

叉指电光布拉格衍射光栅分析*

钱 辰 陈振宇 祝宁华

(中国科学院半导体研究所集成光电国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 叉指电光布拉格衍射光栅能够用于制作集成光学器件。将点匹配法扩展应用于叉指电光布拉格衍射光栅分析, 将光栅各区域的势函数表示为该区域中满足拉普拉斯方程的一系列基函数的级数, 匹配边界上有限个点的边界条件以确定出级数项的系数, 从而得到叉指电极电场分布的解析表达式, 在此基础上得到了叉指电光布拉格衍射光栅的一些重要的光学与电学特性参量。将分析结果与测量值进行了对比, 发现二者十分吻合。所提出的分析方法简便快捷, 精度高, 所导出的电场分布的解析表达式和分析结果对叉指电光衍射光栅的优化设计具有重要的意义。

关键词: 光电子学; 激光技术; 电光效应; 点匹配法; 光栅

中图分类号: TN256 文献标识码: A

Analysis of Interdigital Electrooptic Bragg Diffraction Grating

Qian Chen Chen Zhenyu Zhu Ninghua

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

(Received 31 October 2002; revised 24 February 2003)

Abstract: Some integrated optics devices can be made based on the interdigital electrooptic bragg diffraction grating. The point-matching method is extended to the analysis of interdigital electrooptic bragg diffraction gratings. This method gives a simple and fast analytic expression of the electric fields in the structure. The field distributions are used to calculate the optical and electrical characteristic parameters of the gratings. The effects of finite conductor thickness have been taken into account in the analysis. It is shown that the simulation results agree well with the measured data.

Key words: optoelectronics; laser technology; electrooptic effect; point-matching method; grating

1 引 言

在电光晶体波导上沉积叉指形状的电极就形成了叉指电光布拉格衍射光栅, 其外形如图 1 所示。在叉指电极的正负极上分别加上电压, 电光晶体之中就出现周期性变化的电场, 由于电光晶体具有线性电光效应, 它的折射率与电场一样呈周期性变化,

这样就形成了电光布拉格光栅^[1~11]。一般的光栅衍射效率(即衍射光强与入射光强之比)是固定的, 而对于叉指电光布拉格光栅, 只要改变加在电极上的电压, 它的衍射效率就能够发生变化。因此, 叉指电光布拉格衍射光栅能够被用于制作波导光调制器^[1,3~5]、光开关^[6,7]等集成光学器件。

在设计叉指电光布拉格衍射光栅时, 光栅的电容、折射率变化、衍射效率以及实现完全衍射所需的电压都与光栅中的电场分布密切相关。如何准确快捷地求出电光布拉格衍射光栅中的电场分布就成了光栅分析的关键。通常都将波导的某个特殊平面的电场分布近似作为整个波导中的实际电场分布, 但

* 863 计划和 973 课题(6200003660)、杰出青年基金(69825109)资助课题。

E-mail: qianchen@tsinghua.org.cn

收稿日期: 2002-10-31; 收到修改稿日期: 2003-02-24

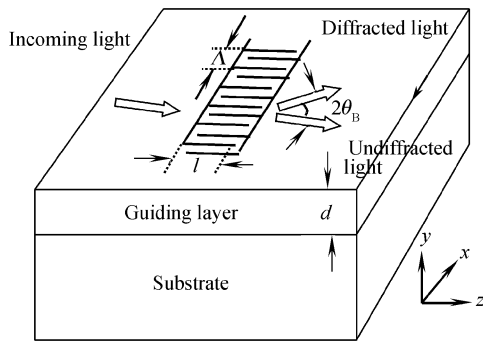


Fig. 1 Interdigital electrooptic Bragg diffraction grating
这样只能估测衍射光栅的特性参量^[1,3,4]。

点匹配法 (Point-matching method)^[8] 是由 Marcuse 于 1989 年首次提出的,该方法可以方便地计算由层状介质与其上的电极构成的传输线结构中的电势与电场分布,但它只能处理无限薄电极的情况^[9]。扩展的点匹配法则能够用于分析具有多层介质、具有一定电极厚度的结构,这是一种简单精确且适用范围广泛的准静态分析方法^[10]。

本文将点匹配法扩展应用于叉指电光布拉格衍射光栅的分析中。在第二部分中,系统地介绍了扩展的点匹配法,在第三部分中利用电光布拉格衍射光栅的电场分布关系式计算了光栅的一些重要参量,第四部分运用扩展点匹配法对某一特定叉指电光光栅进行分析并将其结果与其他一些方法进行了比较,最后是本文的结论。

2 扩展的点匹配法

图 1 为叉指电光布拉格衍射光栅的结构示意图,其衬底是 y 切的 LiNbO_3 晶体,而波导层是厚度为 d 的 Li_2O 扩散层,叉指电极的长度为 l ,电光光

栅的周期为 Λ 。 LiNbO_3 晶体具有很强的电光效应,使用 Li_2O 扩散的 LiNbO_3 晶体作为波导层具有工艺简单、插入损耗低的特点^[2]。

叉指电极上的外加电场将作用于整个结构中,由此产生的电位函数都可以用傅里叶积分来精确表达。但在数值计算过程中,离散的正弦或余弦级数相比傅里叶积分要易于处理,因此将电位函数展开表达成一系列正弦或余弦级数。为便于计算,将电位函数的级数展开仅保留有限个级数项,同时取电位函数在边界上的有限个匹配点上满足边界条件,这样可以通过求解一组线性方程最终确定各区域电位函数级数的系数。

将图 2 所示的电光布拉格衍射光栅的横截面分为三个区域: I、II 区域处于空气中($\epsilon_1 = \epsilon_0$); II 区域处于两个电极之间,电极厚度为 t ; III 区域为 y 切 LiNbO_3 晶体($\epsilon_x = 28, \epsilon_y = 43$)。

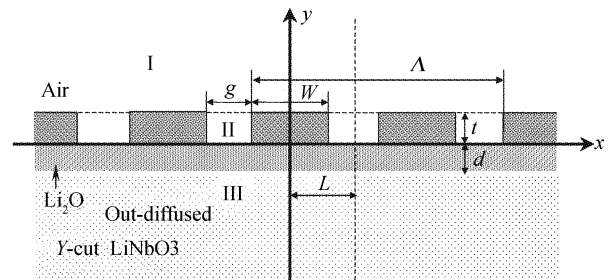


Fig. 2 Cross-section of the interdigital electrooptic Bragg grating

叉指电极宽为 W ,电极之间的间距为 g ,由于叉指电极的电场分布具有周期性的特点,因此只需要计算 $0 < x < L$ 的场,其中 $L = (W + g)/2$ 。叉指电极各区域中的电位函数可以写成以下形式:

$$\phi_1 = \sum_{i=1}^{N_1} a_i \exp\left[-\frac{(2i-1)\pi}{2L}y\right] \cos\left[\frac{(2i-1)\pi}{2L}x\right], \quad 0 < x < L, y > t, \quad (1a)$$

$$\phi_2 = \frac{2V_0}{g} \left(\frac{W}{2} + \frac{g}{2} - x\right) + \sum_{i=1}^{N_2} \left\{ b_i \exp\left[-\frac{(2i-1)\pi}{g}y\right] + c_i \exp\left[\frac{(2i-1)\pi}{g}y\right] \right\} \sin\left[\frac{(2i-1)\pi}{g} \left(x - \frac{W}{2}\right)\right], \\ W/2 < x < (W+g)/2, 0 < y < t \quad (1b)$$

$$\phi_3 = \sum_{i=1}^{N_1} d_i \exp\left[\kappa \frac{(2i-1)\pi}{2L}y\right] \cos\left[\frac{(2i-1)\pi}{2L}x\right], \quad 0 < x < L, y < 0 \quad (1c)$$

其中 $\kappa = \sqrt{\epsilon_x/\epsilon_y}$ 。

V_0 为正电极所加的电压, a_i, b_i, c_i, d_i 为待求的系数。在 $0 < x < L$ 区间,匹配点间隔都为 Δx 。在 I 和 III 区域,电位函数被截取 $L/\Delta x = N_1$ 个级数项;

在 II 区域,电位函数被截取 $g/(2\Delta x) = N_2$ 个级数项。

电场的 x, y 分量为

$$E_x = -\partial\phi/\partial x, \quad E_y = -\partial\phi/\partial y. \quad (2)$$

在各个区域的交界面,电场切向分量连续与电位移矢量法向分量连续,即 E_x 与 E_y 连续,系数 a_i ,

b_i, c_i 与 d_i 可以通过该边界条件求得,具体表达式如下:

$$\text{在 } y = t \text{ 平面: } \begin{cases} \phi_1 = V_0, & 0 < x < W/2, \\ \phi_1 = \phi_2, \text{ 同时 } \partial\phi_1/\partial y = \partial\phi_2/\partial y, & W/2 < x < W/2 + g/2, \end{cases} \quad (3a)$$

$$\text{在 } y = 0 \text{ 平面: } \begin{cases} \phi_3 = V_0, & 0 < x < W/2, \\ \phi_3 = \phi_2, \text{ 同时 } \epsilon_1(\partial\phi_3/\partial y) = \epsilon_y(\partial\phi_2/\partial y), & W/2 < x < W/2 + g/2, \end{cases} \quad (3b)$$

于是系数 a_i, b_i, c_i 与 d_i 就可以通过求解 $M = 2N_1 + 2N_2$ 个线性方程来得到.将该线性方程组的系数写成矩阵 \mathbf{A} ,常数项写成矩阵 \mathbf{B} ,则这个方程组可以写以下形式

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{B}, \quad (4a)$$

其中
 $\mathbf{X} =$

$$[a_1, \dots, a_{N_1}, b_1, \dots, b_{N_2}, c_1, \dots, c_{N_2}, d_1, \dots, d_{N_1}]^T. \quad (4b)$$

解这个方程,得到

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{B}. \quad (5)$$

当得到系数 a_i, b_i, c_i 与 d_i 之后,利用(1)式和(2)式,就可以求出叉指光栅中电势与电场的分布.

扩展点匹配法中未知参量的求解只需要做一次简单的矩阵求逆,不需要进行复杂的积分或者是迭代计算,与其它数值计算方法相比具有计算简单快速的特点,并且在这个方法中考虑了具有一定厚度的电极.

3 叉指电光光栅特性参量

在图 1 所示的结构中,光场的 TE 模将沿 y 方向传播,并在 x 方向发生偏振.光栅的布拉格角 θ_B 由下式决定^[5]:

$$\theta_B = \lambda/2n\Lambda, \quad (6)$$

其中 n 为波导折射率, Λ 为光栅周期, λ 为入射光在真空中的波长.

要使布拉格衍射光栅有效地工作,常数 Q 必须满足以下条件^[3]:

$$Q = \frac{2\pi\lambda l}{n\Lambda^2} > 10. \quad (7)$$

在电极上加上电压,由于电光效应,折射率发生改变,其改变量为^[3]

$$\Delta n = \frac{1}{2}n_e^3 r_{33} E_x, \quad (8)$$

其中 n_e 为非寻常光折射率, r_{33} 为相应的电光系数.由于 x 分量电场 E_x 与光场 ϕ_{opt} 产生相互作用,因此需要引入叠加积分 Γ 来表示电场与光场的作用效

率, Γ 的表达式如下^[10]:

$$\Gamma = \iint E_x \phi_{\text{opt}}^2 dx dy / \iint \phi_{\text{opt}}^2 dx dy, \quad (9)$$

其中 ϕ_{opt} 为光场在厚度为 d 的波导中的分布^[2]:

$$\phi_{\text{opt}} = \begin{cases} 0, & y < 0, \\ \frac{4}{\sqrt{\pi}d^2} y^2 \exp\left[-\left(\frac{y}{d}\right)^2\right], & y > 0, \end{cases} \quad (10)$$

则光模式的有效折射率的改变量写作

$$\Delta n = \frac{1}{2}n_e^3 r_{33} \Gamma. \quad (11)$$

布拉格衍射效率可进一步表示为^[3]

$$\frac{I_d}{I_i} = \sin^2\left(\frac{k\Delta n l}{2}\right), \quad (12)$$

其中 I_d, I_i 分别为衍射光强和入射光强, k 为 $2\pi/\lambda$.在利用扩展点匹配法获得电场的解析表达式以后,利用(9)式 ~ (12)式就可以求出完全衍射所需要的电压 V_f .

由于扩展点匹配法可以得出电场的解析表达式,因此可以很容易地利用电场与电容的关系求出叉指电光光栅的电容值.根据

$$q = \oint \mathbf{n} \cdot \epsilon \mathbf{E} ds, \quad (13)$$

就可以求出电极上的电荷 q ,其中,积分路径为 $x-y$ 平面上包围中心电极的闭合回路, \mathbf{n} 为指向积分路径所围区域的外法线方向的单位矢量,再利用

$$C_g = q/\Delta V, \quad (14)$$

就得到极间电容.在叉指光栅中,通常相邻电极分别加的是正电压和负电压,因此 ΔV 为 $2V_0$.叉指电光光栅的电容就可以通过下式得到^[11]

$$C = (N_f - 1)C_g l. \quad (15)$$

4 结果与讨论

利用本文提出的方法分析与文献[2]中相同的电光布拉格衍射光栅样品 A,其尺寸参量如表 1 所示.入射光波长为 633 nm.利用(6)式、(7)式分别得到衍射角 $2\theta_B$ 为 2.26° ,常量 Q 为 22.

Table 1 Design parameters of electrooptic Bragg diffraction grating sample A

	Value
Finger gap / μm	4
Finger width / μm	4
Length of finger / mm	3
Number of finger pairs	31
Thickness of electrodes / μm	1
Thickness of waveguide / μm	5

图 3 显示了样品 A 中的电场分布。计算出光栅的电容与衍射效率最大时的电压,列于表 2。从表中可以看出,用本方法得到的电光布拉格光栅的特性参量与文献[2]中的测量值十分吻合。

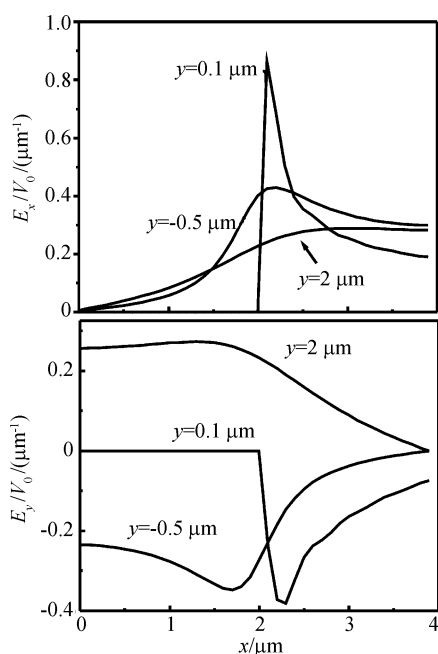


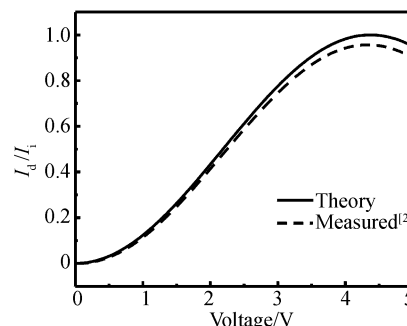
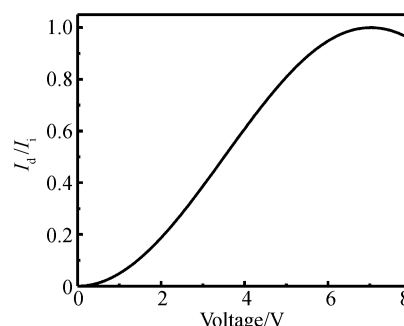
Fig. 3 Electric field components in the interdigital electrooptic Bragg grating Fig. 3

Table 2 Performance data of electrooptic Bragg diffraction grating

	Ref. [2]	Our method
Capacitance (C) / pf	58	61
Drive voltage for maximum deflection (V_f) / V	4.1	4.0

图 4 显示了电压与衍射效率之间的关系,理论值与测量值相差不大。利用 LiNbO_3 作为电光晶体的电光布拉格光栅的驱动电压小,衍射效率高。样品 B 将波导的厚度由 $5 \mu\text{m}$ 增至 $10 \mu\text{m}$,所得到的电压与衍射效率之间的关系由图 5 表示。对比图 4 与图 5 可以看出,波导的厚度或者说光波的分布对衍射效率具有明显的影响,随着波导厚度增加,达到完

全衍射所需要的电压将增加。

Fig. 4 Dependence of the diffraction efficiency on applied voltage V of sample A (TE_0 at 633 nm)Fig. 5 Dependence of the diffraction efficiency on applied voltage V of sample B (TE_0 at 633 nm)

结论 点匹配法扩展应用于以 y 切的 LiNbO_3 晶体为衬底,以 Li_2O 扩散层作为波导,具有一定电极厚度的叉指电光布拉格光栅的分析中。得到了电场分布的解析表达式,并利用该表达式计算出叉指电光布拉格光栅的电容、衍射效率以及获得最大衍射效率所需的电压等重要的特性参量。从本文的分析结果中可以看出叉指电光布拉格光栅具有衍射效率高、工作电压低的特点,波导的厚度对工作电压有一定的影响。所得的电容和衍射效率与实测结果十分吻合。由此可见,扩展的点匹配法是一种计算原理简单、过程快速、结果精确的分析方法,它也能够运用到其它结构电极特性参量的分析中。

参 考 文 献

- 1 Hammer J M, Philips W. Low-loss single-mode optical waveguides and efficient high-speed modulators of $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$ on LiTaO_3 . *Appl. Phys. Lett.*, 1974, **24** (11): 545~547
- 2 Auracher F. *Planar Electrooptic and Acoustooptic Bragg-Deflectors. Integrated Optics Physics and Applications*. New York and London: Plenum Press, 1983. 211~223
- 3 Mu Shiang Wu, Tadashi Shiosaki, Akira Kawabata.

- Electrooptic diffraction modulation in ZnO film on sapphire. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25**(3):252~256
- 4 Tangonan G L, Persechini D L, Lotspeich J F. Electrooptic diffraction modulation in Ti-diffused LiTaO₃. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(20):3259~3263
- 5 Y Kyung Lee, Shyh Wang. Electrooptic Bragg-deflection modulations; theoretical and experimental studies. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(6):1565~1572
- 6 Qi Wang Song, Xu Ming Wang, Rebecca Bussjager. High-efficiency electro-optic grating switch with improved performance. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(35):7031~7036
- 7 Qi Wang Song, Pierre J. Talbot, Joanne H. Maurice. PLZT based high-efficiency electro-optic grating for optical switching. *J. Modern Optics*, 1994, **41**(4):717~727
- 8 Marcuse D. Electrostatic field of coplanar lines computed with the point-matching method. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25**(5):939~947
- 9 Kossowski S, Bogelsack F, Wolff I. The application of the point-matching method to the analysis of microstrip lines with finite metallization thickness. *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.*, 1988, **36**(8):1265~1271
- 10 Zhu N H, Qiu W, Pun E Y B. Analysis of velocity-matched Ti:LiNbO₃ optical intensity modulators with an extended point-matching method. *Opt. Quantum Electron.*, 1996, **28**:137~146
- 11 Esfandiari R, Maki D W, Siracusa M. Design of interdigitated capacitors and Their application to gallium arsenide monolithic filters. *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.*, 1983, **31**(1):57~64

《光学手册》简介

顾问：龚祖同 主编：李景镇

陕西科学技术出版社 16开 1541页 定价:100.00元

本手册是我国编写的第一本基础性大型光学手册。全书有 2700 多个公式,1400 余幅插图和 400 多个数据表格,230 万字。手册包括 25 个光学分科,如色度学、光谱学、信息光学、非线性光学、视觉光学、高速摄影和光子学等。资料丰富,表达方式简洁,是“一本兼顾光学工作者和非光学科技工作者的参考书”(引自王大珩院士为本书的题词)。能使读者在较短时间内全面了解某门光学分科的主要内容,查阅公式、数据省时省力。

手册由 20 多位光学专家编撰完成,在编写过程中得到了龚祖同、王大珩、侯洵、薛鸣球等著名光学专家的指导和帮助,保证了该手册的编写质量和权威性。

如需购买,请与光学期刊联合编辑部葛晓红联系。

电话:021-69918428,021-69918011,请从邮局汇款

地址:上海 800-211 信箱,光学期刊联合编辑部

邮编:201800

光学期刊联合编辑部

2004 年 3 月