

不同参量的倾斜布喇格光栅级联传输谱特性研究

王金豆,葛海波,李彩虹,侯元萌

(西安邮电大学 电子工程学院,西安 710061)

摘要:为给不同参量的倾斜布喇格光纤光栅(TFBG)级联提供依据,通过传输矩阵法对FBG级联后的传输谱进行理论分析,利用光学仿真软件模拟了倾斜角度、光栅周期和级联相对位置不同对级联光栅(2段光栅)传输谱的影响。分析仿真结果可以得出:倾角、光栅周期及级联相对位置的不同对传输光谱均有影响,会不同程度地引起谐振峰的深度变化或中心波长的漂移,因此可以通过改变级联TFBG的参量来实现不同特性的传输谱。

关键词:级联;倾斜布喇格光纤光栅;传输矩阵法;传输谱

中图分类号:TN914 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2019)09-0039-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.09.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study of transmission spectrum characteristics of cascading different parametric tilted fiber Bragg gratings

WANG Jindou, GE Haibo, LI Caihong, HOU Yuanmeng

(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to provide a theoretical basis for two stages of tilted fiber Bragg gratings (TFBG) with different parameters, this paper theoretically analyzes the cascaded FBG transmission spectrum by the transfer matrix method, and optical simulation software studies the effect on the transmission spectrum of cascading gratings (two gratings) when the tilt angle, grating period and cascade position are different. By analyzing the simulation results, it can be concluded that the transmission spectrum is affected by these parameters, which will cause the depth variation of the resonance peak or the drift of the center wavelength to varying degrees. Therefore, the parameters of the cascade TFBG can be changed to achieve the transmission spectrum of different characteristics.

Key words: cascade; tilted FBG; transfer matrix method; transmission spectrum

0 引言

倾斜布喇格光纤光栅(TFBG)是一种特殊的光纤光栅,其光栅波矢方向和光纤轴向方向存在一定的夹角^[1],使得TFBG可以将一部分前向导模耦合成向后传导的包层模^[2],因此其透射谱中不仅包含纤芯模的谐

振峰,还包含一系列的包层模谐振峰^[3,4]。目前,国内外对于单个TFBG的研究已有很多,Y.Miao等人实现了温度和应变的同时测量^[5]。Qi.Jiang等人分析了FBG和TFBG在传感特性方面的差异^[6]。前人对于TFBG的研究主要集中于理论研究和传感特性研究等方面,对于级联的TFBG谱特性分析研究得比较少,而研究其谱特性具有十分重要的实际意义。在不同的应用领域,对光谱也有着不同的要求,如用于带阻滤波器的TFBG,其光谱需要有一定的带宽;用于传感特性研究的TFBG则需要较窄的谐振峰宽度和偏移量较大的波长^[7,8]。单个的TFBG若想要调整损耗峰的中心波长、深度和带宽,只能通过改变倾斜角、折射率、光栅周期和折射率调制深度等参量^[9],即单个TFBG的光谱设计具

收稿日期:2019-04-03。

基金项目:陕西省自然科学基金项目(2011JM8038)资助。

作者简介:王金豆(1995-),女,硕士研究生,现就读于西安邮电大学电子工程学院电子科学与技术学科物理电子学专业,主要从事光电子器件和光纤光栅解调方面的研究。在读本科期间曾获校二等奖学金、三等奖学金、全国大学生数学竞赛二等奖以及“优秀团员”称号等,研究生期间曾获二等奖学金和“互联网+”创新创业大赛校三等奖。



有一定的局限性。将多段 TF BG 进行组合则可以构成级联倾斜布喇格光纤光栅(CTFBG)。CTFBG 具有谱形丰富、谐振峰振幅大等优点,且在传感方面有更高的灵敏度^[10]。但由于制作工艺等方面的限制,要制作 2 个完全相同的 TF BG 并不容易。本文对 2 段不同的 TF BG 进行级联的非匹配 CTFBG 进行仿真分析,主要关注倾角、光栅周期及级联相对位置不同时对于 CTFBG 光谱的影响。

1 理论分析

CTFBG 的结构示意图如图 1 所示。 θ 表示 TF BG 的倾角,2 段光栅被相移为 φ 、长度为 d 的光纤隔开,当 $\varphi=0$ 、 $d=0$ 且 2 个 TF BG 各结构参量均相等时,此时的 CTFBG 可以看做是 TF BG。本文中研究的是 $\varphi=0$ 、 $d=0$ 的情况。CTFBG 的传输原理如下:入射光在进入 TF BG1 时,部分光波能量会被耦合到包层中,由于级联长度 d 有限,因此在包层中的这部分光波能量会有部分衰减;在进入 TF BG2 后,包层中的部分光波能量又会被重新耦合到纤芯中,并且会和纤芯中的光波模相互影响作用,形成和单个 TF BG 完全不同的光谱特性。

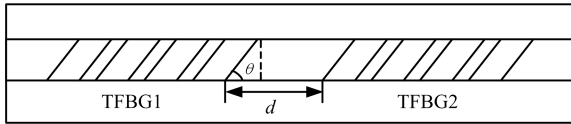


图 1 CTFBG 结构示意图

本文采用传输矩阵法对 CTFBG 进行计算,每个 TF BG 都有一个传输矩阵。由于 CTFBG 中不仅具有前向传输的纤芯模,还有向后传输的包层模,且各个模式均可以相互耦合。级联处的传输矩阵可以表示为一个 2×2 的矩阵,总的级联传输矩阵通过单个传输矩阵依次相乘。假定纤芯模振幅初始值为 a_0 ,包层模初始值为 b_0 ,则有:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = T_M \times T_M^c \cdots T_i \times T_i^c \cdots T_1 \times \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, a 和 b 分别表示级联后的纤芯模振幅和包层模振幅, M 表示级联的段数, i 表示第 i 段, T_i 表示第 i 段光栅的传输矩阵, T_i^c 为定位在相对级联连接处的传输矩阵。 T_i 和 T_i^c 的表达式如式(2)和式(3)所示:

$$T_i = \begin{bmatrix} a_i & b_i \\ b_i & a_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T_i^c = \begin{bmatrix} \exp\left[\frac{i\pi(n_{eff}^{co}-n_{eff}^{cl})d_g^i}{\lambda \cos \theta}\right] & 0 \\ 0 & \exp\left[\frac{-i\pi(n_{eff}^{co}-n_{eff}^{cl})d_g^i}{\lambda \cos \theta}\right] \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, n_{eff}^{co} 为纤芯的有效折射率, n_{eff}^{cl} 为包层的有效折射率, d_g^i 表示第 i 段光栅与第 $i+1$ 段光栅的间距, λ 表示 TF BG 的布喇格波长。另外, a_i 和 b_i 分别为:

$$a_i = \cos(\sqrt{\hat{\sigma}^2 + k^2}L) + i \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{\hat{\sigma}^2 + k^2}} \sin(\sqrt{\hat{\sigma}^2 + k^2}L) \quad (4)$$

$$b_i = i \frac{k}{\sqrt{\hat{\sigma}^2 + k^2}} \sin(\sqrt{\hat{\sigma}^2 + k^2}L) \quad (5)$$

其中, $\hat{\sigma} = \frac{\delta + (\sigma_{11} + \sigma_{22})}{2}$ 是直流耦合系数, k 为交流耦合系数, σ_{11} 为纤芯模的自耦合系数, σ_{22} 为纤芯模与包层模间的互耦合系数, δ 为纤芯模与包层模间的解调系数。初始条件 $a_0=1$, $b_0=0$,TF BG 长度为 L ,CTFBG 的透过率 $T = \left| \frac{a}{a_0} \right|^2$ 。根据透过率可以画出 CTFBG 透射谱的大致波形,而且纤芯模与包层模的振幅也可以通过式(1)计算得出,此时对 CTFBG 的透射谱波形有较为准确的预测。

2 数据仿真及结果分析

本文利用光学仿真软件对 CTFBG 的光谱进行了仿真,在参考了大量文献且考虑到实际情况后,将其中各结构参量的数值设置如下:纤芯半径为 $2.15 \mu\text{m}$,其折射率为 1.468;包层半径为 $62.5 \mu\text{m}$,其折射率为 1.46;模拟环境介质的半径理论上为无穷大,方便起见,将其设为 $200 \mu\text{m}$,其折射率为 1.43;TF BG 长度 L 为 $10000 \mu\text{m}$;折射率调制深度 n 为 0.0001,光栅周期 Λ 为 $0.53 \mu\text{m}$,级联长度 d 为 $5.3 \mu\text{m}$ 。由于 TF BG 与普通 FBG 的最大区别在于存在倾角,考虑到 TF BG 为短周期光纤光栅,其光栅周期小于 $1 \mu\text{m}$,周期上的微小差别都会对结果产生较大影响,且 2 个光栅的长度之比也会影响到传输谱特性的结果,所以本文主要从倾斜角度、光栅周期和级联相对位置 3 个方面进行分析。

2.1 倾角对于 CTFBG 传输光谱的影响

2 个光栅分别为 TF BG1 和 TF BG2,本文着重分析

了TFBG1和TFBG2的倾角 θ 不同时对于CTFBG传输光谱的影响。固定TFBG1的倾角 θ_1 为 3° ,TFBG2倾角 θ_2 分别为 0° 、 1° 、 2° 、 3° 、 4° 和 5° 时,CTFBG的透射谱如图2所示。可以看出,级联的TFBG透射谱中出现了2个纤芯模,且随着 θ_2 的增大,TFBG2各谐振峰的中心波长均向长波长方向移动,且谐振峰深度逐渐减小;TFBG1的中心波长虽然未有偏移,但谐振峰深度却和TFBG2的谐振峰深度一起减小;2个TFBG纤芯模中心波长的间距也随着 $\Delta\theta$ 的增大而增大,在TFBG1和TFBG2的倾角相等时,谐振峰深度为2个TFBG谐振峰深度的线性叠加,2个光栅的中心波长重合,此时谐振峰深度达到最大。

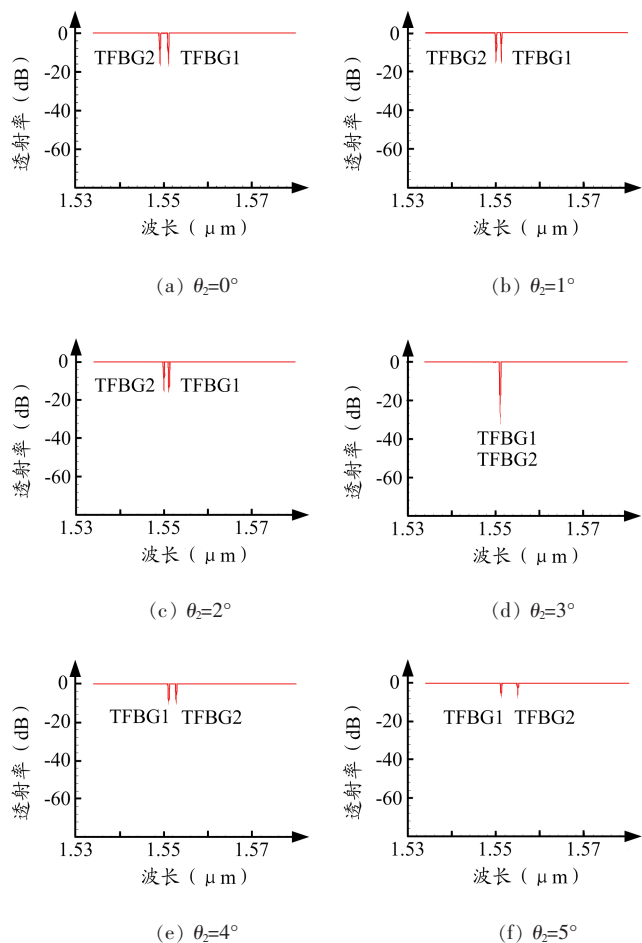


图2 倾角对于CTFBG光谱的影响

2.2 光栅周期对于CTFBG传输光谱的影响

固定TFBG1和TFBG2的倾角为 3° ,TFBG1的光栅周期 Λ_1 为 $0.53\text{ }\mu\text{m}$,改变TFBG2的光栅周期 Λ_2 分别为 $0.528\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.530\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.532\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.534\text{ }\mu\text{m}$,得到CTFBG的光谱图如图3所示。可以看出,TFBG2的光栅周期 Λ_2 的改变对于谐振峰深度并无影响,仅仅会

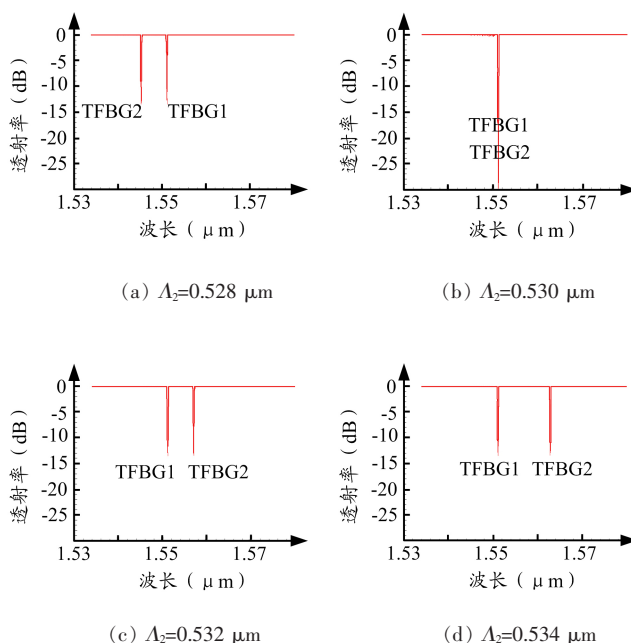


图3 光栅周期对于CTFBG光谱的影响

使其中心波长向长波长方向漂移,且漂移的幅度相同,即在其它参量均相等的情况下,光栅周期与波长呈线性关系。当TFBG1和TFBG2的光栅周期相等时,2个光栅的中心波长重合,此时谐振峰深度为2个光栅的谐振峰深度的线性叠加。

2.3 级联相对位置对于CTFBG传输光谱的影响

TFBG1和TFBG2的光栅长度分别为 L_1 和 L_2 ,定义 $q=L_1/L_2$, q 值的不同代表级联光栅位置的不同, q 值越接近于0,表示 L_1 相对于 L_2 较小,级联位置越靠近最左端; q 值越大,级联位置越靠近右端。这里固定TFBG1倾角 θ_1 为 1° ,TFBG2的倾角 θ_2 为 3° ,图4为不同 q 值时CTFBG的透射谱图。

当 $L_1=L_2=10000\text{ }\mu\text{m}$ 时, $q=1$,此时级联位置在中间,CTFBG的透射谱中出现了2个纤芯模,这是与单个TFBG不同的地方;当 $L_1=15000\text{ }\mu\text{m}$, $L_2=5000\text{ }\mu\text{m}$ 时, $q=3$,此时级联位置开始向右偏,左边的谐振峰深度开始增加,而右边的谐振峰深度减小,双重模式依然明显;当 $L_1=19000\text{ }\mu\text{m}$, $L_2=1000\text{ }\mu\text{m}$ 时, $q=19$,左侧的谐振峰深度继续增加,右侧的谐振峰深度依然减小,且双重模式已经逐渐弱化;当 $L_1=19900\text{ }\mu\text{m}$, $L_2=100\text{ }\mu\text{m}$ 时, $q=199$,此时TFBG2的长度已经非常小,CTFBG可以近似看作是一根 $20000\text{ }\mu\text{m}$ 的光栅,CTFBG的透射谱已经可以认为与单个TFBG完全一致,透射谱中只有一个纤芯模。

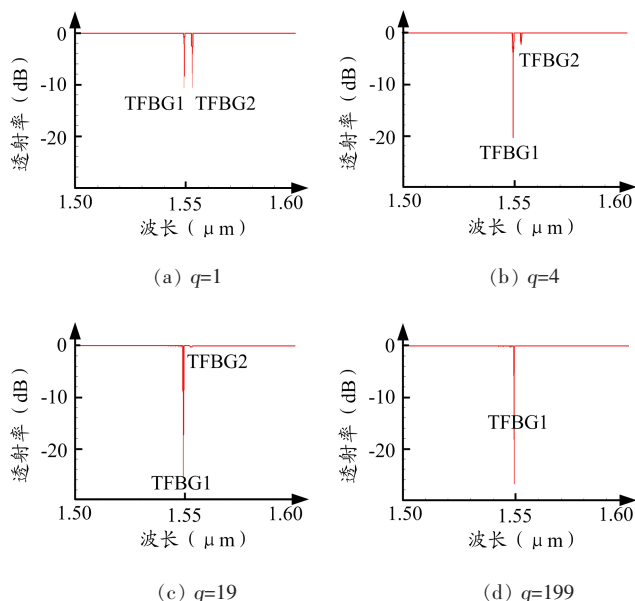


图4 级联相对位置对于CTFBG光谱的影响

3 结束语

本文对2段非匹配TFBG级联后的光谱特性进行了数据模拟仿真,分析结果表明:倾角、光栅周期及级联相对位置的改变会对谐振峰的深度变化或中心波长的漂移产生不同程度的影响。因此,可以通过改变各参量产生的不同影响,即利用不同参量间的相互补偿作用来设计传输谱,例如需要使用特定角度的CTFBG,但其却并未达到指定的波长,这时可以通过改变光栅长度的大小来使其波长达到要求。通过改变

CTFBG的结构参量来达到不同特性的传输谱要求,光谱设计十分灵活。本文的研究对于如何在CTFBG写制完成后改变其谱形具有指导和参考意义,同时也为CTFBG在光通信和传感领域等方面的应用提供了一定的理论基础。

参考文献

- [1] 高宇飞. 倾斜光纤光栅光谱特性理论研究[D]. 大庆:东北石油大学, 2015.
- [2] CIESZCZYK S, HARASIM D, KISALA P. A Novel Simple TFBG Spectrum Demodulation Method for RI Quantification [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, PP(99): 1-1.
- [3] DONG Xiaoyi, ZHANG Hao, LIU Bo, et al. Tilted fiber Bragg gratings: Principle and sensing applications[J]. Photonic Sensors, 2011, 1(1): 6-30.
- [4] 林文. 倾斜光纤 Bragg 光栅传感及解调技术研究[D]. 大连:大连理工大学, 2012.
- [5] MIAO Yinping, LIU Bo, ZHAO Qida. Simultaneous measurement of strain and temperature using single tilted fibre Bragg grating[J]. Electronics Letters, 2008, 44(21): 1-2.
- [6] JIANG Qi. A comparison study of the sensing characteristics of FBG and TFBG[J]. Sensor Review, 2013, 33(1): 68-79.
- [7] 张斌. 光纤光栅的制作及其传感应用[D]. 宁波:宁波大学, 2014.
- [8] ALBERT J, CHEN C, SHEVCHENKO Y, et al. Tilted grating sensor: US, US8554024[P]. 2013-08-07.
- [9] 孙华. 倾斜光纤光栅写制技术及传感应用研究[D]. 天津:南开大学, 2010.
- [10] CHEN C, XIONG L, JAFARI A, et al. Differential sensitivity characteristics of tilted fiber Bragg grating sensors [C]//Fiber Optic Sensor Technology and Applications IV, October 10-23, 2005, Boston, MA, United States. Boston: International Society for Optics and Photonics, 2005.

参考文献(会议)著录规则

参考文献中的责任者采用姓在前名在后的著录形式。欧美著者的名可以用缩写字母。如原文中作者为“P. S. 昂温”则在本刊要求中应写成“昂温 P S”, Albert Einstein Seny 应写成 EINSTEIN A S. 参考文献的责任者不超过3个时,全部照录。超过3个时,只著录前3个责任者,其后加“等”或与之相应的词。

示例1:马克思,恩格斯

示例2: YELLAND R L, JONES S C, EASTON K S, et al

会议中析出的文献著录格式如下:

作者. 文章题目[C]//会议名称,会议日期(包括月、日、年),会议地点(包括城市,国家). 出版地(指城市): 出版者,出版年.

[1] ABHINAVA S, SHARFUDDIN S, PING PAN, et al. Open transport switch: a software defined networking architecture for transport networks [C]// Hot topics in software defined networking 2013 (HotSDN2013), August 16-18, 2013, Hong Kong, China. New York: ACM, 2013: 115-120.