先进光纤传感技术专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022032702

传输矩阵法求解长短周期级联光纤光栅传输谱

杨　颖*

（临沂大学 自动化与电气工程学院，山东 临沂 276005）

摘　要： 基于光纤光栅的模式耦合理论，用传输矩阵法对长短周期级联光纤光栅的传输谱特性进行分析。先由耦合模方程分别得到长周期光纤光栅（LPFG）、连接光纤段和短周期光纤光栅（FBG）的传输矩阵，然后将它们相乘得到总的传输矩阵，最后再结合边界条件求得长短周期级联光纤光栅（CLBG）的传输谱。进一步对CLBG的传输谱进行了数值模拟，并通过实验进行了验证。实验结果表明，CLBG的传输谱中出现了由纤芯模和包层模耦合形成的两个谐振峰，与模拟计算的结果一致，证明了传输矩阵法求解CLBG传输谱的可行性，为CLBG在多参量传感和测量领域的广泛应用提供了理论支持。

关键词： 长短周期级联光纤光栅；模式耦合理论；传输矩阵法；传输谱

中图分类号： TP212.14；TN253　**文章编号：** 1001－5868(2022)04－0677－06

Solving Long- and Short-Period Cascaded Fiber Gratings Transmission Spectrum by Transmission Matrix Method

YANG Ying

（School of Automation and Electrical Engineering，Linyi University，Linyi 276005，CHN）

Abstract： Based on the mode coupling theory of fiber grating，the transmission spectrum characteristics of cascaded long- and short-period fiber grating were analyzed by transmission matrix method. The transmission matrices of long-period fiber grating（LPFG），connected fiber and short-period fiber Bragg grating（FBG）were obtained by the coupling mode equation，and then the total transmission matrix of cascaded fiber gratings could be obtained by multiplying them. Finally，the transmission spectrum of long- and short-period cascaded fiber Bragg grating（CLBG）was obtained by combining boundary conditions. The transmission spectrum of CLBG was further simulated numerically and verified by experiment. The experimental results show that there are two resonant peaks formed by the coupling of core mode and cladding modes in the transmission spectrum of CLBG，which are consistent with the simulation results. It verifies the feasibility of the transmission matrix method to solve the transmission spectrum of CLBG，and provides theoretical support for the wide application of CLBG in the field of multi-parameter sensing and measurement.

Key words： long- and short-period cascaded fiber grating；coupled-mode theory；transmission matrix method；transmission spectrum

收稿日期：2022－03－27.

基金项目：国家自然科学基金项目（51471130）；山东省自然科学基金项目（ZR2015FL033）；临沂大学博士启动基金项目（LYDX2016BS079）.

* **通信作者：**杨　颖　　**E-mail：** Lysyyy168@126.com

0 引言

光在任何介质中的传播问题，理论上都可以由Maxwell方程加上适当的边界条件来求解，但是当光在折射率非均匀分布的光纤光栅中传播时，直接用Maxwell方程来求解是非常困难的。Kogelnik等[1]最早根据光纤光栅中折射率分布的周期性提出了用Fourier变换的方法对光纤光栅的光谱特性进行分析，但这种方法只能对弱调制型光纤光栅的光谱进行定性的分析，在对强调制型光纤光栅做定量的分析时，则与实际情况差别很大。之后，Weller Brophy等[2]提出利用Rouard的“多层模”理论对光纤光栅进行分析，即把光纤光栅分成许多个介质层，每个介质层内折射率可看成是均匀分布的，而在两种介质层的分界面上，则要用传输矩阵和递归的方法，逐个分析出光在每个分界面上的反射和折射特性。该方法较适合于数值模拟计算，但计算量大，运算效率低。后来，Erdogan[3]用耦合模理论分析了长周期光纤光栅的(LPFG)光谱特性，给出了均匀长周期光纤光栅光谱的解析解，同时，提出了适用于非均匀光纤光栅的传输矩阵求解法。该方法将结构复杂的光纤光栅分成一系列小的周期分布均匀的光纤光栅，先计算出每一小段均匀光纤光栅的传输矩阵，然后再把每一小段光纤光栅的传输矩阵相乘，即可求出整个光栅的传输特性。传输矩阵法是目前分析非均匀光纤光栅的最常用、最有效的方法。

单只的光纤布拉格光栅(FBG)和LPFG已广泛用于传感领域，但普通FBG上的大部分包层通常要经过边研磨处理、蚀刻或者使用D型光纤才能使纤芯模和周围环境发生彻底接触，这些处理方法都将使光栅的强度和坚固性大大降低，而LPFG在测量温度和应力等参数时会存在较大的交叉敏感问题，而且当光栅长度很长时很容易降低测量分辨率。近年来，人们结合FBG和LPFG各自的优势和特点并将其刻制或级联在一起，使其在传感和测量等领域发挥了更好的作用[4-5]。本课题组已对长短周期级联光纤光栅的耦合理论及传感特性进行了初步探索[6-7]，为进一步研究长短周期级联光纤光栅的传输谱特性，建立其物理量和化学量传感特性的物理模型，探讨结构优化的高灵敏度级联长短周期光纤光栅传感器的设计方案，以及探究用于多参量、大容量测量的级联长短周期光纤光栅传感网络的组网和解调技术提供了理论基础。本文将以模式耦合理论为基础，用传输矩阵法对CLBG的传输谱特性进行分析，并通过实验验证了该方法的正确性，为CLBG在传感及测量等领域的实际应用提供理论支持。

1 传输矩阵法求解CLBG传输谱

LPFG与FBG用一段光纤连接起来组成一个级联的长短周期光纤光栅CLBG。传输矩阵法求解该类光纤光栅传输谱示意图如图1所示。把CLBG分成LPFG段、连接光纤与FBG段，每一段都可看成是均匀的，把三段的传输矩阵相乘，即可得到总的传输矩阵，进而可求其传输谱。

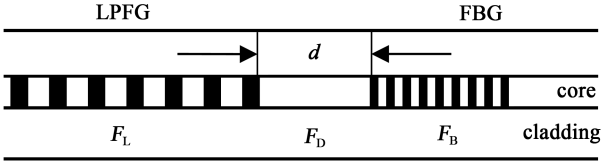


图1 CLBG的结构示意图

设LPFG和FBG之间的级联光纤的长度为d，$\boldsymbol{F}_{\mathrm{L}}$为LPFG段的传输矩阵，$\boldsymbol{F}_{\mathrm{D}}$为长度为$d$的连接光纤产生的相移矩阵，$\boldsymbol{F}_{\mathrm{B}}$为FBG段的传输矩阵。则CLBG总的传输矩阵可表示为

$$\boldsymbol{F}=\boldsymbol{F}_{\mathrm{L}}\boldsymbol{F}_{\mathrm{D}}\boldsymbol{F}_{\mathrm{B}} \tag{1}$$

1.1 LPFG段的传输矩阵

由光纤光栅模式耦合理论可知，光进入长周期光纤光栅后，正向传输的纤芯模可以被耦合为同向传输的纤芯模和包层模，因此，在长周期光纤光栅中只有前向传输的纤芯模和包层模，而无反向传输的模式，所以长周期光纤光栅中耦合模方程可表示为[8]

$$\frac{\mathrm{d}A^{\mathrm{co}}}{\mathrm{d}z}=\mathrm{i}A^{\mathrm{co}}K^{\mathrm{t}}_{\mathrm{co\text{-}co}}\exp[\mathrm{i}(\beta_{\mathrm{co}}-\beta_{\mathrm{co}})z]+\mathrm{i}A^{\mathrm{cl}}K^{\mathrm{t}}_{\mathrm{cl\text{-}co}}\exp[\mathrm{i}(\beta_{\mathrm{cl}}-\beta_{\mathrm{co}})z] \tag{2}$$

$$\frac{\mathrm{d}A^{\mathrm{cl}}}{\mathrm{d}z}=\mathrm{i}A^{\mathrm{co}}K^{\mathrm{t}}_{\mathrm{co\text{-}cl}}\exp[\mathrm{i}(\beta_{\mathrm{co}}-\beta_{\mathrm{cl}})z]+\mathrm{i}A^{\mathrm{cl}}K^{\mathrm{t}}_{\mathrm{cl\text{-}cl}}\exp[\mathrm{i}(\beta_{\mathrm{co}}-\beta_{\mathrm{cl}})z] \tag{3}$$

其中，A^{co}，A^{cl}分别为光纤中正向传输的纤芯模和包层模的振幅；$K^{\mathrm{t}}_{\mathrm{co\text{-}co}}$，$K^{\mathrm{t}}_{\mathrm{cl\text{-}co}}$分别为纤芯模的自耦合和纤芯模与包层模的互耦合系数；β_{co}，β_{cl}分别为纤芯模和包层模的传播常数。

因光进入LPFG时，没有反方向的传输模式，所以反方向的传输模式对应的矩阵元素为零。因此，传统的LPFG段的2×2的传输矩阵可以改写成4×4的矩阵形式[9]：

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{L}}=\begin{bmatrix}\cos(\gamma_{\mathrm{c}}L_{\mathrm{L}})+\mathrm{i}\dfrac{\hat{\sigma}}{\gamma_{\mathrm{c}}}\sin(\gamma_{\mathrm{c}}L_{\mathrm{L}}) & 0 & \mathrm{i}\dfrac{\kappa}{\gamma_{\mathrm{c}}}\sin(\gamma_{\mathrm{c}}L_{\mathrm{L}}) & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\\ \mathrm{i}\dfrac{\kappa}{\gamma_{\mathrm{c}}}\sin(\gamma_{\mathrm{c}}L_{\mathrm{L}}) & 0 & \cos(\gamma_{\mathrm{c}}L_{\mathrm{L}})-\mathrm{i}\dfrac{\hat{\sigma}}{\gamma_{\mathrm{c}}}\sin(\gamma_{\mathrm{c}}L_{\mathrm{L}}) & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix} \tag{4}$$

式中，

$$\gamma_{\mathrm{c}}\equiv\sqrt{\kappa^{2}+\hat{\sigma}^{2}}$$

$$\hat{\sigma}\equiv\delta+\frac{\sigma_{11}-\sigma_{22}}{2}-\frac{1}{2}\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}z}$$

$$\delta\equiv\frac{1}{2}(\beta_{\mathrm{co}}-\beta_{\mathrm{cl}})-\frac{\pi}{\Lambda_{\mathrm{L}}}=\pi\Delta n_{\mathrm{eff}}\left(\frac{1}{\lambda}-\frac{1}{\lambda_{\mathrm{D}}}\right) \tag{5}$$

式中，L_{L} 为 LPFG 的长度，Λ_{L} 为 LPFG 的周期，κ 为纤芯模式与包层模式的互耦合系数，$\hat{\sigma}$ 为直流耦合系数，δ 为纤芯模与一阶 ν 次包层模之间的解调系数，σ_{11} 为纤芯模式的自耦合系数，σ_{22} 为包层模式的自耦合系数。由于光纤中的折射率调制只存在于纤芯中，相对于纤芯模式之间的耦合或纤芯模式与包层模式之间的耦合，包层各模式之间的耦合可以忽略，所以 $\sigma_{22}=0$；$\frac{1}{2}\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}z}$是考虑光纤光栅周期的啁啾化而引入的耦合项，对于均匀光纤光栅，其值为 $\frac{1}{2}\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}z}=0$；$\lambda_{\mathrm{D}}=\Lambda_{\mathrm{L}}\Delta n_{\mathrm{eff}}$ 为 LPFG 的设计波长，Δn_{neff} 为纤芯模和包层模的有效折射率差，$\Delta n_{\mathrm{neff}}=n_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{co}}-n_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{cl}}$，$n_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{co}}$ 和 $n_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{cl}}$ 分别为纤芯模和包层模的有效折射率。

1.2　级联光纤段的相移矩阵

当光经过两个光栅之间的连接光纤时会产生相移，相移矩阵 $\boldsymbol{F}_{\mathrm{d}}$ 可表示为

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{d}}=\begin{bmatrix}\exp\left(\dfrac{\mathrm{i}\varphi}{2}\right) & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & \exp\left(-\dfrac{\mathrm{i}\varphi}{2}\right) & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix} \tag{6}$$

其中，$\frac{\varphi}{2}=\frac{2\pi\Delta n_{\mathrm{eff}}}{\lambda}d$。

1.3　FBG 段的传输矩阵

FBG 段的传输矩阵 $\boldsymbol{F}_{\mathrm{B}}$ 的求解较为复杂，可采用文献[10]中给出的矩阵求解方法，通过求解一阶微分方程的方法进行求解[10]。FBG 段的耦合模方程可表示为

$$\frac{\mathrm{d}A^{\mathrm{co}}}{\mathrm{d}z}=\mathrm{i}K_{\mathrm{B}}^{\mathrm{co\text{-}co}}A^{\mathrm{co}}+\frac{1}{2}\mathrm{i}K_{\mathrm{B}}^{\mathrm{co\text{-}co}}B^{\mathrm{co}}\exp(-\mathrm{i}2\delta_{\mathrm{co}}z)+\frac{1}{2}\mathrm{i}K_{\mathrm{B}}^{\mathrm{cl\text{-}co}}A^{\mathrm{cl}}\exp(-\mathrm{i}2\delta'_{\mathrm{cl}}z)+\frac{1}{2}\mathrm{i}K_{\mathrm{B}}^{\mathrm{cl\text{-}co}}B^{\mathrm{cl}}\cdot\exp(-\mathrm{i}2\delta_{\mathrm{cl}}z) \tag{7}$$

$$\frac{\mathrm{d}A_{\mathrm{v}}^{\mathrm{cl}}}{\mathrm{d}z}=\frac{1}{2}\mathrm{i}K_{\mathrm{B}}^{\mathrm{cl\text{-}co}}A^{\mathrm{co}}\exp(\mathrm{i}2\delta'_{\mathrm{cl}}z)+\frac{1}{2}\mathrm{i}K_{\mathrm{B}}^{\mathrm{cl\text{-}co}}B^{\mathrm{co}}\cdot\exp(-\mathrm{i}2\delta_{\mathrm{cl}}z) \tag{8}$$

$$\frac{\mathrm{d}B^{\mathrm{co}}}{\mathrm{d}z}=-\frac{1}{2}\mathrm{i}K_{\mathrm{B}}^{\mathrm{co\text{-}co}}A^{\mathrm{co}}\exp(\mathrm{i}2\delta_{\mathrm{co}}z)-\mathrm{i}K_{\mathrm{B}}^{\mathrm{co\text{-}co}}B_{\mathrm{co}}-\frac{1}{2}\mathrm{i}K_{\mathrm{B}}^{\mathrm{cl\text{-}co}}A^{\mathrm{cl}}\exp(\mathrm{i}2\delta_{\mathrm{cl}}z)-\frac{1}{2}\mathrm{i}K_{\mathrm{B}}^{\mathrm{cl\text{-}co}}B^{\mathrm{cl}}\exp(\mathrm{i}2\delta'_{\mathrm{cl}}z) \tag{9}$$

$$\frac{\mathrm{d}B_{\mathrm{v}}^{\mathrm{cl}}}{\mathrm{d}z}=-\frac{1}{2}\mathrm{i}K_{\mathrm{B}}^{\mathrm{cl\text{-}co}}A^{\mathrm{co}}\exp(\mathrm{i}2\delta_{\mathrm{cl}}z)-\frac{1}{2}\mathrm{i}K_{\mathrm{B}}^{\mathrm{cl\text{-}co}}B^{\mathrm{co}}\exp(-\mathrm{i}2\delta'_{\mathrm{cl}}z) \tag{10}$$

其中，A^{co}，A^{cl} 分别为光纤光栅中正向传输的纤芯模和包层模的振幅；B^{co}，B^{cl} 分别为反向传输的纤芯模和包层模的振幅；$K_{\mathrm{B}}^{\mathrm{cl\text{-}co}}$，$K_{\mathrm{B}}^{\mathrm{co\text{-}co}}$ 分别为纤芯模与包层模的互耦合系数和纤芯模的自耦合系数；δ_{co}，δ'_{cl}，δ_{cl} 为光纤光栅的解调参量，表达式分别为

$$\begin{cases}\delta_{\mathrm{co}}=\dfrac{1}{2}\left(2\beta_{\mathrm{co}}-\dfrac{2\pi}{\Lambda_{\mathrm{B}}}\right)\\ \delta'_{\mathrm{cl}}=\dfrac{1}{2}\left(\beta_{\mathrm{co}}-\beta_{\mathrm{cl}}-\dfrac{2\pi}{\Lambda_{\mathrm{B}}}\right)\\ \delta_{\mathrm{cl}}=\dfrac{1}{2}\left(\beta_{\mathrm{co}}+\beta_{\mathrm{cl}}-\dfrac{2\pi}{\Lambda_{\mathrm{B}}}\right)\end{cases} \tag{11}$$

方程组(7)～(10)为变系数常微分方程组，可采用文献[11]中给出的矩阵方法进行求解[11]。将方程组(7)～(10)写成一阶微分方程 $\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}z}+P(z)y=Q(z)$ 的形式，变量 y 代表 A^{co}，B^{co}，A^{cl} 和 B^{cl}，$P(z)$为与 z 有关的系数项矩阵，可表示为

$$P(z)=\begin{bmatrix} \mathrm{i}K_{\mathrm{B}}^{\mathrm{co\text{-}co}} & \mathrm{i}K_{\mathrm{B}}^{\mathrm{co\text{-}co}}\exp(-\mathrm{i}2\delta_{\mathrm{co}}z) & \frac{1}{2}\mathrm{i}K_{\mathrm{B}}^{\mathrm{cl\text{-}co}}\exp(-\mathrm{i}2\delta'_{\mathrm{cl}}z) & \frac{1}{2}\mathrm{i}K_{\mathrm{B}}^{\mathrm{cl\text{-}co}}\exp(-\mathrm{i}2\delta_{\mathrm{cl}}z) \\ -\frac{1}{2}\mathrm{i}K_{\mathrm{B}}^{\mathrm{co\text{-}co}}\exp(\mathrm{i}2\delta_{\mathrm{co}}z) & -\mathrm{i}K_{\mathrm{B}}^{\mathrm{co\text{-}co}} & -\frac{1}{2}\mathrm{i}K_{\mathrm{B}}^{\mathrm{cl\text{-}co}}\exp(\mathrm{i}2\delta_{\mathrm{cl}}z) & -\frac{1}{2}\mathrm{i}K_{\mathrm{B}}^{\mathrm{cl\text{-}co}}\exp(\mathrm{i}2\delta'_{\mathrm{cl}}z) \\ \frac{1}{2}\mathrm{i}K_{\mathrm{B}}^{\mathrm{cl\text{-}co}}\exp(\mathrm{i}2\delta'_{\mathrm{cl}}z) & \frac{1}{2}\mathrm{i}K_{\mathrm{B}}^{\mathrm{cl\text{-}co}}\exp(-\mathrm{i}2\delta_{\mathrm{cl}}z) & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2}\mathrm{i}K_{\mathrm{B}}^{\mathrm{cl\text{-}co}}\exp(\mathrm{i}2\delta_{\mathrm{cl}}z) & -\frac{1}{2}\mathrm{i}K_{\mathrm{B}}^{\mathrm{cl\text{-}co}}\exp(-\mathrm{i}2\delta'_{\mathrm{cl}}z) & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{12}$$

方程 $\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}z}+P(z)y=Q(z)$ 中，$Q(z)=0$，即 $y(z=0)$。由 $\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}z}+P(z)y=Q(z)$ 的通解形式 $y=\mathrm{e}^{-\int P(z)\mathrm{d}z}\left(\int Q(z)\mathrm{e}^{\int P(z)\mathrm{d}z}\mathrm{d}z+C\right)$，$C$ 为光栅中各模式的初始条件，得到一阶微分方程组(7)～(10)的解为

$$\begin{bmatrix} A^{\mathrm{co}}(z) \\ B^{\mathrm{co}}(z) \\ A^{\mathrm{cl}}(z) \\ B^{\mathrm{cl}}(z) \end{bmatrix}=\exp\left(-\int_0^{L_{\mathrm{B}}}P(z)\mathrm{d}z\right)\begin{bmatrix} A^{\mathrm{co}}(0) \\ B^{\mathrm{co}}(0) \\ A^{\mathrm{cl}}(0) \\ B^{\mathrm{cl}}(0) \end{bmatrix} \tag{13}$$

其中，$\exp\left(-\int_0^{L_{\mathrm{B}}}P(z)\mathrm{d}z\right)$ 可写成矩阵形式：

$$\exp\left(-\int_0^{L_{\mathrm{B}}}P(z)\mathrm{d}z\right)=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} \end{bmatrix} \tag{14}$$

代入 $z=L_{\mathrm{B}}$（L_{B} 为 FBG 的长度）和 FBG 的初始条件，方程(13)可改写成如下形式：

$$\begin{bmatrix} A^{\mathrm{co}}(L_{\mathrm{B}}) \\ B^{\mathrm{co}}(0) \\ A^{\mathrm{cl}}(L_{\mathrm{B}}) \\ B^{\mathrm{cl}}(0) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1 & -r_{12} & 0 & -r_{14} \\ 0 & r_{22} & 0 & r_{24} \\ 0 & -r_{32} & 1 & -r_{34} \\ 0 & r_{42} & 0 & r_{44} \end{bmatrix}^{-1}\times \begin{bmatrix} r_{11} & 0 & r_{13} & 0 \\ -r_{21} & 1 & -r_{23} & 0 \\ r_{31} & 0 & r_{33} & 0 \\ -r_{41} & 0 & -r_{43} & 1 \end{bmatrix}\times\begin{bmatrix} A^{\mathrm{co}}(0) \\ B^{\mathrm{co}}(L_{\mathrm{B}}) \\ A^{\mathrm{cl}}(0) \\ B^{\mathrm{cl}}(L_{\mathrm{B}}) \end{bmatrix} \tag{15}$$

其中，

$$\begin{bmatrix} 1 & -r_{12} & 0 & -r_{14} \\ 0 & r_{22} & 0 & r_{24} \\ 0 & -r_{32} & 1 & -r_{34} \\ 0 & r_{42} & 0 & r_{44} \end{bmatrix}^{-1}\times \begin{bmatrix} r_{11} & 0 & r_{13} & 0 \\ -r_{21} & 1 & -r_{23} & 0 \\ r_{31} & 0 & r_{33} & 0 \\ -r_{41} & 0 & -r_{43} & 1 \end{bmatrix} \tag{16}$$

即为 FBG 段的传输矩阵 $\boldsymbol{F}_{\mathrm{B}}$。

最后，结合 CLBG 的初始条件，光纤的入射端和出射端各传输模式对应的幅值关系可表示为

$$\begin{bmatrix} A^{\mathrm{co}}(L) \\ B^{\mathrm{co}}(0) \\ A^{\mathrm{cl}}(L) \\ B^{\mathrm{cl}}(0) \end{bmatrix}=\boldsymbol{F}\times\begin{bmatrix} A^{\mathrm{co}}(0)=1 \\ B^{\mathrm{co}}(L)=0 \\ A^{\mathrm{cl}}(0)=0 \\ B^{\mathrm{cl}}(L)=0 \end{bmatrix} \tag{17}$$

其中，$L=L_{\mathrm{L}}+d+L_{\mathrm{B}}$，$A^{\mathrm{co}}(L)$，$B^{\mathrm{co}}(0)$，$A^{\mathrm{cl}}(L)$，$B^{\mathrm{cl}}(0)$ 求解后，得到 CLBG 的反射率：

$$R_{\mathrm{B}}=|B^{\mathrm{co}}(0)/A^{\mathrm{co}}(0)|^2 \tag{18}$$

2 CLBG 传输谱的数值模拟

模拟用光栅参数：纤芯半径 $a_1=2.625\ \mu\mathrm{m}$，包层半径 $a_2=62.5\ \mu\mathrm{m}$，纤芯折射率 $n_1=1.458$，包层折射率 $n_2=1.45$；光栅周期 $\Lambda_{\mathrm{L}}=500\ \mu\mathrm{m}$，$\Lambda_{\mathrm{B}}=0.528\ \mu\mathrm{m}$；光栅长度 $L_{\mathrm{L}}=16\ \mathrm{mm}$，$L_{\mathrm{B}}=10\ \mathrm{mm}$；光栅折变量 $\sigma_{\mathrm{L}}(z)=0.000\ 192$，$\sigma_{\mathrm{B}}(z)=0.000\ 222$；连接光纤长度 $d=14\ \mathrm{mm}$。由 Matlab 模拟得到的 CLBG 的传输谱如图 2 所示。级联结构中 LPFG 和 FBG 相互调制的结果使 CLBG 的反射谱中出现了两个反射峰，右侧反射峰位于 1 533.76 nm 处，反射率为 0.120 7 dB，是由 FBG 反射形成的；左侧反射峰位于 1 532.20 nm 处，反射率为 0.068 5 dB，是由 LPFG 和 FBG 共同作用形成的。上述模拟计算结果与文献[12]的实验结果基本一致。

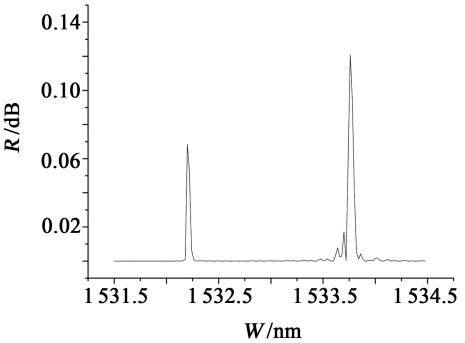


图 2 CLBG 的传输谱

3　CLBG 传输谱的实验研究

实验中刻制光栅所用的光纤为 Corning 公司提供的 SMF-28 光纤，光纤参数为：$a_1=4.07\ \mu m$，$a_2=62.5\ \mu m$，$n_1=1.4521$，$n_2=1.4468$。光源为 OS-D-S-1260～1650-05-FC/APC 型 SLED 超宽带稳定光源，光谱宽度为 390 nm，中心波长为 1 450 nm。激光器采用 Braggstar Industrial-200 型 KrF 准分子激光器，单脉冲能量为 16 mJ，工作波长为 248 nm。光谱仪是 AQ6370 型高精度光谱分析仪，测量波长范围为 600～1 700 nm，长波段分辨率为 0.02 nm。采用 UTM100MVTP 型移动平台，最小步长为 0.1 μm，分辨率为 1 μm。

实验前为增强光纤的光敏性，先将光纤置于室温 120 大气压下进行了一个月的载氢处理。LPFG 利用逐点写入法刻制，长度为 $L_L=30$ mm，周期为 $\Lambda_L=570\ \mu m$，其透射谱如图 3 所示，谐振波长 λ_L 为 1 552.31 nm，透射率 T 为 −3.742 dB；FBG 采用相位掩模板法刻制，相位掩模板周期为 1 070 nm，激光器扫描速度为 0.05 mm/s。FBG 长度为 $L_B=12$ mm，周期 $\Lambda_B=0.535\ \mu m$，其反射谱如图 4 所示，谐振波长 λ_B 为 1 554.11 nm，反射率 R 为 −14.496 dB。

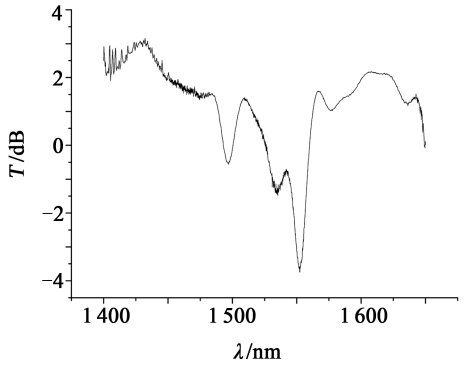


图 3　实验刻制 LPFG 的传输谱

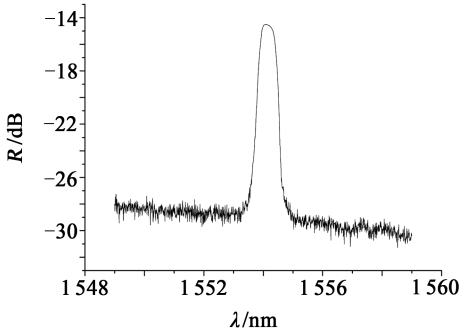


图 4　实验刻制 FBG 的传输谱

用古河 S178-A-A-0001 型光纤熔接机将两光栅熔接在一起，熔接损耗小于等于 0.02 dB。连接光纤长度为 15 mm。用光谱仪测试 CLBG 的反射谱，结果如图 5 所示，与模拟计算的情况一致。CLBG 反射谱中也出现了两个谐振峰，左侧谐振峰对应的谐振波长为 1 550.92 nm，损耗为 −24.08 dB；右侧谐振峰对应的谐振波长为 1 554.09 nm，损耗为 −16.354 dB。右侧损耗峰较大，主要是由于光路中的传输损耗较小造成的。

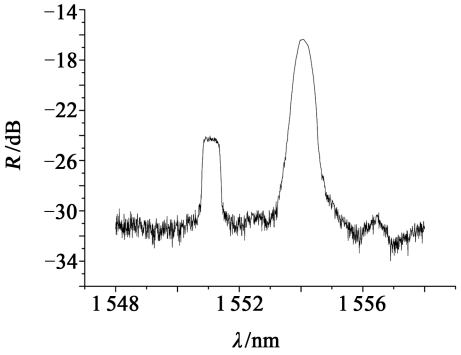


图 5　实验测试 CLBG 的传输谱

4　结论

传输矩阵法是目前分析非均匀光纤光栅的最有效的方法，CLBG 可以看成是由长周期光纤光栅、连接光纤和短周期光纤光栅组合成的非均匀光栅。根据耦合模理论，先计算出 LPFG、连接光纤和 FBG 的传输矩阵后再将它们相乘便可得到 CLBG 总的传输矩阵，再结合边界条件即可求得 CLBG 的传输谱。实验刻制了长、短周期光纤光栅，通过观测两个光纤光栅级联后的传输谱，验证了传输矩阵法求解 CLBG 传输谱的正确性，为 CLBG 在传感、测量领域的广泛应用提供了理论依据。

参考文献：

[1] Kogelnik H. Filter response of non uniform almost-periodic structures[J]. Bell Syst. Tech. J., 1976, 55(1): 109-126.

[2] Weller Brophy L A, Hall D G. Analysis of waveguide gratings: Application of Rouard's method[J]. J. Opt. Soc. Am. B, 1985, 2(6): 863-871.

[3] Erdogan T. Fiber grating spectra[J]. J. Lightwave Technol., 1997, 15(8): 1277-1294.

[4] Guo H L, Xiao G Z, Mrad N, et al. Simultaneous interrogation of a hybrid FBG/LPG sensor pair using a monolithically integrated echelle diffractive grating[J]. J. Lightwave Technol., 2009, 27: 2100-2104.

[5] Grattan K T V, Sun T. Fiber optic sensor technology: An overview[J]. Sensors and Actuators A, 2000, 82: 40-61.

[6] Yang Ying, Gu Zhengxian. Temperature and bending simultaneous sensing properties of cascaded grating[J]. Appl.

Opt., 2013, 53(2): 165-173.

[7] Yang Ying, Gu Zhengxian, Cao Ying. Coupling mechanism and sensing properties of cascaded long- and short-period gratings[J]. Optik, 2016, 127: 9427-9435.

[8] Erdogan T. Cladding mode resonances in short and long period fiber grating filters[J]. Opt. Soc. Am. A, 1997, 14(8): 1760-1773.

[9] Chern G W, Wang L A, Lin C Y. Transfer-matrix approach based on modal analysis for modeling corrugated long-period fiber gratings[J]. Appl. Opt., 2001, 40(25): 4476-4486.

[10] 曹 莹, 顾铮先. 级联长周期光纤光栅和 Bragg 光纤光栅光学特性的研究[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 91-98.
Cao Ying, Gu Zhengxian. Optical properties of cascaded long-period and fiber Bragg gratings[J]. Chinese J. Lasers, 2012, 39(4): 91-98.

[11] Abrishamian F, Nakai Y, Sato S, et al. An efficient approach for calculating the reflection and transmission spectra of fiber Bragg gratings with acoustically induced microbending[J]. Opt. Fiber Technol., 2007, 13: 32-38.

[12] Zhang Aping, Tao X M. Cladding-mode-assisted recouplings in concatenated long-period and fiber Bragg gratings[J]. Opt. Lett., 2002, 27: 1214-1216.

作者简介:

杨 颖(1970—),女,山东省临沂市人,博士,教授,主要研究方向为光纤光栅传感、光电测量工程,以及光电子技术。