

doi:10.3788/gzxb20124104.0414

倾斜光纤光栅谱特性

欧启标^{1a}, 苏百顺², 曾庆科^{1a}, 秦子雄^{1b}, 李传起^{1a}

(1 广西师范大学 a. 电子工程学院; b. 物理科学与技术学院, 广西 桂林 541004)

(2 河南理工大学 计算机学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 基于倾斜光纤光栅耦合模理论, 采用数值分析法研究了前后向导模耦合时倾斜角度和调制深度对倾斜光纤光栅反射谱的影响, 以及导模和辐射模耦合时针对不同的入射光偏振态在倾斜角度、调制深度、光栅长度等不同时倾斜光纤光栅透射谱(或反射谱)的特性。研究结果表明, 在前后向导模耦合时, 不同偏振态入射光的光谱几乎相同; 而对于辐射模耦合, 由于反射谱的包络受消光系数的调制, 而不同偏振态入射光的消光系数不同, 并且倾斜角度越大不同偏振态的入射光的消光系数差别越大, 故在研究辐射模耦合时需要将偏振态予以考虑。

关键词: 倾斜光纤光栅; Bragg 散射; 辐射模; 偏振

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)04-0414-7

越大, s 偏振和 p 偏振的入射光的消光系数差别越大, 故在研究辐射模耦合时需要将偏振态予以考虑。

0 引言

倾斜光纤光栅(Tilted Fiber Bragg Grating, TFBG)是一种特殊的短周期光纤光栅, 又称闪耀光栅^[1]。由于光栅轴向与光纤轴向之间存在夹角, TFBG 不但能将前向导模耦合到后向导模中而且能将导模耦合到辐射模和包层模中^[2], 并且耦合作用具有强烈的偏振依赖特性^[3], 可以导致不同的倾斜角度具有不同的光学特性。利用 TFBG 的各种特殊光学特性, 使其可以用作光纤内偏振器^[4]、偏振依赖特性均衡器^[5]、光纤模式转换器^[6]等。在传感领域, 应用 TFBG 对环境折射率进行测量^[7-8]以及解决长周期光纤光栅固有的交叉敏感问题^[9]等方面, TFBG 也显示出了惊人的潜在价值和应用前景, 因此目前广受研究人员关注。

本文应用 TFBG 的耦合模方程进行了以下两方面的研究工作: 一是研究了前后向导模耦合时倾斜角度和调制深度对 TFBG 反射谱的影响; 二是研究了导模和辐射模耦合时针对不同的入射光偏振态在倾斜角度、调制深度、光栅长度等不同时 TFBG 透射谱(或反射谱)的特性。研究结果表明, 当耦合为前后向导模的耦合时, 不同偏振态的入射光的光谱几乎相同; 而对于辐射模耦合, 由于反射谱的包络受消光系数的调制, 而在相同倾斜角度下, s 偏振和 p 偏振的入射光具有不同的消光系数, 并且倾斜角度

1 倾斜光栅理论模型

TFBG 的结构如图 1 所示, z 为光纤的轴线方向, z' 为光纤光栅的轴线方向, 两者之间的夹

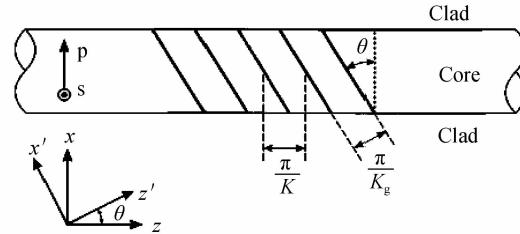


图 1 TFBG 结构

Fig. 1 TFBG structure diagram

角为 θ , 由坐标变换可知 $z' = z \cos \theta + x \sin \theta$. K_g 为栅格周期的波数, K 为 K_g 的轴向分量。光栅中折射率变化函数为

$$\Delta n(x, y, z) = \bar{n} \zeta(x, y) \eta(z') \quad (1)$$

其中 \bar{n} 为成栅后基底的平均折射率, $\zeta(x, y)$ 为描述光栅折射率横向变化的函数, 在纤芯区域时为 1, 在纤芯区域外时为 0; $\eta(z')$ 描述纤芯折射率沿 z' 轴的变化。所以式(1)可化简为

$$\Delta n(z') = \bar{n} \eta(z') \quad (2)$$

对于倾斜光栅, 有

$$\eta(z') = \bar{\sigma}(z') + 2\bar{\kappa}(z') \cos [2K_g z' + \bar{\varphi}(z')] \quad (3)$$

基金项目: 广西教育厅自然基金(No. 20101MS018)资助

第一作者: 欧启标(1978—), 男, 讲师, 硕士, 主要研究方向为光纤通信器件和嵌入式。Email: ouqibiao@126.com

收稿日期: 2011-10-31; 修回日期: 2012-01-24

由于在光栅的绝大部分区域有 $z > > x(10^{-6}$ 量级),而且对于研究所关心的倾斜角度($0 \sim 45^\circ$)有 $\cos \theta \geq \sin \theta$,所以 $z' = z \cos \theta + x \sin \theta \approx z \cos \theta$. 实验证明,角度越小这种近似处理的精确度越高,与实验结果也越吻合^[2]. 采用近似处理后,式(3)变为

$$\eta(z) = \sigma(z) + 2k(z)\cos[2Kz + \varphi(z)] \quad (4)$$

式中, $\sigma(z) = \bar{\sigma}(z \cos \theta)$, $k(z) = \bar{k}(z \cos \theta)$, $K = K_g \cos \theta$, $\varphi(z) = \bar{\varphi}(z \cos \theta)$, $\eta(z) = \bar{\eta}(z \cos \theta)$. $\sigma(z)$ 为光栅折射率缓变量的包络, $2k = m\sigma(z)$, m 为调制系数,当 $m=1$ 时,有 $\sigma(z)=2k(z)$.

2 Bragg 散射的光谱特性

对于前后向模式耦合的倾斜光纤光栅,在不考虑光栅啁啾时其对应的耦合模方程为^[2]

$$\frac{du}{dz} = \bar{\beta}[i(g_f\sigma(z) + \delta)]u(z) + i\bar{\beta}g_b k(z)v(z) \quad (5a)$$

$$\frac{dv}{dz} = -\bar{\beta}[i(g_f\sigma(z) + \delta)]v(z) - i\bar{\beta}g_b k(z)u(z) \quad (5b)$$

式中 $\bar{\beta} = 2\pi n/\lambda$ 为参考波数. 当条纹可见度 $m=1$ 时, $\sigma=2k$. 耦合系数 g_f 和 g_b 表明了折射率调制对前向和后向散射的影响,它们可由式 $g_f = g + \tilde{g}$ 和 $g_b = g - \tilde{g}$ 得到,其中

$$g = b_{01} \left[\frac{J_0^2(k_{01}a)}{J_1^2(k_{01}a)} + 1 \right] \quad (6a)$$

$$\tilde{g} = \frac{\Delta b_{01}(1-b_{01})}{1+2\Delta b_{01}} \left[1 - \frac{J_0(k_{01}a)J_2(k_{01}a)}{J_1^2(k_{01}a)} \right] \quad (6b)$$

如果考虑入射光的偏振态,则 s 偏振态和 p 偏振态对应的 g_b 是不同的,两种偏振态下的 g_b 分别由式(7)、(8)决定

$$g_b(\text{s-polarized}) = \frac{2b_{01}}{(k_{01}a)^2 J_1^2(k_{01}a)} \left[\int_0^{k_{01}a} J_0^2(u) \cdot J_0(\Omega u) u du - \frac{2\Delta(1-b_{01})}{1+2\Delta b_{01}} \int_0^{k_{01}a} \frac{J_1(\Omega u)}{\Omega u} \cdot J_1^2(u) u du \right] \quad (7)$$

$$g_b(\text{p-polarized}) = \frac{2b_{01}}{(k_{01}a)^2 J_1^2(k_{01}a)} \left[\int_0^{k_{01}a} J_0^2(u) \cdot J_0(\Omega u) u du - \frac{2\Delta(1-b_{01})}{1+2\Delta b_{01}} \int_0^{k_{01}a} \frac{J_1^2(u) J_0(\Omega u)}{\Omega u} \cdot u du + \frac{2\Delta(1-b_{01})}{1+2\Delta b_{01}} \int_0^{k_{01}a} \frac{J_1^2(\Omega u)}{\Omega u} J_1^2(u) u du \right] \quad (8)$$

式(6)~(8)中 $b_{01} = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_1^2)/(n_1^2 - n_2^2)$ 为归一化有效折射率, $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 为纤芯有效折射率, $k_{01}a = V\sqrt{1-b_{01}}$, $V = k_{01}a\sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ 是归一化频率, $k_{01} = 2\pi/\lambda$, $\Delta = (n_1 - n_2)/n_2$, n_1 和 n_2 分别为纤芯和包层折射率, a 为纤芯半径. $\Omega = 2K \tan \theta/k_{01}$, $K = \pi/\Lambda_z$ 为轴向光栅波数, Λ_z 为轴向光栅周期. 图2给出了

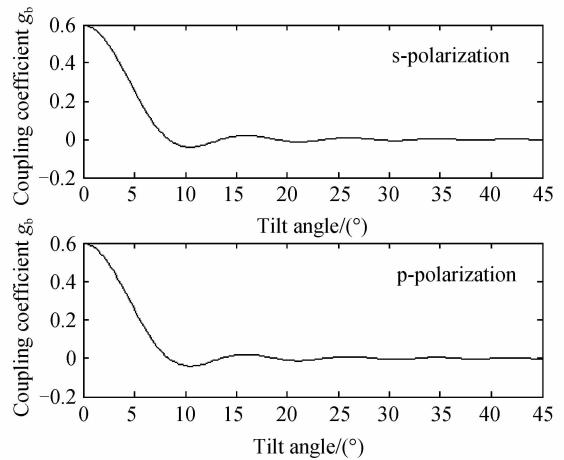


图 2 两种偏振态时的不同倾斜角下的耦合系数

Fig. 2 The coupling coefficient with different tilted angles for two polarization

两种不同偏振态下耦合系数 g_b 随倾斜角度的变化关系. 由图可见,在光栅参量以及倾斜角度相同的情况下,不同偏振态的 g_b 基本相同.

令

$$\hat{\sigma} = \bar{\beta} \cdot [g_f\sigma(z) + \delta]$$

$$\kappa = \bar{\beta} \cdot g_b \cdot k(z)$$

则式(5)可以化为

$$\frac{du}{dz} = i \cdot \hat{\sigma} \cdot u(z) + i\kappa v(z) \quad (9a)$$

$$\frac{dv}{dz} = -i \cdot \hat{\sigma} \cdot v(z) - i\kappa^* u(z) \quad (9b)$$

式(9)即为常见的光纤光栅模式耦合方程式,而 $\hat{\sigma}$ 和 κ 则分别相当于其中的“直流”和“交流”耦合系数. 求解式(9)可以得到均匀倾斜光纤光栅的反射率为

$$r = \left| \frac{v(-L/2)}{u(-L/2)} \right|^2 = \frac{\sinh^2(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} L)}{\cosh^2(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} L) - \frac{\hat{\sigma}^2}{\kappa^2}} \quad (10)$$

同时亦可得到 TFBG 最大反射率(发生在 $\hat{\sigma}=0$ 时)及峰值波长分别为

$$r_{\max} = \tanh^2(\kappa L) \quad (11)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{\lambda_d}{1 - g_f \sigma} \quad (12)$$

式(12)中, λ_d 为初始谐振波长.

2.1 倾斜角度对光谱的影响

实验参量为:纤芯半径 $a=2.625 \mu\text{m}$,包层折射率 $n_2=1.44$, $\Delta=0.0055$, 初始谐振波长为 1550 nm , $\sigma=10^{-3}$, 光栅长度为 5 mm . 图3给出了倾斜角度分别为 2° 、 6° 和 10° 时 s 偏振态入射光的反射谱. 由于 p 偏振态入射光的耦合系数与 s 偏振态的基本相同,而在倾斜光栅前后向导模耦合中,这些耦合系数对二者能量的交换起决定作用,所以 p 偏振态的耦合与 s 偏振态耦合时的情形基本一样,故在此不再讨

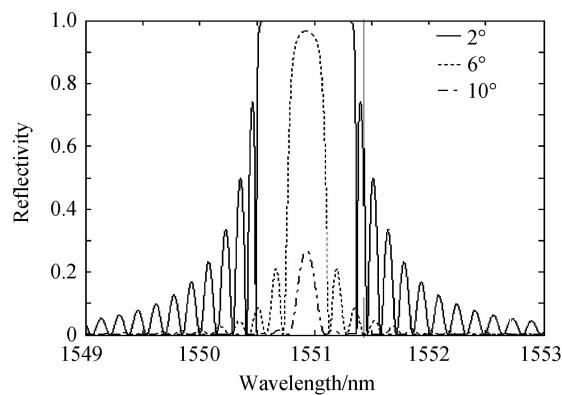


图 3 不同倾斜角度时的反射谱

Fig. 3 The reflectivity spectra for gratings with different tilted angles

论 p 偏振态的耦合。由图 3 可见, 反射谱中心波长 λ_{\max} 没有随着倾斜角度的变化而变化, 但最大反射率 r_{\max} 却随着 θ 改变而改变。

图 4 给出了倾斜角度从 0° 变化到 45° 时倾斜光纤光栅的反射谱的三维图。由图 4 可以看到, 随着角度的变化, TFBG 的中心波长保持不变, 但中心波长的反射率却随着角度的变化呈现周期性衰减, 其变化规律如图 5 中实线所示。由图 5 可见, 随着倾斜角度的增加, 中心波长在某些角度处出现局部最小值和局部最大值, 局部最小值对应的角度分别为

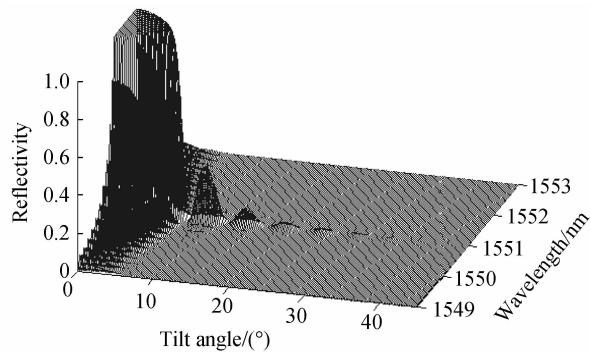


图 4 反射谱与光波长、角度的关系

Fig. 4 Relationship between Reflectivity spectra and light wavelength and angle

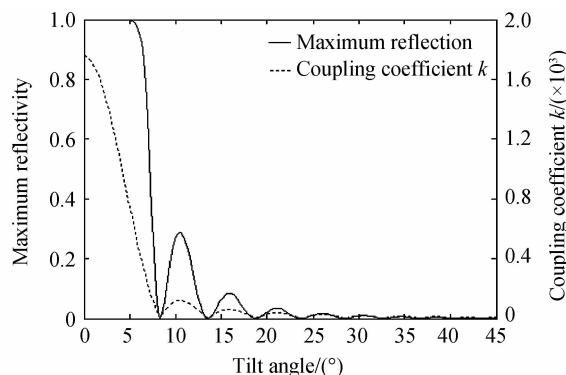


图 5 各角度下反射谱反射率的最大值的变化

Fig. 5 Maximum reflectivity of reflection spectra with different tilted angle

$8.36^\circ, 13.57^\circ, 18.77^\circ, 23.74^\circ, 28.49^\circ, 32.79^\circ, 36.63^\circ, 40.25^\circ$ 和 43.42° 。图 5 中的虚线给出了中心波长的“交流”耦合系数 k 随倾斜角度的变化关系, 对比实线和虚线图我们可以发现, 当 $\kappa=0$ 时出现局部最小值。

2.2 调制深度对光谱的影响

图 6 给出了调制深度分别为 1×10^{-3} 、 1.5×10^{-3} 和 2×10^{-3} 时倾斜光栅的反射谱图。由图可见, 反射中心波长随着调制深度的增加而向长波方向漂移, 同时带宽也跟着增加。图 7 给出了不同调制深度下中心波长的反射率随倾斜角度变化的关系图。由图 7 可知, 不同调制深度下中心波长的反射率随倾斜角度改变时的变化规律基本相同, 都在局部相同的 θ 值处出现局部最小值。

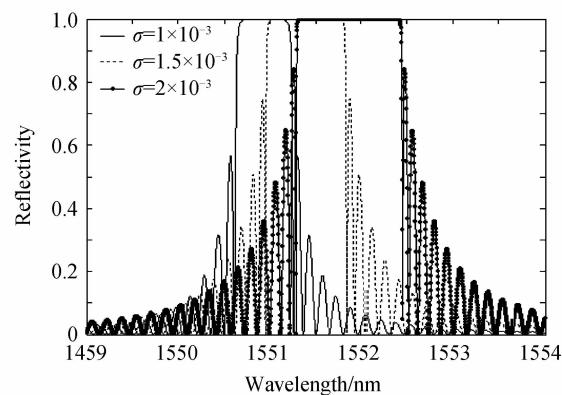
图 6 σ 不同时倾斜光纤光栅的反射谱

Fig. 6 Reflectivity spectra of TFBG with different σ value

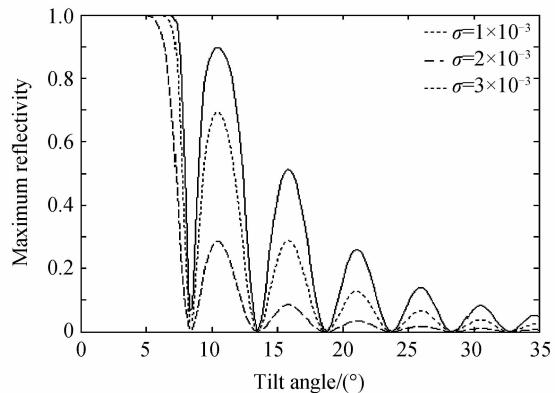


图 7 不同调制深度时反射谱反射率的最大值随倾斜角度的变化

Fig. 7 The maximum reflectivity versus tilt angle for gratings with different values of σ

3 辐射模耦合的光谱特性

如果光纤包层无限厚或将光纤光栅浸入折射率与光纤包层折射率基本相同的匹配液中, 此时 TFBG 除了在一定波长处产生 Bragg 散射外, 还会在较短波长处与辐射模耦合而损耗掉, 此时 TFBG

中导模与辐射模的耦合遵循模式耦合方程^[2]

$$\frac{du(z)}{dz} = \bar{\beta}[\bar{i}\gamma(z) - k^2(z)A(z)]u(z) + i\bar{\beta}g_bk(z)v(z) \quad (13a)$$

$$\frac{dv(z)}{dz} = -\bar{\beta}[\bar{i}\gamma(z) - k^2(z)A(z)]v(z) - i\bar{\beta}g_bk(z)v(z) \quad (13b)$$

式(13)中 $\gamma(z) = g_f\sigma(z) + \delta$, $A(z) = \sum_q A_q$ ($q = 1, 2, 3, \dots$) 为辐射模的消光系数, A_q 代表 LP_{01} 芯模与 LP_q 辐射模间的耦合效率. 其余参量的定义与式(5)相同. 对于均匀 TFBG, 波长一定时, $A(z)$ 是一个常量 A . 由于 LP_{01} 模和辐射 LP_q 模可以是 s 偏振或 p 偏振, 所以它们之间的耦合可以发生在相同偏振或不同偏振之间, 但由于相同偏振态模式之间的耦合比不同偏振态的耦合高出几个数量级, 因此只需考虑 $s \rightarrow s$ 或 $p \rightarrow p$ 的耦合即可. 关于 $s \rightarrow s$ 或 $p \rightarrow p$ 的耦合的消光系数的具体计算见文献[2].

采用与求解式(5)相同的处理, 令

$$\hat{\sigma} = \bar{\beta}[\bar{i}\gamma(z) + ik^2(z)A(z)]$$

$$\kappa = \bar{\beta} \cdot g_b \cdot k(z)$$

则式(13)可以转化为

$$\frac{du}{dz} = i \cdot \hat{\sigma} \cdot u(z) + ikv(z) \quad (14a)$$

$$\frac{dv}{dz} = -i \cdot \hat{\sigma} \cdot v(z) - ik^* u(z) \quad (14b)$$

与式(10)相同, $\kappa = \kappa^*$. 求解式(14a)式(14b), 可以得到光栅传输率和反射率分别为

$$t = \left| \frac{u(L/2)}{u(-L/2)} \right| = 1 / |\cosh(\gamma_B L - i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B L))|^2 \quad (15a)$$

$$r = 1 - t \quad (15b)$$

式(15)中 $\gamma_B = \sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2}$. 通过式(15)可以定性分析 TFBG 中由前向束缚模与后向辐射模耦合引起的波长依赖传输损耗特性. 与前后向模式耦合的情况不同的是, 倾斜光栅的辐射模耦合除了与耦合系数 g_f 和 g_b 有关外, 还与消光系数 $A(z)$ 有关. 图 8 给出了不同角度时两种偏振态入射光耦合的消光系数随波长的变化关系. 由图可见, 不同角度下, 两种偏振态入射光的消光系数并不一致, 而且倾斜角度越大, 二者差别越大. 图 9 给出了 s 偏振态的入射光耦合的反射谱和其对应的消光系数的关系. 由图 9 可见, 辐射模耦合的反射谱的包络主要由消光系数的包络决定. 所以在研究倾斜光栅的辐射模耦合特性时需要将两种偏振态分开来单独考虑.

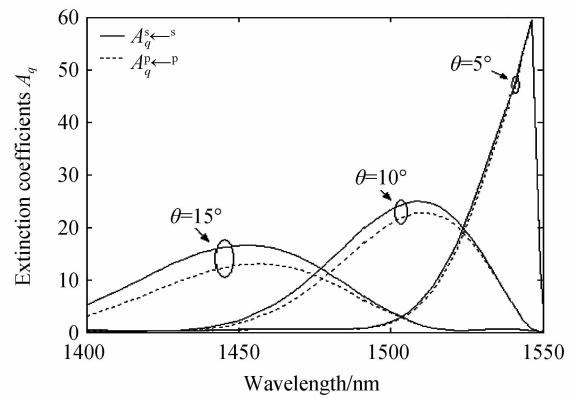


图 8 两种偏振态下消光系数 A_q 与波长的关系

Fig. 8 Relationship between extinction coefficient A_q and wavelength for two polarization

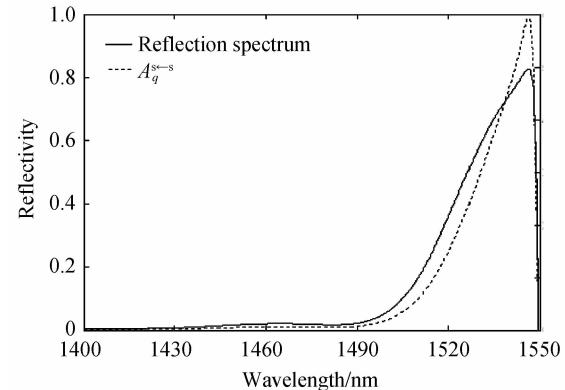


图 9 辐射模耦合的反射谱和消光系数的关系

Fig. 9 Relationship between reflectivity spectra of radiation mode coupling and extinction coefficient(s-polarized)

3.1 倾斜角度对光谱的影响

图 10 给出了 $\theta = 1^\circ \sim 10^\circ$ 时 s 偏振光耦合的透射谱图. 从图 10 可以看出, 随着 θ 的增加, 损耗峰逐渐向短波长区域移动, 深度变浅, 带宽变宽. 与图 10 相对应, 图 11 给出了两种偏振态下辐射模耦合时倾斜角度分别为 5° 、 10° 和 15° 的透射谱图. 在倾斜角度分别为 5° 、 10° 和 15° 的情形下, s 偏振态下透射谱的

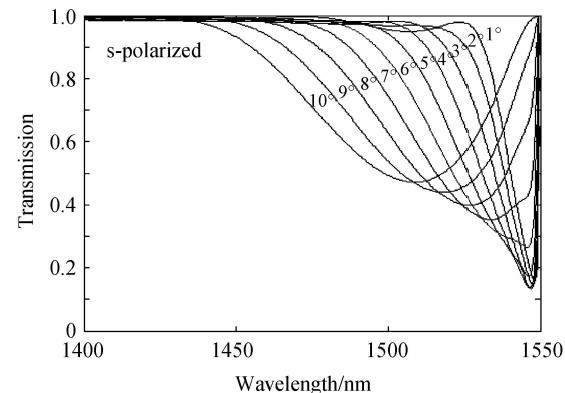


图 10 s 偏振态时不同倾斜角度下的 TFBG 透射谱

Fig. 10 The transmission spectra of gratings with different tilted angles assuming s-polarized incident light

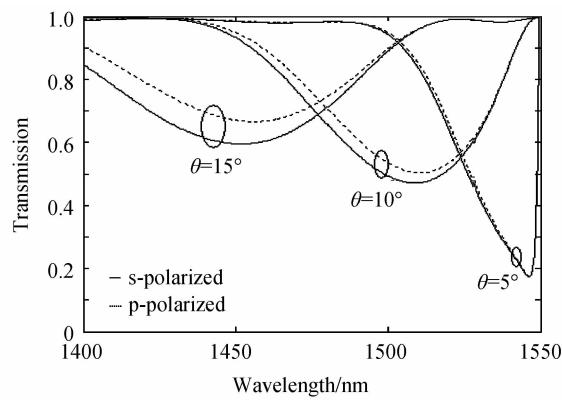


图 11 两种偏振态下取不同倾斜角度时的传输损耗谱
Fig. 11 The transmission spectra of gratings with different tilted angles for two polarization

中心波长分别为 1 546.48 nm、1 508.86 nm 和 1 451.67 nm, 与中心波长相对应的透射率分别为 0.1737、0.4711 和 0.5949; 而 p 偏振态下的中心波长分别为 1 546.49 nm、1 510.37 nm 和 1 455.69 nm, 对应的透射率分别为 0.1749、0.5032 和 0.6657。很明显, 随着角度的增加, 两种偏振态下的传输损耗谱的峰值损耗波长 $\lambda_{\min}^{s,p}$ 及其对应的透射率 $t_{\min}^{s,p}$ 变得越来越不同: 相同角度不同偏振态的传输率最小值相差越来越大, 与最小透射率对应的波长的分离也越来越明显。

图 12 给出了两种偏振态下辐射模耦合的反射

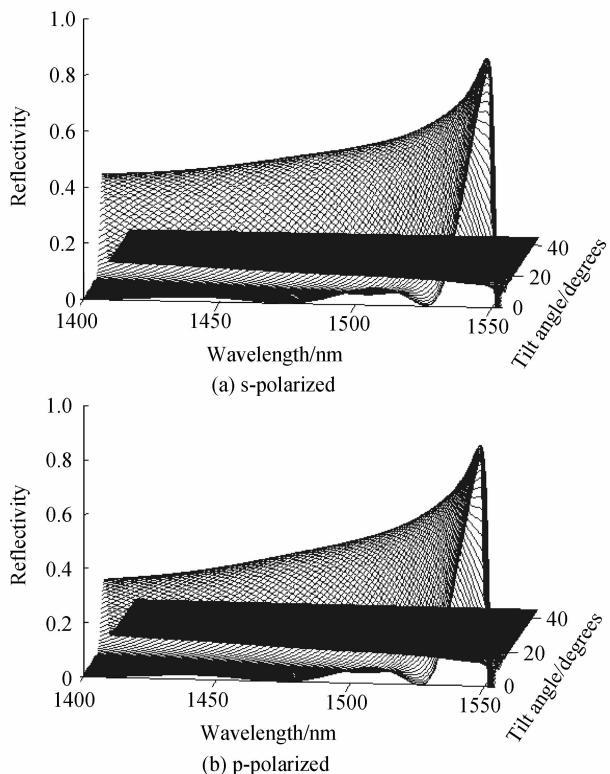


图 12 两种偏振态下辐射模耦合的反射谱随倾斜角度的变化图

Fig. 12 Reflectivity spectra of radiation mode coupling with different tilted angle for two polarization

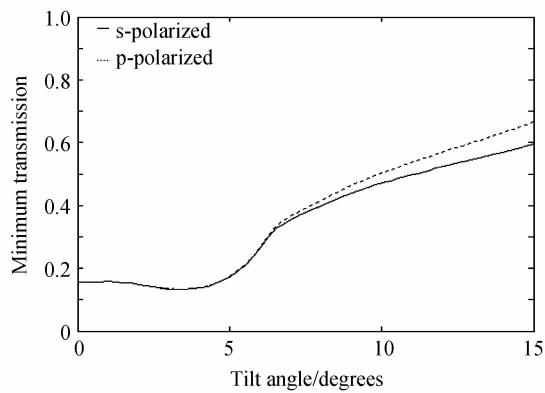


图 13 最小透射率随角度的变化关系

Fig. 13 Minimum transmission spectra with tilted angle
谱随倾斜角度变化的三维图。由图 12 可见, 随着倾斜角度的增加, 两种偏振态中心波长对应的反射率都减小, 但 p 偏振耦合的减小明显比 s 偏振时要快。为了更直观地反映这种变化, 给出了两种偏振态下最小透射率(最大反射率)在倾斜角度由 0° 增加到 15° 时与倾斜角度的关系图, 如图 13。由图 13 可见, 随着倾斜角度的增加, 两种偏振态的消光系数出现分离, 倾角越大分离越明显。

3.2 光栅长度对光谱的影响

取倾斜角度 $\theta = 10^\circ$, 光栅长度分别为 5 mm、10 mm 和 15 mm, 此时倾斜光栅的 s 偏振和 p 偏振下的传输损耗谱如图 14。在图 14 中, 光栅长度分别取 5 mm、10 mm 和 15 mm 时, t_{\min}^s 分别为 0.6863、0.4711 和 0.3233, 中心波长不变为 1 508.86 nm, 而 t_{\min}^p 分别为 0.7093、0.5032 和 0.3570, 中心波长也不变, 为 1 510.37 nm。显然, 随着 L 的增加, 无论是 s 偏振还是 p 偏振态入射光的耦合, 中心波长都不随光栅长度的变化而变化, 但中心波长对应的透射率却逐渐减小且 $t_{\min}^p - t_{\min}^s$ 的差值随光栅长度不同而有不同。

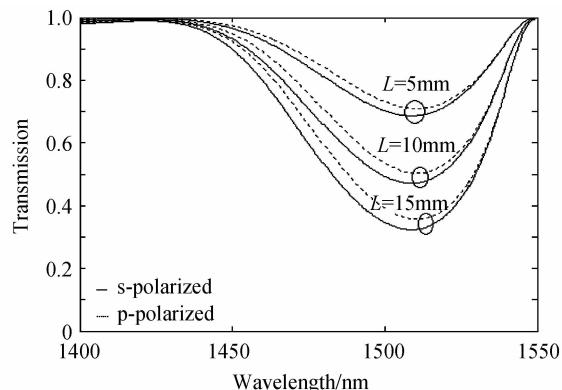


图 14 两种偏振态下取不同光栅长度时的传输损耗谱
Fig. 14 The transmission spectra of gratings with different lengths for two polarization

3.3 调制深度对光谱的影响

取倾斜角度 $\theta = 10^\circ$, 调制深度 σ 分别取 0.5 ×

10^{-3} 、 1×10^{-3} 和 1.5×10^{-3} , 倾斜光栅的 s 偏振态和 p 偏振态的传输损耗谱如图 15。s 偏振态下的 λ_{\min}^s 分别为 1 508.68 nm、1 508.93 nm 和 1 509.18 nm, 对应的 t_{\min}^s 分别为 0.828 4、0.471 1 和 0.183 9。p 偏振态下的 λ_{\min}^p 分别为 1 510.43 nm、1 510.68 和 1 510.93 nm, 对应的 t_{\min}^p 分别为 0.842 2、0.503 2 和 0.213 3。由以上数据可以看出, λ_{\min}^s 和 λ_{\min}^p 随着 σ 的增加向长波长方向漂移, 而 t_{\min}^s 和 t_{\min}^p 随着 σ 的增加都减小。不同 σ 值时, 峰值损耗波长之差 $\lambda_{\min}^p - \lambda_{\min}^s$ 约为 1 nm, 基本不变。最小传输率之差 $t_{\min}^p - t_{\min}^s$ 则随 σ 值变化, σ 越大, 差值也越大。

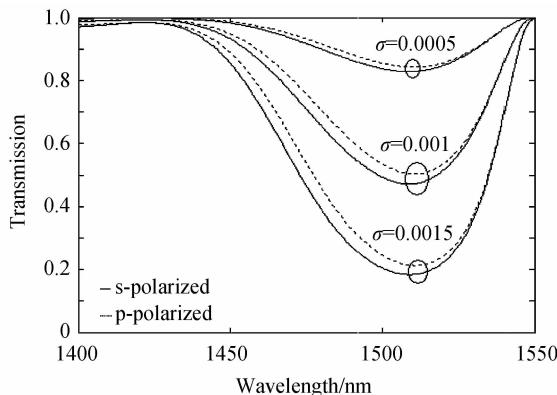


图 15 两种偏振态下取不同调制深度时的传输损耗谱
Fig. 15 The transmission spectra of gratings with different index modulation amplitudes for two polarization

4 结论

应用耦合模理论推导出了类似于描述普通布喇格光纤光栅耦合的 TFBG 的耦合模方程。应用此耦合模方程对 TFBG 前后向导模和导模与辐射模的耦合的谱特性进行了研究。研究结果发现, 在辐射模耦合的情况下由于 TFBG 的反射谱受消光系数调制, 而不同偏振态的入射光的消光系数不同, 所以在研究倾斜光栅的辐射模耦合时需要将偏振态给予考虑。而在 TFBG 前后向模式的耦合中, 两种偏振态

下的耦合系数基本相同, 故其光谱基本一致。应用此推导结果, 我们还可以直接应用传输矩阵法对各种折射率包络的 TFBG 进行分析研究。

参考文献

- [1] DONG Xiao-yi, ZHANG Hao, LIU Bo, et al. Tilted fiber Bragg gratings: Principle and sensing applications [J]. *Photonic Sensors*, 2011, **1**(1): 6-30.
- [2] ERDOGAN T, SIPE J E. Tilted fiber phase gratings [J]. *JOSA A*, 1996, **13**(2): 296-313.
- [3] XU Ou, LU Shao-hua, JIAN Shui-sheng. Theoretical analysis of polarization properties of the tilted fiber grating [J]. *Science China*, 2010, **40**(3): 504-511.
许鸥, 鲁韶华, 简水生, 倾斜光纤 Bragg 光栅偏振特性理论分析 [J]. 中国科学, 2010, **40**(3): 504-511.
- [4] ZHOU K, SIMPSON G, CHEN X, et al. High extinction ratio in-fiber polarizers based on 45°tilted fiber Bragg gratings [J]. *Optics Letters*, 2005, **12**(2): 1285-1287.
- [5] MIHAILOV S J, WALKER R B, STOCKI T J, et al. Fabrication of tilted fiber-gratings polarization-dependent loss equalizer [J]. *Electronics Letters*, 2001, **37**(2): 284-286.
- [6] LEE K S, ERDOGAN T. Fiber mode conversion with tilted gratings in an optical fiber [J]. *JOSA A*, 2001, **18**(5): 1176-1185.
- [7] XU Ou, LU Shao-hua, LIU Yan, et al. Analysis of spectral characteristics for reflective tilted fiber gratings of uniform periods [J]. *Optics Communications*, 2008, **28** (1): 3990-3995.
- [8] ZHANG Jian, LIU Bo, JIN Long, et al. Refractive index measurement based on blazed fiber Bragg grating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 910-913.
张键, 刘波, 金龙, 等. 基于闪耀光纤光栅的折射率传感技术实验研究 [J]. 光子学报, 2008, **37**(5): 910-913.
- [9] LAFFONT G, FERDINAND P. Tilted short-period fibre Bragg grating induced coupling to cladding modes for accurate refractometry [J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, **12**(1): 765-770.
- [10] HUY M C P, LAFFONT G, DEWYNTER V, et al. Tilted fiber Bragg grating photo written in microstructured optical fiber for improved refractive index measurement [J]. *Optics Express*, 2006, **14**(22): 10360-10370.
- [11] MIAO Y P, LIU Bo, TIAN Shuang, et al. Temperature insensitive refractive index sensor based on tilted fiber bragg grating [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2009, **51**(2): 480-486.

Spectrum Characteristics Analysis of the Tilted Fiber Bragg Grating

OU Qi-biao^{1a}, SU Bai-shun², ZENG Qing-ke^{1a}, QIN Zi-xiong^{1b}, LI Chuan-qi^{1a}

(1 a. College of Electronic Engineering; b. College of Physical Science and Technology,
Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China)

(2 School of Computer Science and Technology, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China)

Abstract: Based on the mode coupling theory of the tilted fiber Bragg grating with the numerical analysis methods, the tilted angle and modulation index on the effect of tilted fiber grating reflectivity spectra of front-back core mode coupling and characteristics of tilted fiber grating reflectivity and transmission spectra for core mode and radiation mode coupling on the condition of different tilted angle, index modulation and grating lengths for different polarization are discussed. The results of the study show that different incident lights with different polarizations are exactly the same for front and back core mode couplings. Incident light of s polarization and p polarization state should be taken into account for the radiation mode coupling, because reflectivity spectra envelope are affected by modulation of extinction coefficient and incident light with different polarizations have different extinction coefficients. Moreover, the greater tilted angle is, the more differences for the extinction coefficient of the incident light with difference polarization is.

Key words: Tilted Fiber Bragg Grating(TFBG); Bragg scattering; Radiation; Polarization