

# 磁光 Bragg 衍射中的相位失配分析<sup>\*</sup>

武保剑<sup>†</sup>

(电子科技大学通信与信息工程学院, 成都 610054)

(2005 年 12 月 20 日收到, 2006 年 1 月 16 日收到修改稿)

给出了任意倾斜偏置磁场作用下相位失配时微波静磁波与导波光的磁光耦合方程, 分析了相位失配对导波光衍射效率及其衍射方向的影响. 计算了 YIG 薄膜波导中静磁反向体波与导波光非共线作用的 Bragg 衍射效率, 传统磁化时计算结果与实验结果一致. 计算表明, 与传统的磁化情形相比, 适当的偏斜磁场可使导波光衍射效率提高 6dB 以上, 当导波光入射角保持不变时, 由磁场方向改变引起的相位失配对衍射效率的影响不大. 因此, 优化偏置磁场方向是改善磁光 Bragg 器件衍射性能、提高磁光带宽的有效方法.

关键词: 磁光效应, Bragg 衍射, 静磁波

PACC: 7820L, 7530D, 7540G, 7570

## 1. 引 言

利用磁光薄膜波导中微波静磁波对导波光的衍射效应原理可制成许多磁光 Bragg 器件或组件, 如频谱分析器、光调制器和光偏转器等, 从而用于光信息处理、光通信和激光雷达等领域<sup>[1]</sup>, 还可以借助于衍射光来测量静磁波的动态特性, 即作为磁光导波探针使用<sup>[2,3]</sup>. 由于这类磁光 Bragg 器件比类似的声光器件有更高的可调频率范围、更高的调制速度等优势, 加上近年来集成光波导器件及其工艺水平的不断提高, 使得这方面的研究越来越受到人们的关注. 在静磁波与导波光相互作用中, 人们研究得最多的是完全相位匹配条件下静磁波对导波光的 Bragg 衍射效率, 此时磁光器件具有最佳的衍射性能. 然而, 要达到完全相位匹配实际上并不容易, 更何况有些应用不可避免地会工作在相位失配状态(如磁光光束扫描仪等). 因此有必要研究相位失配因素对磁光衍射效应的影响, 对全面认识静磁波与导波光相互作用本质也具有重要意义.

最近文献已表明<sup>[4-6]</sup>, 适当倾斜的偏置磁场可提高静磁正向体波(MSFVW)对导波光的 Bragg 衍射效率, 然而很少研究倾斜磁场对其它静磁波模式与导波光相互作用的影响. 本文首先给出任意倾斜偏置磁场

中相位失配时静磁波与导波光的耦合模方程, 它可用于研究各种静磁波模式与导波光的共线或非共线作用. 作为其应用的一个特例, 分析了偏斜磁场作用下静磁反向体波(MSBVW)对导波光的衍射. 最后讨论了静磁波频率、偏置磁场方向等对相位失配、进而对导波光衍射效率的影响, 给出了相位失配时提高磁光 Bragg 器件磁光带宽的磁场优化方法.

## 2. 静磁反向体波与导波光的非共线作用

将 GGG 衬底上外延生长的钇铁石榴石(YIG)薄膜置于自由空间中, 形成如图 1 所示的 YIG-GGG 波导结构. 引入一个等效外部磁场矢量  $H_e = H_0 + H_A$ , 其中  $H_0$  和  $H_A$  分别为外加应用磁场和等效各

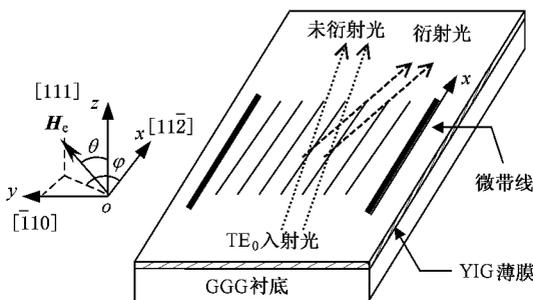


图 1 静磁反向体波与导波光的非共线作用

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号 60401007)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: bjwu@uestc.edu.cn

向异性场  $\mathbf{H}_e$  的大小和方向用球坐标  $(H_e, \theta, \varphi)$  表示,如图 1 所示.则薄膜内部的静磁场为  $\mathbf{H}_i = \mathbf{H}_e + \mathbf{H}_d$ ,其中  $\mathbf{H}_d$  为表面退磁场.静磁反向体波(MSBW)沿  $+y$  方向传播( $s=1$ ), $TE_0$  模式的导波光近似沿  $+x$  方向入射,它们之间通过法拉第(Faraday)效应与科顿-穆顿(Cotton-Mouton)效应发生非共线作用.

$$\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} C_{TM}^{(u)}(x) \\ C_{TM}^{(d)}(x) \\ C_{TE}^{(u)}(x) \\ C_{TE}^{(d)}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \kappa_{zz}^{(dc)} & 0 & \kappa_{zz}^{(dc)} e^{i\Delta_u x} & \kappa_{zy}^{ac} \left( \frac{1}{2} \mathbf{g}_m \right) e^{-i\Delta_{TE}^{st} \cdot r} \\ 0 & \kappa_{zz}^{(dc)} & \kappa_{zy}^{ac} \left( \frac{1}{2} \mathbf{g}_m^* \right) e^{i\Delta_{TM}^{st} \cdot r} & \kappa_{zy}^{(dc)} e^{i\Delta_d x} \\ \kappa_{yz}^{(dc)} e^{-i\Delta_u x} & \kappa_{yz}^{ac} \left( \frac{1}{2} \mathbf{g}_m \right) e^{-i\Delta_{TM}^{st} \cdot r} & \kappa_{yy}^{(dc)} & 0 \\ \kappa_{yz}^{ac} \left( \frac{1}{2} \mathbf{g}_m^* \right) e^{i\Delta_{TE}^{st} \cdot r} & \kappa_{yz}^{(dc)} e^{-i\Delta_d x} & 0 & \kappa_{yy}^{(dc)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{TM}^{(u)}(x) \\ C_{TM}^{(d)}(x) \\ C_{TE}^{(u)}(x) \\ C_{TE}^{(d)}(x) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $C_{TM}^{(u)}(x)$  和  $C_{TE}^{(u)}(x)$  分别表示  $TM_0$  光和  $TE_0$  光横向电场分量的复振幅,上角标(u)和(d)分别表示未衍射光和衍射光.耦合系数与磁光介电系数有关,即  $\kappa_{ij}^{(dc)} = -\frac{ik_0}{2\epsilon_0 \sqrt{\epsilon_r}} \Delta\epsilon_{ij}^{(dc)}$ ,  $\kappa_{ij}^{ac} \left( \frac{1}{2} \mathbf{g}_m \right) = -\frac{ik_0}{2\epsilon_0 \sqrt{\epsilon_r}} \Delta\epsilon_{ij}^{ac} \left( \frac{1}{2} \mathbf{g}_m \right)$ , 和  $\kappa_{ij}^{ac} \left( \frac{1}{2} \mathbf{g}_m^* \right) = -\frac{ik_0}{2\epsilon_0 \sqrt{\epsilon_r}} \Delta\epsilon_{ij}^{ac} \left( \frac{1}{2} \mathbf{g}_m^* \right)$  ( $i, j = y, z$ ),  $\mathbf{g}_m$  和  $\mathbf{g}_m^*$  分别为静磁波交变磁化强度及其共轭的复振幅<sup>[5]</sup>;  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ ,  $\lambda_0$  为真空中入射光波长,  $\epsilon_0$  和  $\epsilon_r$  分别为真空介电常数和 YIG 薄膜的相对介电常数.相位失配因子可表示为  $\Delta_d = \beta_{TM}^{(d)} - \beta_{TE}^{(d)}$ ,  $\Delta_u = \beta_{TM}^{(u)} - \beta_{TE}^{(u)}$ ,  $\Delta_{TM}^{st} = \beta_{TM}^{(d)} - \beta_{TE}^{(u)} + K_s$  和  $\Delta_{TE}^{st} = \beta_{TE}^{(d)} - \beta_{TM}^{(u)} + K_s$ ,  $\beta$  和  $K_s$  分别为光波和静磁波的波矢.静磁体波波数  $K_s$  可表达为:  $K_s = \frac{\mu_{33}}{d \sqrt{(\mu_{23} + \mu_{32})^2 - 4\mu_{22}\mu_{33}}} \left[ m\pi + 2 \tan^{-1} \times \left( \frac{1 + \mu_{22}\mu_{33} - |\mu_{23}|^2}{\sqrt{(\mu_{23} + \mu_{32})^2 - 4\mu_{22}\mu_{33}}} \right) \right] > 0$ ,  $\mu_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) 为磁光薄膜的相对磁导率张量元,  $m$  和  $d$  分别为静磁体波模数和磁光薄膜厚度.

定义输出端 ( $x=L$ ) 的衍射效率为  $\eta_D = |C_{TM}^{(d)}(L)| + |C_{TE}^{(d)}(L)|$ , 衍射光的模式转换效率为  $\eta_{MCD} = |C_{TM}^{(d)}(L)|^2$  (入射导波光为  $TE_0$  模式时). 计算可表明,在传统偏置磁场情形下,即沿静磁反向体波传播方向磁化 ( $\theta = \varphi = 90^\circ$ ) 时,  $\eta_D \approx \eta_{MCD}$ ; 当入

射导波光为  $TE_0$  模时,静磁反向体波对导波光的 Stokes 衍射强度比相应的反 Stokes 衍射强度约高 6dB 左右.因此,本文只考虑 Stokes 相互作用.

### 3. Stokes 作用中的相位失配分析

在静磁反向体波与导波光的 Stokes 相互作用中,衍射光频率  $f_d$ 、入射光频率  $f_u$  和静磁波频率  $f$  之间满足能量守恒关系,即  $f_d = f_u - f$ ; 光的衍射方向可依据入射光波矢  $\beta_u$  和静磁波波矢  $K_s$  来确定,如图 2 所示.图中  $\beta_{u,d}$  分别为未衍射光和衍射光在磁光薄膜中的传播常数(分别处于圆弧  $L_u$  和  $L_d$  上),  $m_{u,d}$  和  $k_{u,d}$  分别为折射率和真空中光传播常数,  $\phi_{u,d}$  为相应光波相对于  $x$  轴的方向角(可取正或负值).相位匹配时,  $\beta_d = \beta_u - K_s$  (动量守恒),衍射效率最大,如图 2(a) 所示; 相位失配时,衍射光束将沿着动量失配最小的方向,如图 2(b) 所示.衍射角  $\phi_d = \tan^{-1} \frac{\beta_u \sin \phi_u - s K_s \cos \varphi_j}{\beta_u \cos \phi_u}$ , 式中  $\varphi_j$  为激发静磁波的微带线电流的方向角(对本文讨论的情形,  $\varphi_j = 0$ ),  $s = 1$  表示静磁波沿  $+y$  方向传播.通常衍射角很小,可忽略  $y$  方向的相位失配影响,则相位失配因子可分别表示为

$$\begin{aligned} \Delta_{TM}^{st} &= \beta_{TM}^{(d)} \cos \phi_d - (\beta_{TE}^{(u)} \cos \phi_u + s K_s \sin \varphi_j) \\ \Delta_{TE}^{st} &= \beta_{TE}^{(d)} \cos \phi_d - (\beta_{TM}^{(u)} \cos \phi_u + s K_s \sin \varphi_j), \end{aligned} \quad (2)$$

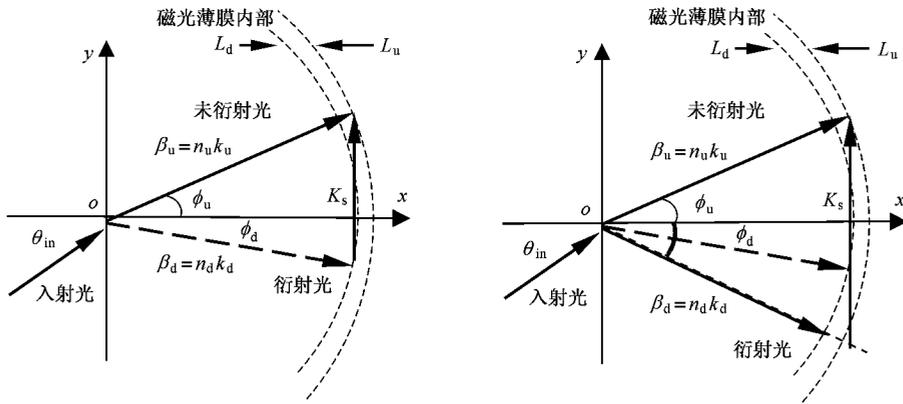


图2 静磁波对导光光的 Stokes 衍射效应 (a)相位匹配情形 (b)相位失配情形

静磁波与导波光的非共线作用,可导致光束发生衍射偏转.相位或动量的失配通常带来两方面的影响:降低导波光衍射效率和衍射光斑偏离相位匹配时的 Bragg 衍射方向.这样,在一定的磁光带宽范围内,可识别的衍射光点数  $N = \frac{1}{8} D \cdot \Delta K_s$ ,  $D$  为光束直径,  $\Delta K_s$  为静磁波波数的变化<sup>[9]</sup>.

## 4. 计算与讨论

首先计算偏置磁场平行于静磁反向体波传播方向,即传统偏置磁场情形下( $\theta = \varphi = 90^\circ$ ),静磁反向体波对导光光的 Bragg 衍射效率.为了便于比较,采用与文献[10]相同的实验参数进行计算,即  $TE_0$  模的入射导波光波长为  $1.303\mu\text{m}$ , YIG 薄膜厚度为  $9\mu\text{m}$ ,微带线的长度和宽度分别为  $5\text{mm}$  和  $50\mu\text{m}$ ,激发静磁波的微波 RF 驱动功率保持在  $380\text{mW}$ (对应的激发电流幅度为  $123\text{mA}$ ),外加应用磁场  $H_0 = 79.6\text{kA/m}$ .其他参数取<sup>[11]</sup>:  $M_0 = 139.3\text{kA/m}$ ,  $n_{\text{YIG}} =$

$2.2$ ,  $n_{\text{GGG}} = 1.59$ ,  $f_1 = 2.44 \times 10^{-9} (\text{A/m})^{-1}$ ,  $f_{11} - f_{12} = 8.76 \times 10^{-15} (\text{A/m})^{-2}$ ,  $f_{44} = 5.84 \times 10^{-15} (\text{A/m})^{-2}$ ,  $\Delta f = -2.92 \times 10^{-15} (\text{A/m})^{-2}$ .若等效各向异性场近似取  $4.8\text{kA/m}$  ( $60 \text{ Oe}$ )<sup>[12]</sup>,则  $H_e = 84.4\text{kA/m}$ .Bragg 衍射效率  $\eta_D$ 、静磁反向体波波数  $K_s$  和 Bragg 入射角  $\theta_B$  的计算曲线如图 3 所示.由图 3(a)可以看出,计算曲线与实验曲线符合得很好.当静磁波频率  $f = 4.78\text{GHz}$  时,计算的 Bragg 衍射效率最大为  $\eta_{\text{max}} = 0.997\%$  与  $1\%$  的实验结果一致<sup>[10]</sup>.由于静磁波的色散特性,当频率改变的时候,静磁波波数  $K_s$  也发生改变,这时可通过调整导波光入射角  $\theta_{\text{in}}$  实现相位匹配.换句话说,当光的入射角保持不变时,静磁波频率的改变会使 Bragg 器件工作在相位失配状态,使衍射效率降低.图 3(a)中的虚线,表示了入射角  $\theta_{\text{in}} = 3^\circ$  时衍射效率的频率特性,其  $-3\text{dB}$  磁光带宽约为  $250\text{MHz}$ ;  $f = 4.65\text{GHz}$  时衍射效率最大,此时满足相位匹配条件,而在其他频点则处于相位失配状态.由图 3(a)可以看出,相位失配对频率的依赖较

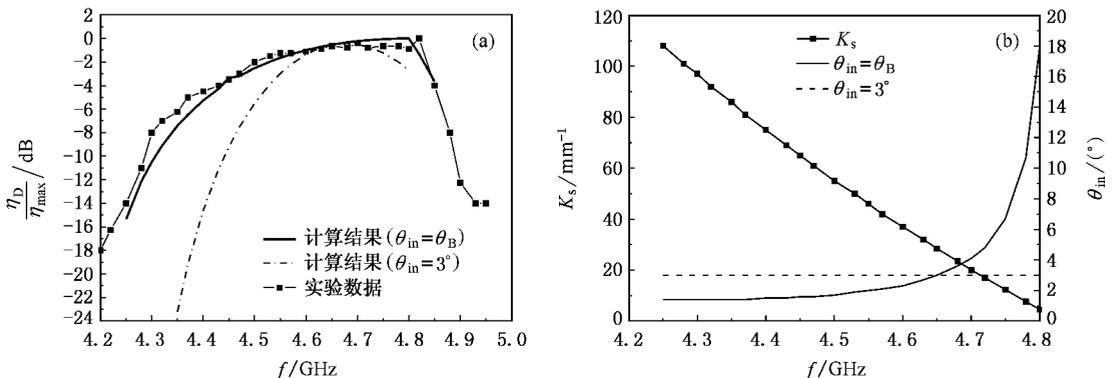


图3 传统偏置磁场作用下 (a)导波光衍射效率  $\eta_D$  (b)静磁波波数  $K_s$  和 Bragg 入射角  $\theta_B$

为敏感.

下面考虑由于偏置磁场方向改变引起的相位失配对导波光衍射效率的影响. 为了便于分析, 本文计算中保持磁场  $H_e$  的大小不变, 其方向只在平行于薄膜的平面内变化 ( $\theta = 90^\circ$ ). 相位匹配时导波光的 Bragg 衍射效率曲线如图 4 所示. 可以看出, 与传统偏置磁场情形 ( $\varphi = 90^\circ$ ) 相比, 往  $-x$  方向偏斜磁场 (如  $\varphi = 100^\circ$ ), 可提高静磁反向体波对导波光的衍射效率.

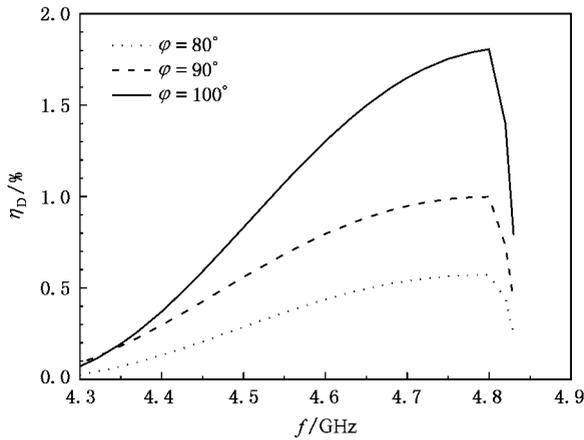
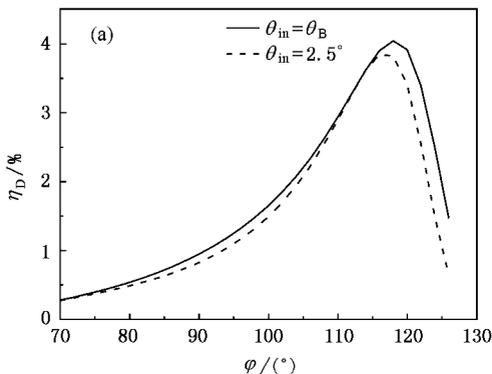


图 4 偏斜磁场情形下导波光 Bragg 衍射效率  $\eta_D$  的频率特性

图 5(a) 给出了  $f = 4.7\text{GHz}$  时导波光衍射效率对磁场方向的依赖曲线, 其中虚线为入射角  $\theta_{in} = 2.5^\circ$  时相位失配情形; 图 5(b) 为静磁波波数  $K_s$  和 Bragg 入射角  $\theta_B$  的曲线. 计算可知, 相位匹配时 Bragg 衍射效率的最大值为  $4.0429\%$  ( $\varphi = 118^\circ$ ), 比传统磁化时 ( $\varphi = 90^\circ$ ) 提高了  $6.3\text{dB}$ . 如图 5(a) 所示. 类似地, 对于其他频率, 也存在一个可使衍射效率进一步提高的优化磁场方向. 由图 5(b) 可知, 在  $\varphi = 90^\circ$  附近, 磁场方向的改变对静磁波波数  $K_s$  和 Bragg



角  $\theta_B$  的影响不大. 这样, 当入射角  $\theta_{in} = 2.5^\circ$  时, 与相位匹配情形相比, 改变磁场方向导致的相位失配对衍射效率的影响也小, 即相位失配对磁场方向的依赖不敏感. 一方面, 可通过优化磁场方向提高衍射效率, 来弥补频率改变引起的相位失配对导波光衍射性能的不利影响; 另一方面, 可在对衍射方向影响很小的情况下进一步提高磁光 Bragg 器件的工作带宽.

需强调指出, 由于静磁波激发模式依赖于偏置磁场大小和方向, 因此本文给出的任意偏置磁场下的磁光耦合方程不但可以分析静磁反向体波 (MSBVW) 对导波光的衍射作用, 还可以应用于静磁正向体波 (MSFVW) 和静磁表面波 (MSSW) 情形; 由于考虑了相位失配因素的影响, 因此该磁光耦合方程不但可以分析它们的非共线作用, 还可以分析它们的共线作用 (如  $\varphi_j = -90^\circ$  时).

## 5. 结 论

在静磁波与导波光相互作用中, 相位匹配技术十分关键, 主要涉及两种导波的模式选择、它们的相互作用类型 (包括频移和方向特性)、偏置磁场的大小和方向、工作频率范围、波导结构/材料等. 本文根据静磁波与导波光的耦合方程, 理论研究了任意偏置磁场中静磁反向体波对导波光的 Stokes 衍射效应. 在计算结果与实验结果一致的基础上, 分析了相位失配对静磁波频率、磁场方向等的敏感特性. 计算表明, 偏斜磁场方法可有效提高导波光衍射效率. 利用偏斜磁场方法, 可在一定范围内弥补频率变化导致的相位失配对导波光衍射效率的不利影响, 也可进一步提高这类基于静磁波的 Bragg 器件的磁光带宽.

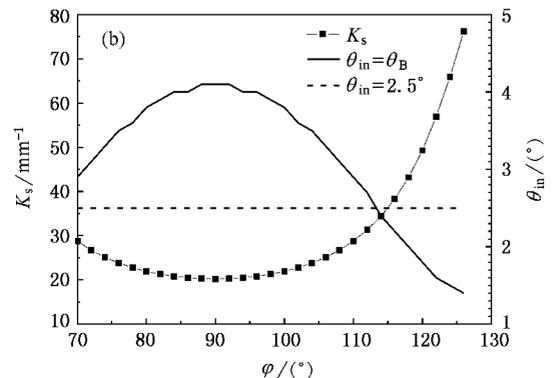


图 5  $f = 4.7\text{GHz}$  时 (a) 衍射效率  $\eta_D$  (b) 静磁波波数  $K_s$  和 Bragg 角  $\theta_B$  对磁场偏斜方向的依赖

作者非常感谢邱昆教授、邱琪教授以及所在学术团队的其他成员,他们对本项目的顺利开展提供了大力支持和帮助.

- [ 1 ] Tsai C S 1996 *Proc. of the IEEE* **84** 853
- [ 2 ] Tsai C S , Young D , Nikitov S A 1998 *J. Appl. Phys.* **84** 1670
- [ 3 ] Cash A F , Stancil D D 1996 *IEEE Trans. Magn.* **32** 5188
- [ 4 ] Wu B J , Liu G Q 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** S286 ( in Chinese ) [ 武保剑、刘公强 1999 物理学报 **48** S286 ]
- [ 5 ] Wu B J , Liu G Q , Zou Z Q 2001 *Commun. Theor. Phys.* **36** 497
- [ 6 ] Kolololtsev O V , Vountesmeri Valeri 2001 *J. Magn. Mater.* **225** 394
- [ 7 ] Yariv A 1973 *IEEE J. Quantum Electron.* **9** 919
- [ 8 ] Torfeh M , Courtois L , Smoczynski L , LeGall H , Desvigne J M 1977 *Physica* **89B** 255
- [ 9 ] Yariv A 1997 *Optical Electronics in Modern Communications* ( 5th Edition , Oxford : Oxford University Press , Inc. ) p53
- [ 10 ] Pu Y , Wang C L , Tsai C S 1991 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **3** 462
- [ 11 ] Pisarev P V , Sinii I G , Kolpakova N N , Yakovlev Y M 1971 *Sov. Phys. JEPT* **33** 1175
- [ 12 ] Stancil D D 1993 *Theory of Magnetostatic Waves* ( New York : Springer-Verlag ) p45
- [ 13 ] Wen X W , Li G J , Qiu G X , Li Y P , Ding L , Sui Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1847 ( in Chinese ) [ 温晓文、李国俊、仇高新、李永平、丁磊、隋展 2005 物理学报 **54** 1847 ]

## Analysis of phase mismatch in magneto-optic Bragg diffraction<sup>\*</sup>

Wu Bao-Jian<sup>†</sup>

( School of Communication and Information Engineering , University of Electronic Science and Technology of China , Chengdu 610054 , China )

( Received 20 December 2005 ; revised manuscript received 16 January 2006 )

### Abstract

The magneto-optic ( MO ) coupled-mode equations for magnetostatic waves ( MSWs ) and guided optical waves ( GOWs ) under phase-mismatch conditions were deduced and applied to the noncollinear interaction with magnetostatic backward volume waves ( MSBVWs ) in obliquely magnetized yttrium-iron-garnet ( YIG ) film using single-element microstrip line transducer. The diffraction efficiency ( DE ) of the incident TE<sub>0</sub>-mode light was calculated. For the case of magnetization along the MSBVW propagation direction , the calculated results are in good agreement with the experimental data. In contrast , by using an appropriately tilted bias magnetic field the DE can be increased by 6dB and is insensitive to the phase mismatch induced by the change of magnetization direction. Thus , the optimization of the direction of the bias magnetic field is an effective method for improving the diffraction performance and increasing the MO bandwidth of the Bragg cells.

**Keywords** : magneto-optics , Bragg diffraction , magnetostatic wave

**PACC** : 7820L , 7530D , 7540G , 7570

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60401007 ).

† E-mail : bjwu@uestc.edu.cn