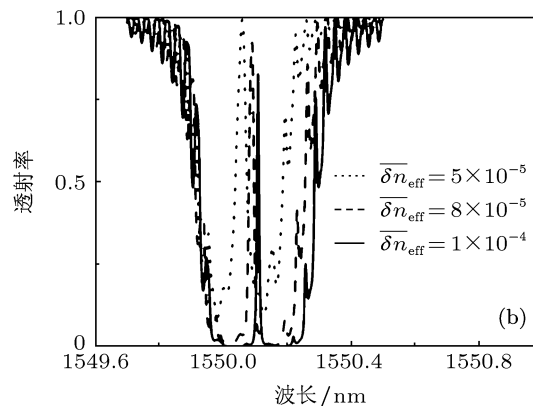
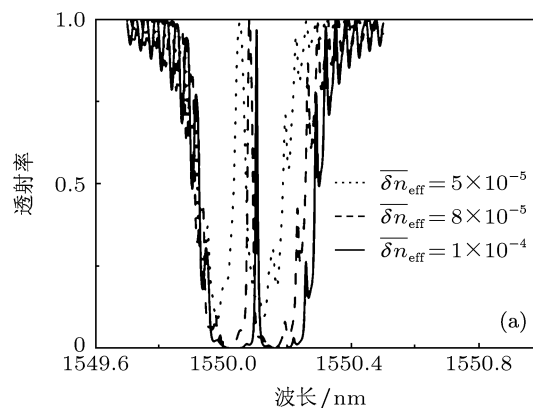


图5 (a), (b) 拉锥产生相位角为 $\pi/2$ 奇数倍和非 $\pi/2$ 奇数倍的拉锥型啁啾光纤光栅不同折射率调制幅度下的透射谱

最后分析拉锥型啁啾光纤光栅透射谱与啁啾光纤光栅啁啾系数的关系, 啁啾光纤光栅啁啾系数 c 分别为 0.8 nm/cm, 0.6 nm/cm 和 0.4 nm/cm, 调整拉锥参数, 使拉锥产生相位角为 $\pi/2$ 的奇数倍和非 $\pi/2$ 的奇数倍, 分别得到拉锥型啁啾光纤光栅不同啁啾系数下的透射谱, 如图 6 所示. 从图 6 中可以看出由拉锥产生相位角为 $\pi/2$ 奇数倍的拉锥型啁啾光纤光栅啁啾系数增大时, 拉锥型啁啾光纤光栅透射谱透射峰处于光栅的中心位置, 它的透射率保持不变, 3 dB 带宽增大. 而由拉锥产生相位角为非 $\pi/2$ 奇数倍的拉锥型啁啾光纤光栅啁啾系数增大时, 拉锥型啁啾光纤光栅透射谱透射峰仍处于光栅中心位置, 它的透射率增大, 3 dB 带宽也增大.

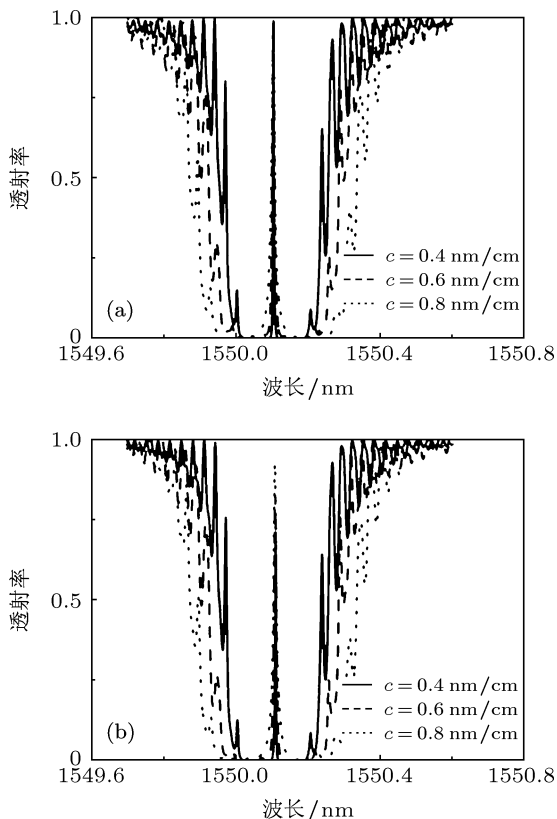


图 6 (a), (b) 拉锥产生相位角为 $\pi/2$ 奇数倍和非 $\pi/2$ 奇数倍的拉锥型啁啾光纤光栅不同啁啾系数下的透射谱

总结以上仿真结果, 拉锥型啁啾光纤光栅的光栅总长度只影响啁啾光纤光栅的带宽, 对其透射谱的透射峰参数不产生影响. 拉锥产生相位角为 $\pi/2$ 奇数倍的拉锥型啁啾光纤光栅折射率调制幅度与啁啾系数只影响其透射谱透射峰的 3 dB 带宽, 对其透射率没有影响. 拉锥产生相位角为非 $\pi/2$ 奇数倍的拉锥型啁啾光纤光栅折射率调制幅度与啁啾系数不仅影响其透射峰透射率的大小, 还影响其透射谱透射峰的 3 dB 带宽.

3.3 修正后的拉锥型啁啾光纤光栅透射谱分析

啁啾光纤光栅由于拉锥形成的 F-P 腔会产生一定的损耗. 定义光功率填充因子 $\Gamma = P_{\text{core}}/P_{\text{total}}$. 图 7 表示 LP_{01} 模式光功率填充因子随光纤半径的变化关系. 拉锥型啁啾光纤光栅锥区半径越细时, LP_{01} 模式纤芯能量越低, 损耗越大.

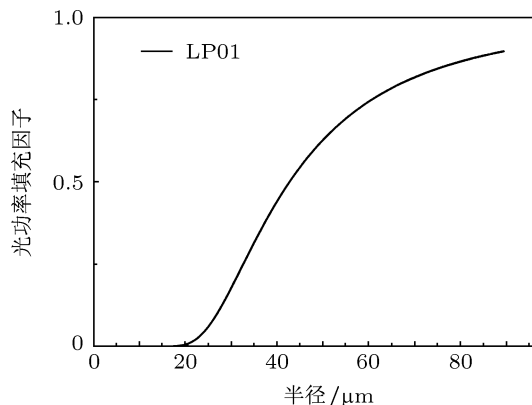


图 7 LP_{01} 模式光功率填充因子随光纤半径的变化关系图

我们设定损耗因子为 α , 相移矩阵

$$F_{\varphi} = \begin{bmatrix} \exp(-i\varphi)/\sqrt{\alpha} & 0 \\ 0 & \sqrt{\alpha} \times \exp(i\varphi) \end{bmatrix}^{[16]}$$

首先我们分析加入损耗因子后, 不同锥区最细位置半径的拉锥型啁啾光纤光栅透射谱的变化情况. 图 8 表示加入损耗因子后拉锥型啁啾光纤光栅锥区最细位置半径分别为 42.5 μm , 55 μm , 57.5 μm 时的透射谱. 从图 8 中可以看到, 与没有加入损耗因子的拉锥型啁啾光纤光栅透射谱图 3 相比, 加入损耗因子后拉锥型啁啾光纤光栅透射谱的透射峰透射率下降非常明显. 随着拉锥型啁啾光纤光栅锥区最细位置半径减小, 损耗因子减小, 其峰值透射率下降越明显.

其次分析加入损耗因子后, 不同折射率调制幅度下拉锥型啁啾光纤光栅透射谱的变化情况. 图 9 表示折射率调制幅度 $\overline{\delta n_{\text{eff}}} = 5 \times 10^{-5}$, 8×10^{-5} , 1×10^{-4} 时, 锥区最细位置半径 $r = 57.5 \mu\text{m}$ 的拉锥型啁啾光纤光栅加入损耗后的透射谱. 从图 9 可以看出随着拉锥型啁啾光纤光栅折射率调制幅度增加, 其透射谱峰值透射率减小, 3 dB 带宽也减小. 与没有加入损耗因子的拉锥型啁啾光纤光栅透射谱图 5(b) 相比较, 折射率调制幅度越大的拉锥型光纤光栅加入损耗后, 其透射谱峰值透射率下降的越为明显.

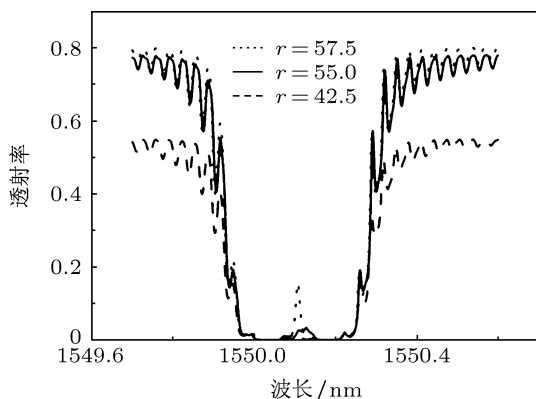


图8 加入损耗因子后拉锥型啁啾光纤光栅锥区最细位置半径为 42.5 μm, 55 μm, 57.5 μm 时的透射谱

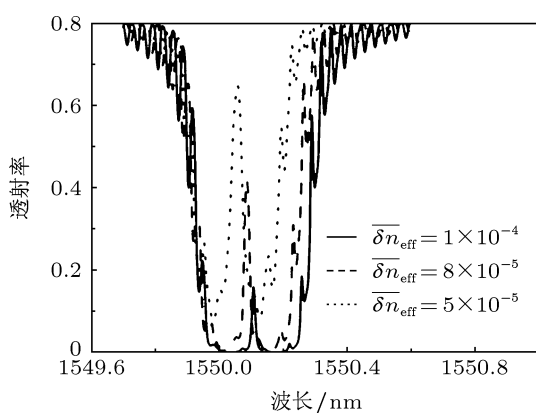


图9 加入损耗因子后拉锥型啁啾光纤光栅不同折射率调制幅度下的透射谱

然后分析加入损耗因子后, 不同啁啾系数下拉锥型啁啾光纤光栅透射谱的变化情况. 拉锥型啁啾光纤光栅啁啾系数 $c = 0.4 \text{ nm/cm}$, 0.6 nm/cm , 0.8 nm/cm 时其透射谱如图 10 所示. 由图 10 可以

看出随着拉锥型啁啾光纤光栅啁啾系数增大, 其透射谱峰值透射率增大, 3 dB 带宽也增大. 与没有加入损耗因子的拉锥型啁啾光纤光栅透射谱图 6(b) 相比较, 啁啾系数越小的拉锥型光纤光栅加入损耗后, 其透射谱峰值透射率下降的越为明显.

最后分析加入损耗因子后, 拉锥型啁啾光纤光栅的反射谱变化情况. 假设拉锥型啁啾光纤光栅相位角 $\varphi = \pi/2$, 光从啁啾光纤光栅周期大 (长波长) 的一端入射, 损耗因子 $\alpha = 0.8$, 锥区处于光栅的中心位置, 得到拉锥型啁啾光纤光栅加入损耗因子与未加入损耗因子的反射谱, 如图 11 所示. 由图 11 可以看出, 加入损耗因子后的拉锥型啁啾光纤光栅反射谱短波长一端的反射率下降, 长波长一端的反射率不变. 这是由于长波长端的反射光未经过锥区损耗而短波长端的反射光经过 2 次锥区损耗导致的.

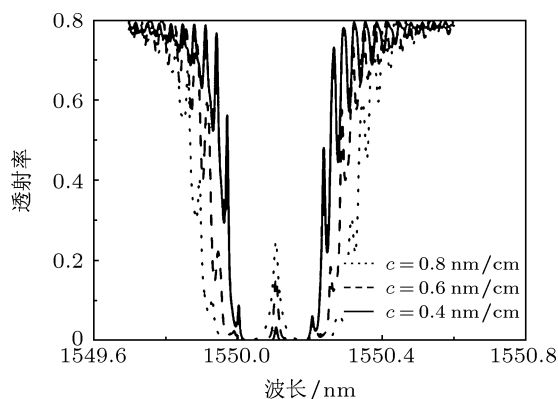


图 10 加入损耗因子后拉锥型啁啾光纤光栅不同啁啾系数下的透射谱

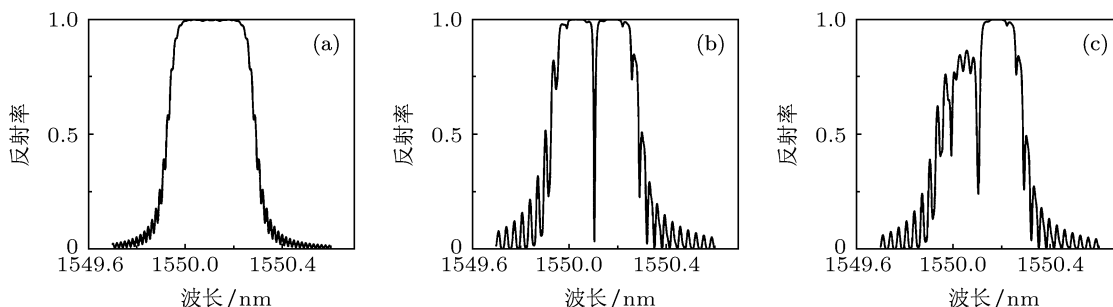


图 11 (a) 啁啾光纤光栅反射谱; (b) 未加入损耗因子的拉锥型啁啾光纤光栅反射谱; (c) 加入损耗因子后拉锥型啁啾光纤光栅反射谱

4 实验验证

我们采用相位掩模板法制作啁啾光纤光栅, 然后选取光纤光栅中心位置设置参数进行拉锥. 锥区最细位置半径 $r = 27 \text{ μm}$ 和 $r = 42.5 \text{ μm}$ 的拉锥型啁啾光纤光栅显微镜观测图, 如图 12 所示.

制作的啁啾光纤光栅长度为 140 mm, 相位掩模板周期是 1069.74, 掩模板总啁啾量是 0.26. 分别在啁啾光纤光栅的 1/2, 2/5 和 2/3 位置处拉锥, 拉锥后锥区最细位置半径为 $r = 27 \text{ μm}$ 的透射谱如图 13 所示. 其中测试光源为掺铒光纤放大器自发辐射光源, 测试光谱分析仪为 AQ6317 (扫描精度 0.01 nm).

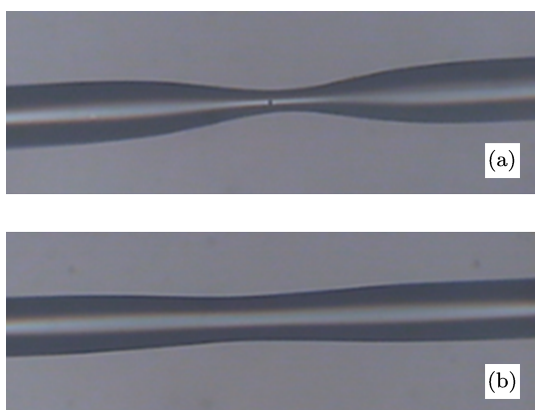


图 12 (a), (b) 锥区最细位置半径 $r = 27 \mu\text{m}$ 和 $r = 42.5 \mu\text{m}$ 的拉锥型啁啾光纤光栅显微镜观测图

啁啾光纤光栅在 $1/2, 2/5, 2/3$ 位置拉锥后

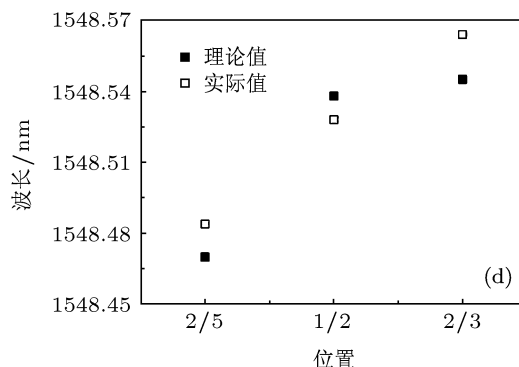
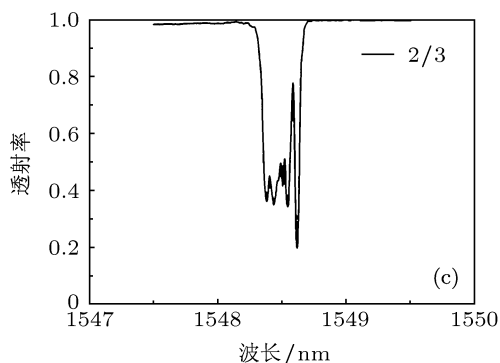
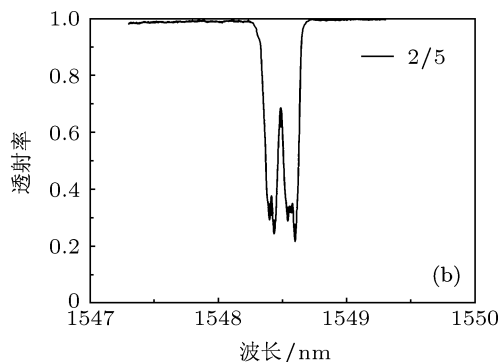
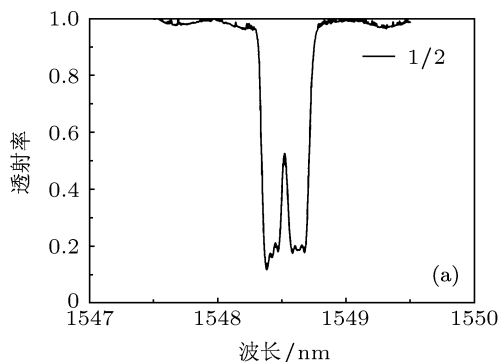


图 13 (a), (b), (c) 分别为啁啾光纤光栅在 $1/2, 2/5, 2/3$ 处拉锥后的透射谱; (d) 理论与实际拉锥位置波长对比图

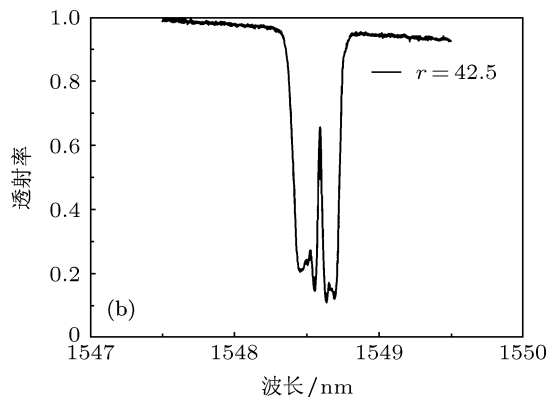
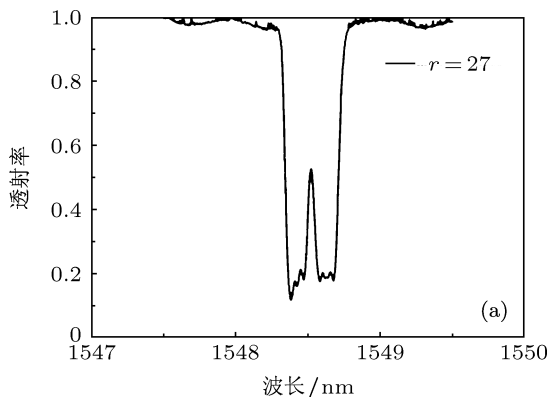


图 14 锥区最细位置半径 $r = 27 \mu\text{m}$ 和 $r = 42.5 \mu\text{m}$ 的拉锥型啁啾光纤光栅透射谱

的透射谱透射峰理论值波长为 1548.538 nm , 1548.470 nm , 1548.545 nm , 实际波长为 1548.528 nm , 1548.484 nm , 1548.564 nm . 这是因为对啁啾光纤光栅拉锥产生非 $\pi/2$ 的奇数倍相位角时, 其透射谱透射峰波长会偏离目标波长.

图 14 是锥区最细位置半径分别为 $r = 27 \mu\text{m}$ 和 $r = 42.5 \mu\text{m}$ 的拉锥型啁啾光纤光栅透射谱. 由于实验中啁啾光纤光栅自身参数与仿真参数不完全一致 (即折射率调制深度, 啁啾量等不一致), 实验图和仿真图有一定误差. 但依然能够看出, 拉锥型啁啾光纤光栅锥区最细位置的半径不同时, 其透射谱峰值透射率不同, 因此通过调整拉锥参数, 可以得到不同透射率的拉锥型啁啾光纤光栅滤波器.

不同折射率调制幅度下拉锥型啁啾光纤光栅透射谱如图 15 所示. 图 5(a), (b), (c) (d) 啁啾光纤光栅的透射率分别为 0.06, 0.16, 0.2, 0.25, 拉锥型啁啾光纤光栅透射谱峰值透射率分别为 0.32, 0.5, 0.59, 0.71. 因此, 随着拉锥型啁啾光纤光栅折射率调制幅度减小, 其透射谱峰值透射率增大, 实验与仿真结果一致.

啁啾系数分别是 0.071 nm/cm, 0019 nm/cm 的拉锥型啁啾光纤光栅透射谱如图 16(a), (b) 所示. 图 16(a), (b) 拉锥型啁啾光纤光栅透射谱峰值透射率

分别为 0.65, 0.59. 因此随着拉锥型啁啾光纤光栅啁啾系数减小, 其透射谱峰值透射率降低, 实验与仿真结果一致.

拉锥型啁啾光纤光栅滤波器可以应用于光纤传感和光纤激光器等领域. 通过改变温度, 应力, 折射率等参数, 可以得到一定范围内波长可调谐的滤波器. 拉锥型啁啾光纤光栅与同样参数的未拉锥啁啾光纤光栅可以构成光纤激光器的滤波器件. 多次拉锥的啁啾光纤光栅可以做成多通道滤波器应用于多波长光纤激光器中.

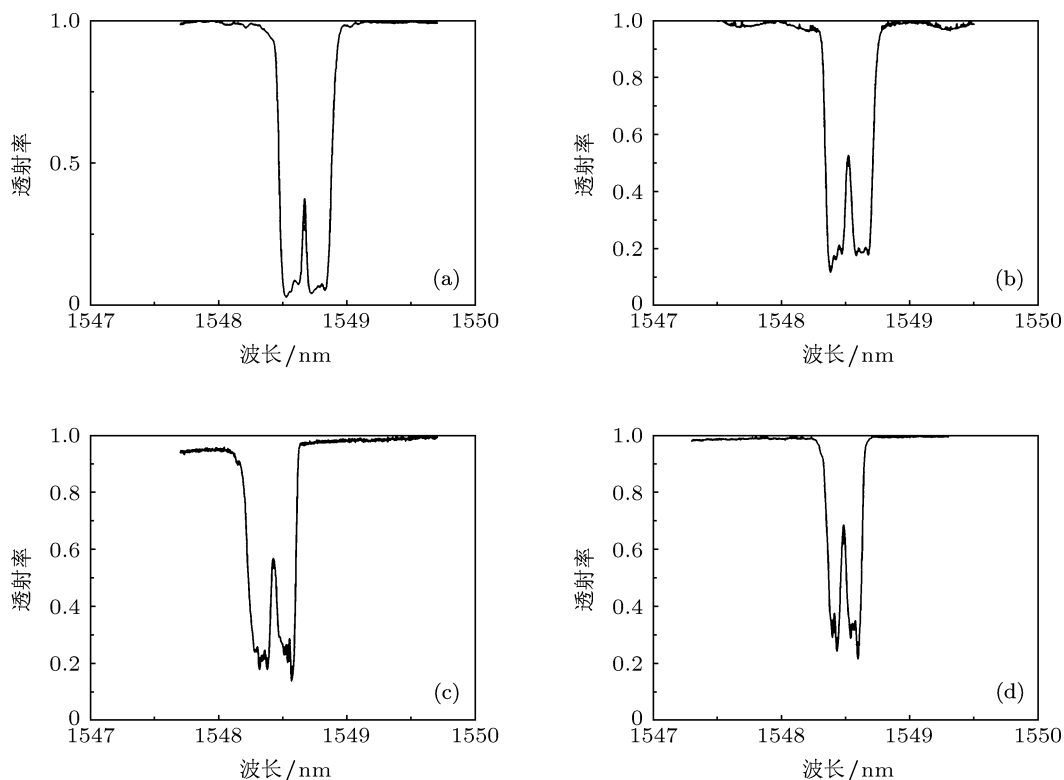


图 15 (a), (b), (c), (d) 不同折射率调制幅度下拉锥型啁啾光纤光栅透射谱

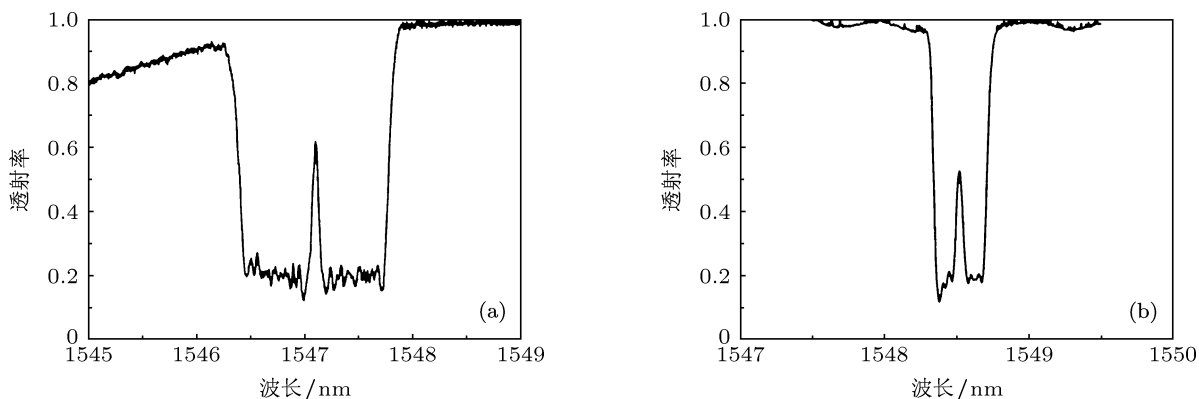


图 16 (a), (b) 啁啾系数分别为 0.071 nm/cm, 0019 nm/cm 的拉锥型啁啾光纤光栅透射谱

5 结论

本文结合传输矩阵法, 谐振理论和耦合模理论对拉锥型啁啾光纤光栅进行详细的理论分析和实验研究. 通过数值仿真分析出拉锥型啁啾光纤光栅的光栅总长度只影响啁啾光纤光栅的带宽, 对其透射谱的透射峰参数不产生影响. 拉锥产生相位角为 $\pi/2$ 奇数倍的拉锥型啁啾光纤光栅折射率调制幅度与啁啾系数只影响其透射谱透射峰的 3 dB 带宽, 对其透射率没有影响. 拉锥产生相位角为非 $\pi/2$

奇数倍的拉锥型啁啾光纤光栅折射率调制幅度与啁啾系数不仅影响其透射峰透射率的大小, 还影响其透射谱透射峰的 3 dB 带宽. 锥区位置与锥区长度影响拉锥型啁啾光纤光栅透射谱透射峰的波长和透射率. 建立了拉锥型啁啾光纤光栅模型, 引入由拉锥产生的损耗因子对模型进行修正, 数值仿真得出拉锥对啁啾光纤光栅各波长反射率的影响. 在此基础上进行实验验证, 实验结果与数值仿真基本一致.

- [1] Liu Y G, Che F L, Jia Z A, Fu H W, Wang H L, Shao M 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 104218 (in Chinese) [刘颖刚, 车伏龙, 贾振安, 傅海威, 王宏亮, 邵敏 2013 物理学报 **62** 104218]
- [2] Xu B, Li Y, Dong X Y, Jin S Z, Zhang Z X 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 094203
- [3] Liu Y, Wang L S, Tao P L, Feng S C, Yin G L, Ren W H, Tan Z W, Jian S S 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 024207 (in Chinese) [刘艳, 汪磊石, 陶沛琳, 冯素春, 尹国路, 任文华, 谭中伟, 简水生 2011 物理学报 **60** 024207]
- [4] Chi J J, Li P X, Yang C, Zhao Z Q, Li Y, Wang X F, Zhong G S, Zhao H, Jiang D S 2013 *Chin. Phys. B* **22** 044204
- [5] Zheng W J, Cheng J Q, Ruan S C, Zhang M, Liu W L, Yang X, Zhang Y Y 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 124204
- [6] Xiao X, Lu Y F, Yu F Q, Jin L 2013 *Chin. Phys. B* **22** 077802
- [7] Ma J Y, Fan Y T 2012 *Chin. Phys. B* **21** 037801
- [8] Andrea C, Agostino I, Domenico P, Stefania C, Antonello C 2008 *Opt. Express.* **16** 15332
- [9] Dong X W, Liu W K, Zhao R F 2013 *Science. China. Technological Sciences.* **56** 471
- [10] Lu S H, Xu O, Feng S C, Dong X W, Jian S S 2008 *Acta. Optica. Sinica.* **28** 1675 (in Chinese) [鲁韶华, 许鸥, 冯素春, 董小伟, 简水生 2008 光学学报 **28** 1675]
- [11] Ren W H, Wang Y H, Feng S C, Tan Z W, Liu Y, Jian S S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7758 (in Chinese) [任文华, 王燕花, 冯素春, 谭中伟, 刘艳, 简水生 2008 物理学报 **57** 7758]
- [12] Erdogan T 1997 *J. Lightwave Tech.* **15** 1277
- [13] Li Z X, Pei L, Qi C H, Peng W J, Ning T G, Zhao R F, Gao S 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8615 (in Chinese) [李卓轩, 裴丽, 祁春慧, 彭万敬, 宁提纲, 赵瑞峰, 高嵩 2010 物理学报 **59** 8615]
- [14] Love J D, Henry W M, Stewart W J, Black R J, Lacroix S, Gonthier F 1991 *IEE. Proceedings. J* **138** 343
- [15] Wei L, Lit J W Y 1997 *J. Lightwave Technol.* **15** 1405
- [16] Wang Y H, Ren W H, Liu Y, Tan Z W, Jian S S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6393 (in Chinese) [王燕花, 任文华, 刘艳, 谭中伟, 简水生 2008 物理学报 **57** 6399]

Study on tapered chirped fiber grating filter*

Yin Bin[†] Bai Yun-Long Qi Yan-Hui Feng Su-Chun Jian Shui-Sheng

(Institute of Lightwave Technology, Key Lab of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network of EMC, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(Received 18 June 2013; revised manuscript received 10 July 2013)

Abstract

Tapered chirped fiber grating filter is analyzed from the detailed theoretical and experimental studies. The transmission spectrum of tapered chirped fiber grating filter is influenced by the parameters and loss of chirped fiber grating (length, refractive index modulation, chirp coefficient) and taper after examined by the transfer matrix method and resonance theory combined with coupled-mode theory. We study the influence of the chirped fiber grating wavelength reflectivity by tapering, and make the corresponding numerical simulation and experimental verification based on the above theories. Numerical simulation result is consistent with the experimental data.

Keywords: fiber taper, chirped grating, transfer matrix method, filter

PACS: 42.81.-i, 42.81.Dp, 42.79.Ci

DOI: 10.7498/aps.62.214213

* Project supported in part by the Major State Basic Research Development Program of China (Grant No. 2010CB328206), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61107094, 61178008, 61275092), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant No. 2013BM017).

[†] Corresponding author. E-mail: 11111016@bjtu.edu.com