

柚子型光子晶体光纤啾啾光栅的反射谱特性

毕卫红 李建萍 齐跃峰

(燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 利用有限元法和传输矩阵法,对柚子型结构的光子晶体光纤啾啾光栅的反射谱进行了理论分析。得到了啾啾光栅参数和光纤参数对光子晶体光纤啾啾光栅反射谱的影响规律。结果表明随着啾啾系数和折变量的增加,光栅反射谱呈规律变化,当啾啾系数增大到一定程度时几个反射峰会连到一起,形成一个大的反射带宽。光纤的内包层直径和纤芯直径的改变能够影响各反射峰之间的间距。同时研究了切趾变迹对光子晶体光纤啾啾光栅反射谱的影响,研究表明,所用切趾函数会同时对多个峰进行切趾,每个峰的切趾效果都很好。对反射谱波动较大的几个峰相连的啾啾光栅经过柯西切趾后反射谱曲线平滑,适合于实际应用。

关键词 光纤光学;啾啾光栅;传输矩阵法;光子晶体光纤;谐振波长

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0606001

Reflection Spectrum Characteristics of the Grapefruit-Type Photonic Crystal Fiber Chirped Grating

Bi Weihong Li Jianping Qi Yuefeng

(*Institute of Information science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China*)

Abstract Based on the finite element method and transmission-matrix method, the reflection spectrum of the grapefruit-type photonic crystal fiber chirped grating is analyzed theoretically. The influences of the fiber grating parameters and fiber structural parameters on the reflection spectrum characteristics of the photonic crystal fiber chirped grating are analyzed. The results show that with the increase of the chirp coefficient and refractive indexes modulation, the reflection spectrum changes regularly. When the chirp coefficient increases to a certain extent, the several reflection peaks can be connected together to form a large reflection band. The spacing between the reflection peaks can be changed by the inner-cladding diameter and the core diameter of the photonic crystal fiber. At the same time, the influence of apodization on reflection spectrum of the photonic crystal fiber chirped grating is discussed. Studies show that the apodization function can apodize several peaks and the apodization effect of each peak is very good. For fiber grating with several peaks connected, the wave of its reflection spectrum is large. But through the Cauchy apodization, the reflection spectrum curve is smooth, which is suitable for practical applications.

Key words fiber optics; chirped grating; transmission-matrix method; photonic crystal fiber; resonant wavelength

OCIS codes 060.2310; 060.5295; 050.2770

1 引 言

光子晶体光纤(PCF)自从问世以来,由于其独特的光学性质而备受关注。基于 PCF 所具有的各种的特殊性质,使得它的光纤光栅的研究同样具有很大的价值。近年来国内外在这方面开展了一系列的工作,并取得了很大的进展^[1,2]。和常规光纤

光栅相比,光子晶体光纤光栅(PCFG)具有更加优良的特性。例如提供更大的设计自由度,波长调谐范围宽,低阶包层模不受外界折射率变化影响,可进行多参量多功能感测等^[3]。这些特性使 PCFG 在光纤通信、光纤传感和光信息处理等很多领域都具有广阔的应用价值。

收稿日期: 2011-11-15; **收到修改稿日期**: 2011-12-22

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327801)资助课题。

作者简介: 毕卫红(1960—),女,博士,教授,主要从事光纤传感、光纤通信及光电检测等方面的研究。

E-mail: bwhong@ysu.edu.cn

现在对光子晶体光纤光栅的研究基本都集中在均匀光栅上^[3,4],对啾啾光栅的报道很少。对于普通单模光纤,啾啾光栅除具有许多均匀周期光栅的优良性能外,还具有反射和透射带宽宽、色散补偿量大等优点,这在实际应用中具有很大的价值。所以对光子晶体光纤啾啾光栅进行研究将具有重要的意义。

运用有限元法和传输矩阵法,对基于柚子型结构的光子晶体光纤的啾啾光栅进行了计算和仿真,得到了它的反射谱特性,并进行了分析与研究。研究结果为柚子型光子晶体光纤及啾啾光栅的设计提供了理论依据,也对于研制基于光子晶体光纤的光栅器件提供了必要的指导。

2 理论基础

分析光子晶体光纤啾啾光栅时,先用有限元法计算出 PCF 各模式对应的有效折射率和电场、磁场分布,再利用耦合模理论和传输矩阵法求出啾啾光栅的反射谱曲线。

2.1 有限单元法

有限单元法简称有限元法,是求解数值边值问题的一种数学计算方法。有限元法的基本思想是将连续的求解区域离散为一组有限个、按一定方式连接在一起的组合体。由于单元能按不同的连接方式进行组合,且本身又可以有不同的形状,因此能够使几何形状复杂的求解域模型化^[5,6]。

从麦克斯韦基本方程出发,能够导出光子晶体光纤的电磁场波动方程^[7~9]为

$$\nabla \times (\mathbf{p} \nabla \times \mathbf{\Phi}) - k_0^2 \mathbf{q} \mathbf{\Phi} = 0, \quad (1)$$

式中 $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为真空中的波数。当 $\mathbf{\Phi} = \mathbf{E}$ 时, $\mathbf{p} = \boldsymbol{\mu}^{-1}$, $\mathbf{q} = \boldsymbol{\varepsilon}$; 当 $\mathbf{\Phi} = \mathbf{H}$ 时, $\mathbf{p} = \boldsymbol{\varepsilon}^{-1}$, $\mathbf{q} = \boldsymbol{\mu}$ 。

将待求解区域(PCF 的横截面)用有限元法进行离散化,从(1)式得到下面的本征值方程^[7~9]

$$(\mathbf{A} - \beta^2 \mathbf{B}) \mathbf{\Phi} = 0, \quad (2)$$

式中 $\beta^2 = k_0^2 n_{\text{eff}}^2$ 为特征值, n_{eff} 代表模式的有效折射率的平方, $\mathbf{\Phi}$ 为特征向量,代表全矢量形式的磁场分

量或电场分量, \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 是稀疏矩阵。求解这个代数本征值方程可以计算光子晶体光纤的传输模式和场分布,本文计算时是通过磁场进行求解的。

2.2 耦合模理论和传输矩阵法

耦合模理论是分析光纤光栅的基础,光栅中前、后向光场的耦合作用可以用如下耦合模方程来描述^[10]:

$$\begin{cases} \frac{dR}{dz} = i\hat{\sigma}R(z) + ikS(z) \\ \frac{dS}{dz} = -i\hat{\sigma}S(z) - ik^*R(z) \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $R(z) = A(z)\exp(i\delta z - \varphi/2)$, $S(z) = B(z)\exp(-i\delta z + \varphi/2)$, $A(z)$ 和 $B(z)$ 分别表示光栅中前向后向光场; $\hat{\sigma}$ 为直流自耦合系数,定义为 $\hat{\sigma} = \delta + \sigma - \frac{1}{2} \times$

$\frac{d\varphi}{dz}$, δ 是一个与光栅 z 方向无关的量, $\delta = \beta - \frac{\pi}{\Lambda} = 2\pi n_{\text{eff}} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right)$, $\sigma = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n$, $\frac{d\varphi}{dz}$ 是由于光栅周期啾啾化引入的耦合项; k 为交流耦合系数。

PCFG 谐振波长的表达式为^[11]

$$\lambda_B = (n_{\text{clad}} + n_{\text{core}})\Lambda, \quad (4)$$

式中 n_{clad} 为包层有效折射率。与常规光纤光栅不同,在 PCFG 中, n_{clad} 为波长的函数,需要将由有限元法计算出的离散 n_{clad} 值进行拟合,得到 n_{clad} 与波长的关系 $n_{\text{clad}}(\lambda)$, 然后逐点代入进行计算, n_{core} 为纤芯折射率。

对于啾啾光纤光栅,(3)式没有解析解,只能通过数值方法求解。这里用传输矩阵法进行求解,它的原理是将非均匀光栅分成 M 小段,假定每一小段是均匀光栅,每段确定一个 2×2 矩阵,令 R_i 、 S_i 是通过第 i 段光栅前后的光场振幅,可以得到传输矩阵方程表达式^[12~14]为

$$\begin{bmatrix} R_i \\ S_i \end{bmatrix} = \mathbf{F}_i \begin{bmatrix} R_{i-1} \\ S_{i-1} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

每段光栅的传输矩阵为^[12~14]

$$\mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_B \Delta z) - i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) & -i \frac{k}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) \\ i \frac{k}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) & \cosh(\gamma_B \Delta z) + i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 $k, \hat{\sigma}, \gamma_B = \sqrt{k^2 - \hat{\sigma}^2}$ 为第 i 段“均匀”光栅耦合系数的本地值,把整个光栅 M 段矩阵连乘起来,由边界条件 $R_0 = R(L/2) = 1, S_0 = S(L/2) = 0$ 得^[12~14]

$$\begin{bmatrix} R_M \\ S_M \end{bmatrix} = \mathbf{F}_M \mathbf{F}_{M-1}, \dots, \mathbf{F}_i, \dots, \mathbf{F}_1 \begin{bmatrix} R_0 \\ S_0 \end{bmatrix} = \mathbf{F} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

则啁啾光栅的反射系数为 $\rho = S_M/R_M$, 反射率 $r = |\rho|^2$ 。

以上为分析光子晶体光纤啁啾光栅的理论基础, 基于上述理论对 PCF 啁啾光栅的反射特性进行数值模拟分析。

3 数值模拟与结果分析

3.1 柚子型光子晶体光纤及均匀光栅

仿真所用的光子晶体光纤结构与实验室的柚子型光子晶体光纤一致, 实验室光纤的实际结构如图 1 所示, 所建模型的结构如图 2 所示。光纤模型参数取近似值: 外径 $D = 125 \mu\text{m}$, 内包层直径 $d = 28 \mu\text{m}$, 纤芯直径 $d_{\text{core}} = 6 \mu\text{m}$, 空气孔直径 $d_{\text{air}} = 36 \mu\text{m}$ 。包层部分为 SiO_2 材料, 折射率为 $n_{\text{clad}} = 1.4542$, 纤芯掺锗, 折射率 $n_{\text{core}} = 1.4572$ 。

用有限元法对上述结构的光子晶体光纤进行计算, 所得模场分布如图 3 所示。

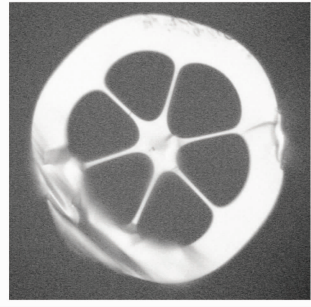


图 1 光子晶体光纤实际结构图

Fig. 1 Actual structure of photonic crystal fiber

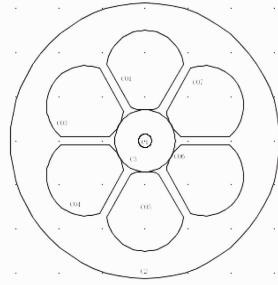


图 2 光子晶体光纤模型结构图

Fig. 2 Model structure of photonic crystal fiber

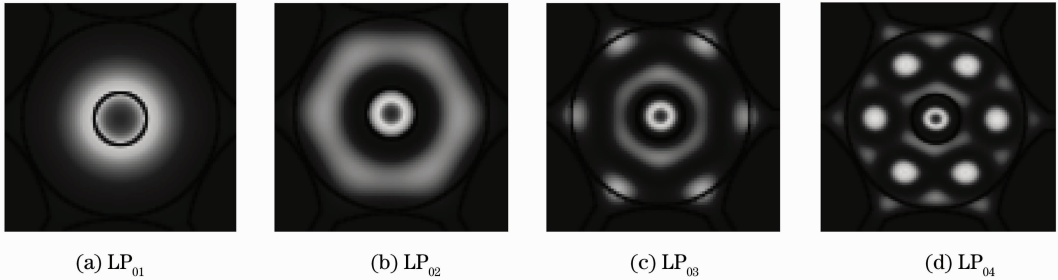


图 3 各模式模场图

Fig. 3 Mode-field distribution of each mode

由图 3 可见此光子晶体光纤有 LP_{01} 、 LP_{02} 、 LP_{03} 、 LP_{04} 四个明显的模式被激发, 其中 LP_{01} 是纤芯模式, LP_{02} 、 LP_{03} 和 LP_{04} 分别是第 1、2 和 3 阶包层模^[15]。

求出每一个模式对应的不同波长处的有效折射率, 进行二阶拟合, 得到有效折射率实部与波长的关系式。同时求出每个模式对应的纤芯和包层的电场、磁场分布, 计算出耦合系数。利用上述求出结果, 对柚子型光子晶体光纤均匀光栅的反射谱进行计算, 仿真结果如图 4 所示, 这里光栅周期、长度与实验所用模板参数一致, 实验所得的均匀光栅的反射谱如图 5 所示。

为了更加清楚地对比上述仿真和实验结果, 对

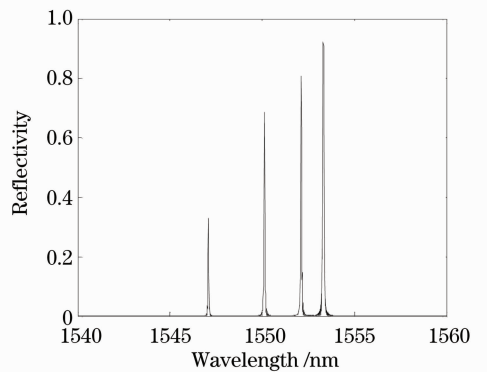


图 4 光子晶体光纤均匀光栅的反射谱

Fig. 4 Reflection spectrum of uniform grating in PCF

图 4 与图 5 中四个模式对应的谐振波长进行读数, 结果如表 1 所示。

表 1 模拟和实验数据对比

Table 1 Comparison between simulation and experimental datas

	Fundamental mode	First-order cladding mode	Second-order cladding mode	Third-order cladding mode
Simulation λ /nm	1553.40	1552.14	1550.12	1547.05
Experiment λ /nm	1553.342	1552.085	1550.071	1546.977

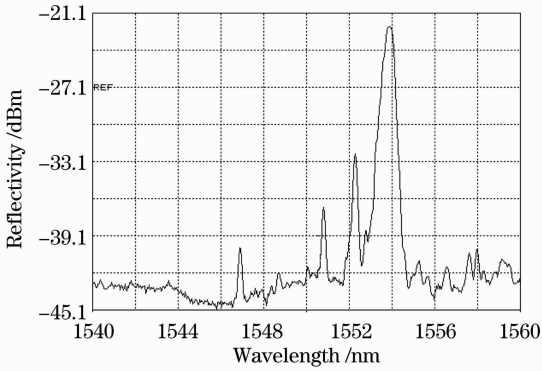


图 5 实验所得光子晶体光纤均匀光栅的反射谱
Fig. 5 Reflection spectrum of uniform grating in PCF of the experiments

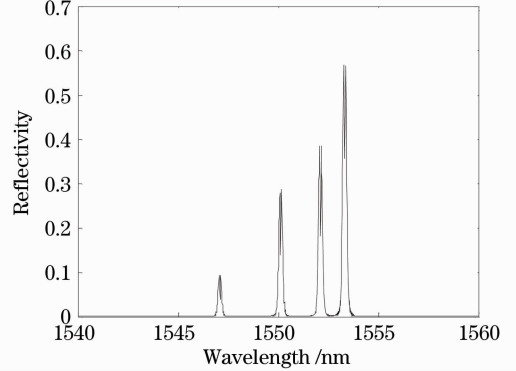


图 6 啁啾系数 0.05 nm/cm 时光栅反射谱
Fig. 6 Reflection spectrum of chirped gratings for chirp coefficient 0.05 nm/cm

由表 1 可知仿真结果与实验结果所得的各谐振峰的谐振波长相差不大,而且对应的反射率的规律也相似。

3.2 啁啾光栅参数对光子晶体光纤啁啾光栅反射谱的影响

在上述结构的柚子型光子晶体光纤上写入啁啾光栅,啁啾光栅参数为长度 $L=2$ cm,周期 $P=534$ nm,折变量 $\Delta n=0.0001$,啁啾系数 $C=0.05$ nm/cm。

3.2.1 啁啾系数对光子晶体光纤啁啾光栅反射谱的影响

用有限元法和传输矩阵法对光子晶体光纤啁啾光栅进行计算,得到不同啁啾系数时啁啾光子晶体光纤光栅的反射谱,如图 6~8 所示,分别对应啁啾系数为 0.05、0.10、0.50 nm/cm 时啁啾光栅的反射谱。

由图 4、6 和 7 可知,啁啾光栅与均匀光栅类似,同样具有多个反射峰,但啁啾光栅每个反射峰对应的带宽更宽。分析图 6~8 可以看出,随着啁啾系数的增大,各反射峰对应的带宽增加,反射率则减小。并且当啁啾系数增大到一定程度时四个模式对应的反射峰会连接到一起,形成一个很大的带宽,反射率则呈阶梯状分布。

3.2.2 折变量对啁啾光子晶体光纤光栅反射谱的影响

取光栅啁啾系数为 0.05 nm/cm,折变量为 0.00005 和 0.00015,得到对应光子晶体光纤啁啾光

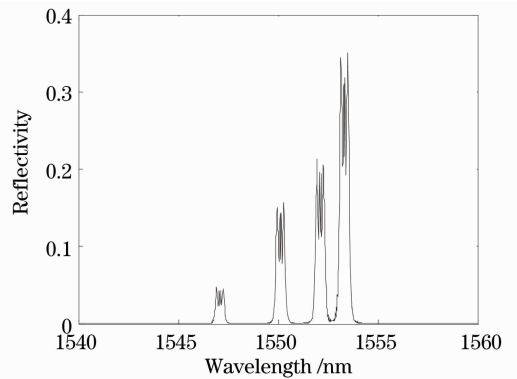


图 7 啁啾系数 0.10 nm/cm 时光栅反射谱
Fig. 7 Reflection spectrum of chirped gratings for chirp coefficient 0.10 nm/cm

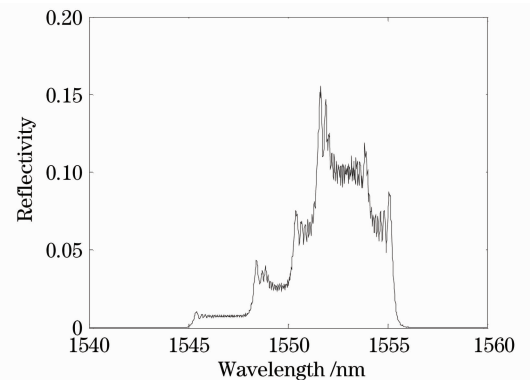


图 8 啁啾系数 0.50 nm/cm 时光栅反射谱
Fig. 8 Reflection spectrum of chirped gratings for chirp coefficient 0.50 nm/cm

栅的反射谱如图 9 和图 10 所示。

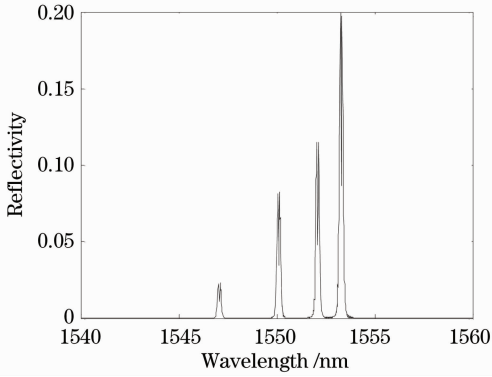


图 9 折变量为 0.00005 时啁啾光栅反射谱

Fig. 9 Reflection spectrum of chirped gratings for refractive indexes modulation 0.00005

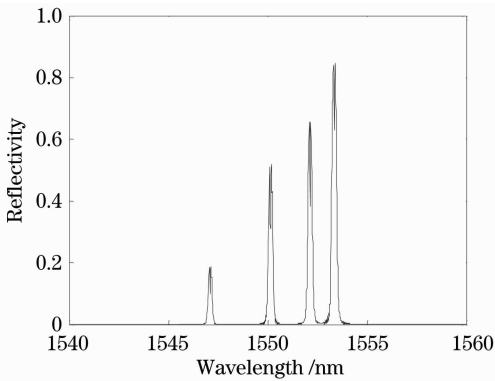


图 10 折变量为 0.00015 时啁啾光栅反射谱

Fig. 10 Reflection spectrum of chirped gratings for refractive indexes modulation 0.00015

对比图 6 和图 9、10 可知,折变量对啁啾光栅的主要影响是:随着它的增大可使每个反射峰的反射率有明显的提高,可见它对光栅设计具有重要意义。另外,它还会使每个反射峰对应的谐振波长向长波方向有微小的移动,带宽也有微小的增加。

3.3 光子晶体光纤结构对光子晶体光纤啁啾光栅反射谱的影响

除了对不同啁啾光栅参数的光子晶体光纤啁啾光栅进行分析外,还对光子晶体光纤本身参数对其啁啾光栅的影响进行计算与仿真,并得到了相应的规律,这里主要对柚子型光子晶体光纤内包层直径和纤芯直径对光栅的影响进行分析。啁啾光栅参数与上面仿真一致,折变量取 $\Delta n = 0.0001$,啁啾系数 $C = 0.05 \text{ nm/cm}$ 。

3.3.1 内包层直径对光子晶体光纤啁啾光栅反射谱的影响

图 6 是内包层直径 $d = 28 \mu\text{m}$ 的柚子型光子晶体光纤的反射谱,其它光纤参数保持一致,另取内包

层直径为 $27 \mu\text{m}$ 、 $29 \mu\text{m}$ 进行仿真,得到的啁啾光栅的反射谱如图 11 和 12 所示。

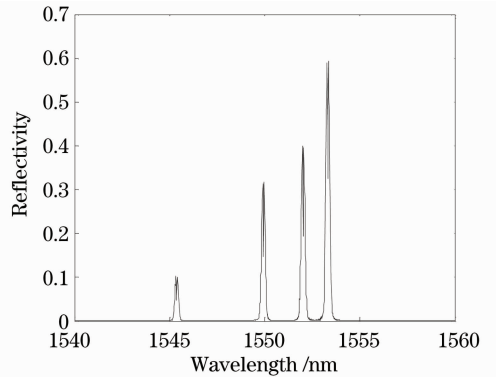


图 11 内包层直径为 $27 \mu\text{m}$ 时啁啾光栅反射谱

Fig. 11 Reflection spectrum of chirped gratings for inner-cladding diameter $27 \mu\text{m}$

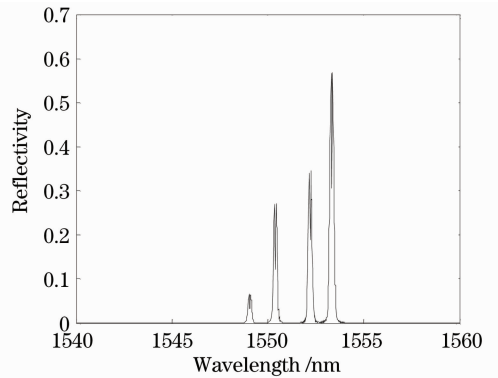


图 12 内包层直径为 $29 \mu\text{m}$ 时啁啾光栅反射谱

Fig. 12 Reflection spectrum of chirped gratings for inner-cladding diameter $29 \mu\text{m}$

由图 11、6 和 12 分析可知,随着光纤内包层直径的增大,每个模式对应的反射峰的谐振波长都增大,模式越高增大得越明显,同时各个模式对应的谐振波长之间的间距减小,模式越高,减小的越明显。

3.3.2 纤芯直径对光子晶体光纤啁啾光栅反射谱的影响

图 6 是纤芯直径 $d_{\text{core}} = 6 \mu\text{m}$ 的啁啾光栅的反射谱,其他光子晶体光纤参数都保持一致,再取纤芯直径为 $5 \mu\text{m}$ 、 $7 \mu\text{m}$ 的情况进行分析,得到的啁啾光栅的反射谱如图 13 和 14 所示。

对比图 13、6 和 14 可知,随着纤芯直径的增加,每个模式对应的反射峰的谐振波长向长波方向有所移动,模式越高,移动的越小。同时,各模式对应的谐振波长之间的距离有所增大,但没有内包层半径改变时变化的明显。另外,由图 11~14 可知各反射峰的带宽一直保持不变,不随光子晶体光纤参数的变化而改变。

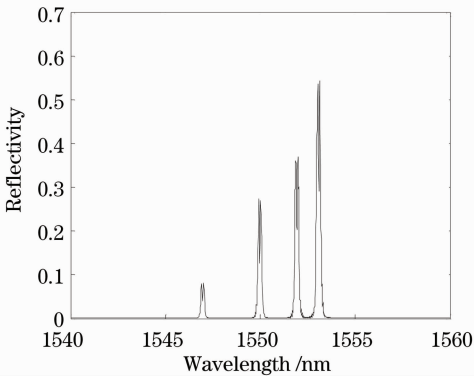


图 13 纤芯直径为 $5 \mu\text{m}$ 时啁啾光栅的反射谱
Fig. 13 Reflection spectrum of chirped gratings for core diameter $5 \mu\text{m}$

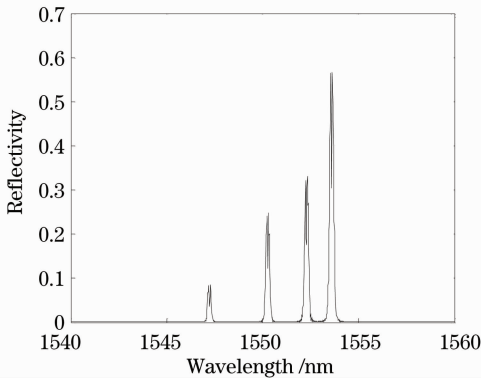


图 14 纤芯直径为 $7 \mu\text{m}$ 时啁啾光栅的反射谱
Fig. 14 Reflection spectrum of chirped gratings for core diameter $7 \mu\text{m}$

3.4 切趾对光子晶体光纤啁啾光栅的影响

从前面的反射谱中可以看出光子晶体光纤啁啾光栅的反射谱顶部出现严重的振荡,两边也会产生一些旁瓣,为了消除这些振荡和旁瓣,对它进行切趾处理^[16]。经过比较后,选用切趾效果相对较好的超高斯切趾和柯西切趾,超高斯切趾函数参数的最佳值是 $G=8$,柯西切趾的参数最佳值是 $C=0.5$ 。

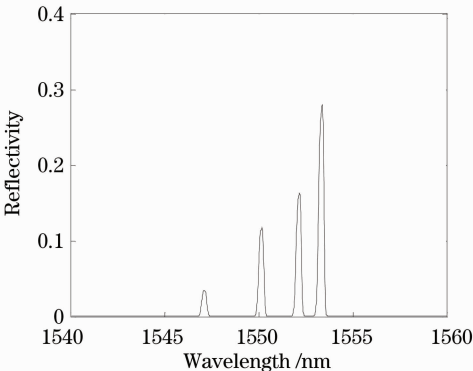


图 15 超高斯切趾后的反射谱
Fig. 15 Reflection spectrum with super-Gauss apodization

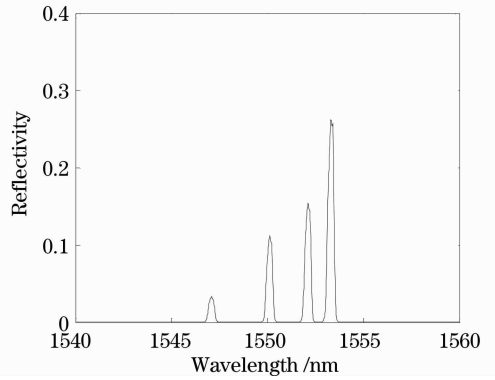


图 16 柯西切趾后的反射谱
Fig. 16 Reflection spectrum with Cauchy apodization

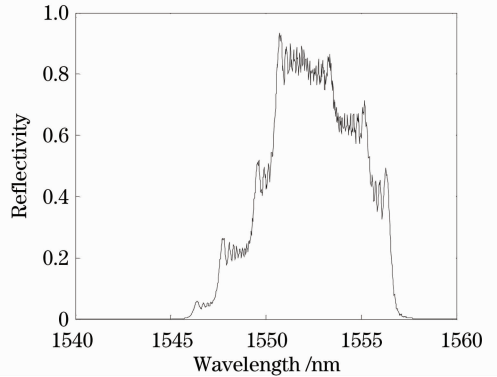


图 17 无切趾的反射谱

Fig. 17 Reflection spectrum without apodization

图 15 和图 16 是切趾后的光子晶体光纤啁啾光栅的反射谱。可以看出通过切趾函数的切趾,反射谱变得很平滑,特别是顶端的振荡基本可以消除,效果很明显。另外,相比于超高斯切趾,柯西切趾后反射谱的反射率要小一些。仿真时用一个切趾函数对四个反射峰同时切趾,每个反射峰的切趾效果都较好。切趾后的光子晶体光纤啁啾光栅将更有利于实际的应用。

当啁啾光栅参数取一定值时,四个反射峰会连接到一起,但是反射谱的波动太大,形状不规则,不适合应用,如图 17 所示。通过计算发现,当啁啾光栅参数取一定值时,再用适当的切趾函数进行变迹处理,会得到曲线平滑、波动较小的大带宽的反射谱,如图 18 所示。这里柚子型光子晶体光纤选用的是图 12 参数对应的光纤,啁啾光栅参数为 $L=3.0 \text{ cm}$, $C=7.0 \text{ nm/cm}$, $\Delta n=0.00035$ 。

对图 17 所用参数的大带宽光子晶体啁啾光栅进行切趾时选用的是柯西切趾,柯西参数取 0.2 。可以看出,切趾后 PCF 啁啾光栅的反射谱波动较小,曲线平滑,带宽和反射率的损耗也可以接受,效果较好。对此种类型的反射谱进行切趾时,也选用

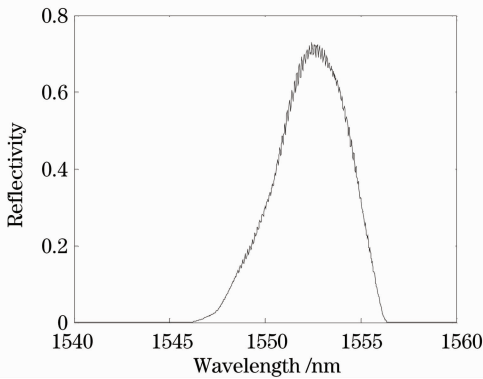


图 18 切趾后的反射谱

Fig. 18 Reflection spectrum with apodization

过高斯切趾、汉明切趾、正弦切趾和正切切趾等,但是通过比较发现柯西切趾的效果是最好的。

4 结 论

用有限元法和传输矩阵法对基于包层空气孔为柚子型结构的光子晶体光纤的啾啾光栅进行了计算与仿真。通过对均匀光栅的仿真结果与实验结果的对比,证明这种计算方法是正确的。所用结构的光子晶体光纤形成的啾啾光栅有四个明显的大带宽反射峰。并且当啾啾系数增大到一定程度时四个模式对应的反射峰会连接到一起,形成一个很大的带宽。

啾啾光栅参数和光子晶体光纤参数对 PCF 啾啾光栅的反射谱特性都有影响,啾啾光栅参数可以改变光栅各反射谱的反射率、带宽和谐振波长等。而光子晶体光纤参数会让各反射峰之间的间距改变,另外它同样可以使光栅各反射峰对应的谐振波长发生移动,而且这种移动要比啾啾光栅参数改变时明显得多。同时用切趾函数进行变迹处理,结果表明,用适当的切趾函数可以对四个反射峰同时切趾,而且每个反射峰的切趾效果都很好。对于反射谱波动较大的四个峰相连的大带宽啾啾光栅也可以进行切趾处理,计算所用参数的 PCF 啾啾光栅经过柯西切趾处理后反射谱曲线平滑,波动较小,适合实际应用。

参 考 文 献

- 1 J. Canning. Grating confinement in a photonic crystal fiber [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **176**(1-3): 121~124
- 2 J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549

- 3 Qi Yuefeng, Bi Weihong. Theoretical study on a kind of photonic crystal fiber grating based on structural change [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0106003
- 齐跃峰, 毕卫红. 一种基于结构性改变的光子晶体光纤光栅理论研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0106003
- 4 Liu Rui, Qu Ronghui, Cai Haiwen *et al.*. Analysis of the transmission spectral characteristics of fiber Bragg grating in photonic crystal fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1007~1012
- 刘锐, 瞿荣辉, 蔡海文等. 光子晶体光纤布拉格传输谱特性的分析 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1007~1012
- 5 H. Uranus, H. Hoekstra. Modelling of microstructured waveguides using a finite-element-based vectorial mode solver with transparent boundary conditions [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(12): 2795~2809
- 6 T. Fujisawa, M. Koshiba. Finite element characterization of chromatic dispersion in nonlinear holey fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **11**(13): 1481~1483
- 7 Arismar Cerqueira S. Jr, K. Z. Nobrega, H. E. Hernandez-Figueroa *et al.*. PCFDT: an accurate and friendly photonic crystal fiber design tool [J]. *Optik-Internat. J. Light Electron. Opt.*, 2008, **119**(15): 723~732
- 8 S. S. Mishra, V. K. Singh. Study of nonlinear properties of hollow core photonic crystal fiber [J]. *Optik-Internat. J. Light Electron. Opt.*, 2011, **122**(8): 687~690
- 9 K. Dossou, M. A. Byrne, L. C. Botten. Finite element computation of grating scattering matrices and application to photonic crystal band calculations [J]. *J. Comput. Phys.*, 2006, **219**(1): 120~143
- 10 T. Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *IEEE J. Lightwave Technology*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 11 Qi Yuefeng, Bi Weihong, Liu Yanyan *et al.*. Research on transmission spectrum characteristics of the photonic crystal Bragg fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1178~1183
- 齐跃峰, 毕卫红, 刘燕燕等. 光子晶体光纤布拉格传输特性研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1178~1183
- 12 M. A. Rodriguez, M. S. Malcuit, J. J. Butler. Transmission properties of refractive index-shifted Bragg grating [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **177**(1-6): 251~257
- 13 Ma Weitao, Zhou Jun, Xu Tiefeng *et al.*. Design of optical comb filter with multi-concatenated linearly chirped fiber gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1284~1289
- 马伟涛, 周骏, 徐铁峰等. 多级联线性啾啾光纤光栅梳状滤波器的优化设计 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1284~1289
- 14 M. H. Bataineh, O. R. Asfar. Multiple scales analysis of chirped Bragg gratings [J]. *AEU-Internat. J. Electron. Commun.*, 2010, **64**(5): 398~402
- 15 Liu Jianguo, Kai Guiyun, Xue Lifang *et al.*. The analysis of microstructure optical fiber Bragg grating resonant peaks [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(5): 369~373
- 刘建国, 开桂云, 薛力芳等. 微结构光纤光栅谐振峰的分析 [J]. *激光与红外*, 2006, **36**(5): 369~373
- 16 Shen Benjian, Zheng Guangwei, Tan Jichun *et al.*. Diffraction characteristic analysis of sinc-apodized reflective volume Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0902003
- 沈本剑, 郑光威, 谭吉春等. Sinc切趾反射体布拉格光栅衍射特性分析 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 0902003

栏目编辑: 谢 婧