

磁化强度光栅中导波光传播特性分析

文 峰, 武保剑

(电子科技大学宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室, 四川 成都 610054)

摘 要:提出一种通过周期改变磁光波导中磁化强度而形成的“磁化强度光栅”概念,并与传统的折射率光栅进行了对比。根据耦合模理论分析了这种磁化强度光栅的模式和相位转换关系,计算表明:磁化强度光栅可以得到足够大的模式转换效率,输出光强度是光栅周期的敏感函数;模式转换光相位随耦合系数跳跃变化,通过调节磁化强度可实现 π 整数倍的相移。因此,磁化强度光栅可用于传感器、光开关等通信器件,并在BPSK系统中具有潜在应用前景。

关键词:磁化强度光栅;模式转换;相移

中图分类号:TN436;TN252

文献标识码:A

Analysis of the Propagation Characteristic of Guided Optical Waves in the “Magnetization Grating”

WEN Feng, WU Bao-jian

(Key Lab of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks of the Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: The characteristic of the “magnetization grating” is analyzed for the first time, which is obtained by periodically changing the magnetization of the magnetized film. The coupling relation and the phase of guided optical waves (GOWs) are investigated by use of the coupled-mode theory in the magnetization grating. Our calculation indicates that, the mode conversion efficiency (MCE) is sensitive to the grating period; the phase of the mode conversion (MC) lights is a periodic function of the coupling coefficient, and the π phase shift will be achieved by adjusting the magnetization. Consequently, the magnetization grating is potentially applied to the sensor, the optical switch, and the BPSK communication system.

Key words: magnetization grating; mode conversion; phase shift

1 引 言

光栅器件由于其在通信领域广泛的应用前景而一直受到人们的关注。光纤光栅可应用于滤波器^[1]、传感器^[2]、模式转换器^[3]等,并在波分复用系统的关键器件——光分插复用器(OADM)中得到应用^[4]。磁光材料作为一种特殊的光传输介质以其独有的磁光特性应用于光通信领域^[5-6]。近年来,人们提出在光纤光栅外加固磁致伸缩装置,通过改变外磁场引起磁致伸缩效应来带动光栅周期变化,从而实现对Bragg波长的调节^[7-8]。本文考虑一种新型的光栅,它是通过磁光波导中磁化强度的周期性改变形成的,我们称之为“磁化强度光栅”。这种新型磁化强度光栅是通过周期性改变介电系数张量的非对角元素形成,而非对角元素的复数形式又使这类光栅独具特色。与介电系数张量对角元素周期

性变化形成的传统折射率光栅中导波光的耦合(如光纤布拉格光栅(FBG)入射光和反射光之间的耦合,以及长周期光纤光栅(LPFG)芯模和包层模之间的耦合)不同,磁化强度光栅可通过周期变化的磁化强度导致入射光模式发生转换和相位的变化,并使导波光完全通过。

磁化强度光栅的关键是如何实现磁化强度的周期性变化。从现有技术来看,首先在磁光薄膜中形成磁化强度光栅是可行的,可以通过几种方法实现:①静磁波法:已有的静磁波理论^[9]表明,静磁波的

基金项目:国家自然科学基金(No. 60671027)资助。

作者简介:文 峰(1982-),男,硕士研究生,主要从事静磁波器件以及磁光Bragg衍射器件方面的研究工作。E-mail: fengwen@uestc.edu.cn

收稿日期:2007-10-25

激发相当于在磁性钇铁石榴石(YIG)薄膜中形成交变磁化强度行波,这样可利用静磁波的动态磁化强度形成驻波,从而实现本文考虑的磁化强度光栅。
 ②磁记录法:现有的磁记录方案之一是用聚焦激光局部照射记录的部位,使其磁化强度 M 和矫顽力 H_c 大幅降低,再施加反向磁场实现磁化反转^[10]。可以使用该方法在磁性薄膜中周期性反转磁场,其磁化强度周期变化可通过本文的分析理论加以描述。
 ③光磁效应法:可以利用光磁效应,在低温下通过照射磁性 YIG 薄膜,使其场强发生变化^[10]。

本文首先使用耦合模理论得到了磁化强度光栅中导波光的耦合关系,再通过分析失谐因子 Δ_1 得到满足时耦合方程的近似表达式,推导出模式转换效率以及相位对光栅参数的依赖关系。通过分析耦合系数、光栅周期对输出光强度和相位的影响发现:通过磁化强度光栅,入射光将发生模式转换,而转换光强度和相位对耦合强度出现周期性依赖关系,该特性可以应用于 BPSK 编码通信系统;同时,模式转换效率对光栅周期的敏感变化预示了该光栅具有良好的传感特性。

2 磁化强度光栅中导波光的耦合

考虑如图 1 所示的光栅结构:在衬底上生长厚度为 t 的磁性薄膜,磁化强度沿 X 方向周期性变化,即形成所谓的“磁化强度光栅”;入射光通过起偏器形成 TM_0 或 TE_0 模偏振光后注入磁性薄膜,与周期性变化的光栅沿 X 方向共线作用,出射光通过检偏器检测所需的模式转换光(MC light)。

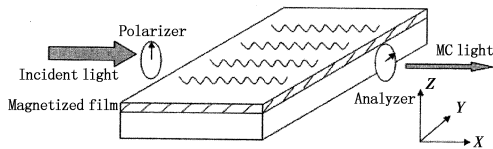


图1 磁化强度光栅结构

在电光、磁光的光弹性效应中,介电系数均以张量形式存在,其各分量与坐标选取有关^[11]。本文提出的磁化强度光栅是通过改变磁性薄膜的磁化强度形成的,引起导波光模式转换的“微扰”项就是磁化强度的变化,也就是说,磁化强度光栅是通过周期性改变磁化强度进而引起磁光介电系数变化的。作为一级近似,磁光介电系数 $\Delta\epsilon$ 可表示为:

$$\Delta\epsilon(X) = A_\epsilon(\Delta m) \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda}X\right) \quad (1)$$

式中,调制强度 A_ϵ 是磁化强度改变量 Δm 的函数,同时该参数也与磁光系数、波导参数有关^[6]; Λ 是磁化强度光栅的光栅周期。对于本文的理论模型,磁化强度的改变量沿 X 方向即为 Δm_x ,而该量引起的磁光介电系数 $\Delta\epsilon$ 为介电张量中的 XZ 分量,并且其调制强度 A_ϵ 是复数。由于磁化强度周期性改变引

起导波光模式之间发生转换,根据耦合模理论^[11]以及式(1)可以得到磁化强度光栅中导波光的耦合关系:

$$\frac{d}{dX} \begin{pmatrix} C_E(X) \\ C_M(X) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \kappa_1 e^{-i\Delta_1 X} + \kappa_2 e^{-i\Delta_2 X} \\ -\kappa_1^* e^{i\Delta_1 X} - \kappa_2^* e^{i\Delta_2 X} & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} C_E(X) \\ C_M(X) \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中, $C_j(X)$ ($j=E, M$) 表示 TE_0 和 TM_0 模导波光横向

电场分量的复振幅;耦合系数 $\kappa_1 = \frac{-ik_0}{2\epsilon_0 \sqrt{\epsilon_r}} A_\epsilon(\Delta m)$,

$\kappa_2 = \frac{-ik_0}{2\epsilon_0 \sqrt{\epsilon_r}} A_\epsilon(\Delta m^*)$; $k_0 = 2\pi/\lambda_0$; λ_0 是真空中入

射光波长; ϵ_0 和 ϵ_r 分别是真空介电常数和磁性薄膜

的相对电解质常数;失谐因子 $\Delta_{1,2} = \beta_M - \beta_E \pm \frac{2\pi}{\Lambda}$;

β_j ($j=E, M$) 是导波光波数。

实际应用中失谐因子 Δ_1 和 Δ_2 不能同时满足,当其中一个失谐因子等于零(或接近零)时,可忽略另一因子的影响。因此下面以失谐因子 Δ_1 得到满足为例,分析磁化强度光栅耦合光强度和相位的分布规律(当失谐因子 Δ_2 得到满足时也可用类似的分析方法)。

根据上面的分析,当失谐因子 Δ_1 接近零时耦合方程式(2)可近似表示为:

$$\begin{cases} \frac{dC_E(X)}{dX} = \kappa_1 e^{-i\Delta_1 X} C_M(X) \\ \frac{dC_M(X)}{dX} = -\kappa_1^* e^{i\Delta_1 X} C_E(X) \end{cases} \quad (3)$$

求解式(3)得到导波光电场分量复振幅的解析表达式:

$$\begin{cases} C_E(L) = \frac{-1}{\kappa_1^*} (r_1 C_1 e^{(r_1 - i\Delta_1)L} + r_2 C_2 e^{(r_2 - i\Delta_1)L}) \\ C_M(L) = C_1 e^{r_1 L} + C_2 e^{r_2 L} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $r_{1,2} = \frac{i(\Delta_1 \pm \sqrt{|S|})}{2}$, $S = -\Delta_1^2 - 4|\kappa_1|^2$; 光栅长度 $L = \Lambda N$, N 是光栅周期数; C_1 和 C_2 由入射光模式

决定,对于 TE_0 模入射 $C_1 = \frac{\kappa_1^*}{r_2 - r_1}$, $C_2 = \frac{-\kappa_1^*}{r_2 - r_1}$, 而

TM_0 模入射 $C_1 = \frac{r_2}{r_2 - r_1}$, $C_2 = \frac{-r_1}{r_2 - r_1}$ 。

以 TE_0 模入射为例,式(4)中 C_M 可简化为:

$$C_M(L) = -2\kappa_1^* e^{\frac{\Delta_1 L}{2}} \left[\sin\left(\frac{\sqrt{|S|}}{2}L\right) / \sqrt{|S|} \right]$$

因此,模式转换效率

$$\text{MCE} = \frac{k_0^2}{\epsilon_0^2 \epsilon_r} |A_\epsilon|^2 \left[\sin^2\left(\frac{\sqrt{|S|}L}{2}\right) / |S| \right] \quad (5)$$

而模式转换光相位 φ 则根据耦合系数的不同可表

示为:

$$\begin{cases} \varphi^+ = \varphi_s^* + \Delta_1 L/2 + \pi/2, \frac{(2n-1)^2 \pi^2}{L^2} - \frac{\Delta_1^2}{4} < |\kappa_1|^2 < \frac{4n^2 \pi^2}{L^2} - \frac{\Delta_1^2}{4} \\ \varphi^- = \varphi_s^* + \Delta_1 L/2 - \pi/2, \frac{4n^2 \pi^2}{L^2} - \frac{\Delta_1^2}{4} < |\kappa_1|^2 < \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{L^2} - \frac{\Delta_1^2}{4} \end{cases} \quad (6)$$

其中, φ^* 分别为模式转换光的正、负两种相位; φ_s^* 为调制强度共轭 A_s^* 的相位; 调制点 n 为正整数, 取值将依据耦合系数大小。式(6)表明模式转换光相位是耦合系数的周期函数, 且相邻周期出现 π 相移, 具体分析结果将在下文给出。

3 耦合系数对模式转换光的影响

在讨论耦合系数对模式转换光强度和相位的影响之前, 通过数值分析方式给出上述近似分析与精确分析的比较。分别利用式(2)、式(5)和式(6)计算得到模式转换效率 MCE、模式转换光相位 φ , 如图 2 所示。为了便于分析, 令 $\Delta_1 = \beta_M - \beta_E + \frac{2\pi}{\Lambda} = \frac{n_\Delta \pi}{\Lambda}$, 则 $\Delta_2 = \frac{(n_\Delta - 4)\pi}{\Lambda}$ 。由式(5)和式(6)计算的模式转换效率、输出光相位在 $n_\Delta = 0$ 附近与式(2)基本吻合, 因此近似分析结论可以用于讨论失谐因子 Δ_1 满足情况下的导波光耦合关系。

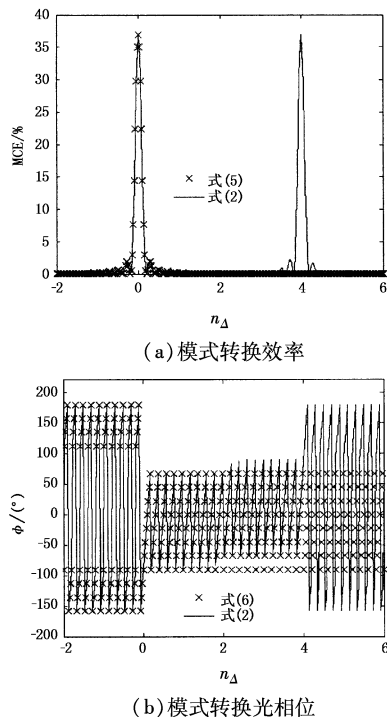


图2 精确分析与近似分析的比较

下文将在 Δ_1 接近零时 ($-0.2 < n_\Delta < 0.2$), 分析耦合系数对模式转换光强度和相位的影响。由式(5)、(6)可知, 耦合系数对模式转换效率、模式转换光相位具有决定作用, 特别是在式(6)中表明, 相位在耦合系数的一个周期内保持不变, 而邻近周期将

出现 π 相移。以正相位为例, φ^+ 对应的耦合系数改变量为 $\frac{(4n-1)\pi^2}{L^2}$, 其与光栅长度 L 成反比。在分析中, 每一个耦合系数周期内对应的模式转换效率峰值 MCE_p 也是我们关心的参数。对式(5)分析可知, MCE_p 对应的耦合系数点分布为:

$$|\kappa_1|^2 = \frac{(2n' + 1)^2 \pi^2}{4L^2} - \frac{\Delta_1^2}{4} \quad (7)$$

$$\text{此时, 模式转换效率峰值 } MCE_p = 1 - \frac{\Delta_1^2}{|S|} \quad (8)$$

其中, 调制点 n' 取值正整数。

考虑到磁畴尺寸以及磁光作用中可以达到的动态磁化强度变化周期^[6], 本文分析的光栅周期与长周期光纤光栅相同, 均在几百微米, 并且根据静磁波与导波光耦合作用中达到的耦合系数范围^[6], 下文以光栅周期 $\Lambda = 350 \mu\text{m}$ 为例分析耦合系数强度 $|\kappa_1|^2$ 在 $0 \sim 4 \times 10^5$ 之间模式转换效率 MCE、模式转换光相位 φ 的分布规律。分析发现, 在相同光栅周期数和耦合系数强度范围下, 随着失谐因子 Δ_1 接近零 (即 n_Δ 接近零), 模式转换效率周期增大, 且模式转换效率峰值 MCE_p 接近 100%。下文以 $n_\Delta = 0.1$ 为例, 分析耦合系数强度对模式转换效率、相位的影响, 结果如图 3 所示。从图 3 中可以得到如下结论: ①模式转换效率周期与相位跳跃周期一致, 并可通过调整光栅周期数进行调节; ②随着耦合系数强度的增强, 模式转换效率振荡提高, 模式转换光相位出现 π 整数倍的相移。

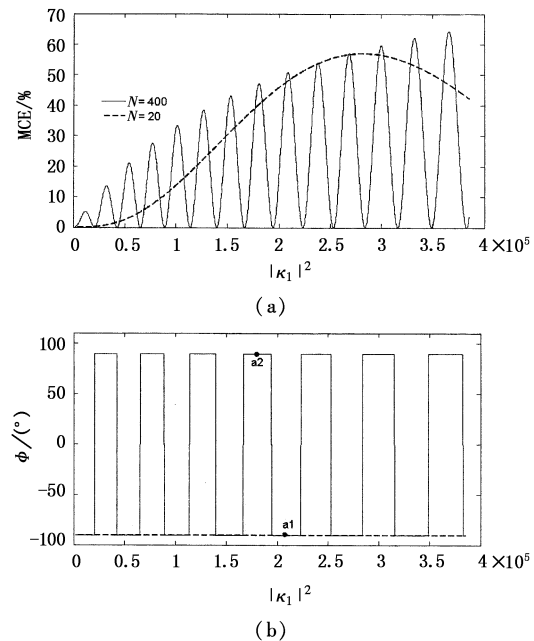


图3 不同光栅周期数下, (a) 模式转换效率 MCE 和 (b) 模式转换光相位 φ 对耦合系数 $|\kappa_1|^2$ 的依赖关系

在图 3 中还值得注意的是, 可以通过调节光栅周期数得到所需的传输特性。当周期数较小时, 以

$N=20$ 为例,其在整个耦合系数强度范围内相位保持在 -90.39° 不变。因此,对于小的周期数,可以在大部分耦合系数强度下得到稳定的输出光相位和良好的模式转换光强度。当周期数较大时,以 $N=400$ 为例,模式转换光强度和相位的振荡明显增强,我们以每个周期内模式转换光强度峰值 MCE_p 为检测点,在 a_1 点相位为 -90.39° ,而 a_2 点相位变成 89.61° ,两点之间耦合系数强度变化了 13%。因此以耦合系数强度 $|\kappa_1|^2 = 1.942 \times 10^5$ 为基准点,强度变化 $\pm 6.5\%$ 可以实现相位的 π 跳跃,由于耦合系数强度与波导参数有关,可以使用电控调节复杂波导结构^[12]的方法实现强度的微小变化,进而实现输出光相位的 π 变换,该特性可应用于 BPSK 编码通信系统的研究。

4 光栅周期对模式转换效率的影响

在下面的分析中由于固定入射光波长为 $1.15\mu\text{m}$,考虑的光栅周期在 $400 \sim 600\mu\text{m}$ 范围内,此时 n_Δ 达到 1.9 左右,为了精确分析光栅周期对模式转换光的影响,将通过数值方法求解式(2)得到模式转换光对磁化强度光栅周期的依赖关系,结果如图 4 所示。计算中耦合系数强度 $|\kappa_1|^2 = |\kappa_1|^2 = 4 \times 10^5$,光栅长度 $L=70\text{mm}$ 。从中可以看出:①模式转换效率整体随光栅周期增大而提高;②模式转换效率对光栅周期的改变呈正弦依赖关系,且非常敏感。以 a 点周期长度 $\Lambda = 502.3\mu\text{m}$ 为例,与之对应的转换效率 -3dB 点 a_- 处周期变化系数 $\Delta\Lambda = \frac{\Lambda_a - \Lambda_{a_-}}{\Lambda_a} = 0.00119$,而在临近的波谷 b 点周期变化系数 $\Delta\Lambda$ 只有 0.00398,此时模式转换效率降低了 17.52dB。因此微小改变光栅周期可以引起模式转换光幅度的剧烈变化。而磁化强度光栅周期可以通过磁场、波导参数等进行调解,因此可以应用于相应参量的传感器研究。

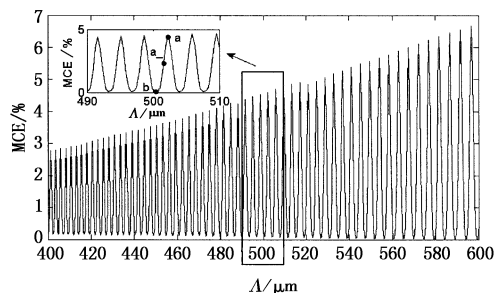


图4 模式转换效率 MCE 对光栅周期 Λ 的依赖关系

同时,模式转换效率随光栅周期振荡变化可以得到大的消光比(近 18dB),而光栅周期变化系数在 10^{-3} 量级,由于可以通过在磁性薄膜表面施加压力引起材料内部磁化状态发生变化,进而引起磁化强度光栅周期的变化,因此可以实现磁控或压控光开关功能。

5 结论

本文首次给出磁化强度光栅中的模式转换关系,并分析得到模式转换效率和输出光相位对光栅参量的周期依赖特性,考察了耦合系数、光栅周期对磁化强度光栅传播特性的影响。分析表明:耦合系数、光栅周期以及光栅周期数都将影响模式转换光强度和相位;模式转换效率随着耦合系数的提高振荡增强,而光栅周期数可以有效调节振荡周期,起到控制工作点(模式转换效率峰值对应的耦合系数点)的作用;由于失谐因子影响,光栅周期会引起模式转换效率的剧烈振荡,模式转换光强度将在失谐因子完全满足的情况下达到最大值。需要指出的是,本文的分析方法同样适用于周期性改变电光介电张量非对角元素形成光栅引起入射光模式转换的情形。

参考文献:

- [1] J L Arce-Diego, R López-Ruisánchez, J M López-Higuera, et al. Fiber Bragg grating as an optical filter tuned by a magnetic field[J]. Opt. Lett., 1997, 22(9): 603–605.
- [2] Kersey A D, Davis M A, Patrick H J, et al. Fiber grating sensors[J]. J. Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1442–1463.
- [3] N Hong Ky, H G Limberger, R P Salathé, et al. Efficient broadband intracore grating LP_{01} - LP_{02} mode converters for chromatic-dispersion compensation[J]. Opt. Lett., 1998, 23(6): 445–447.
- [4] 何瑾琳, 孙小蕊, 张明德, 等. 相移长周期光纤光栅的光谱特性及其在光分插复用器中的应用[J]. 光学学报, 2000, 20(8): 1106–1111.
- [5] H Dötsch, N Bahlmann, O Zhuromskyy, et al. Applications of magneto-optical waveguides in integrated optics: Review[J]. J. Opt. Soc. Am. B, 2005, 22: 240–253.
- [6] Wu Bao-jian, Wen Feng, Qiu Kun. Mode-conversion enhancement of guided optical waves by magnetostatic surface waves propagating collinearly in obliquely magnetized bismuth-doped yttrium-iron-garnet film waveguide[J]. J. Appl. Phys., 2006, 100: 123104–1–123104–5.
- [7] H R Carvalho, A C Bruno, A M Braga, et al. Remote magnetostrictive position sensors interrogated by fiber Bragg gratings[J]. Sens. Actuators A, 2007, 135: 141–145.
- [8] J Mora, B Ortega, M V Andres, et al. Tunable chirped fibre Bragg grating device controlled by variable magnetic fields[J]. Electron. Lett., 2002, 38(3): 118–119.
- [9] M J Hurben, C E Patton. Theory of magnetostatic waves for in-plane magnetized isotropic films[J]. J. Magn. Mater., 1995, 139: 263–291.
- [10] 刘公强, 乐志强, 沈德芳. 磁光学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2001.
- [11] Yariv A. Coupled-mode theory for guided-wave optics[J]. IEEE J. Quantum Electron., 1973, QE-9(9): 919–933.
- [12] 文峰, 武保剑. 基于金属包覆磁性波导结构的磁光 Bragg 器件特性分析[J]. 光学与光电技术, 待发表.