

文章编号: 1001-3806(2007)03-0242-04

高功率 MgO:LNbO₃ 波导调制器的非线性影响分析

尹 赫, 马 晶*, 谭立英, 李 密

(哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘要: 为了解决空间光通信系统中调制功率受限的问题, 以空间光通信为背景, 利用准静态保角变换原理对具有高光损伤阈值的 MgO:LNbO₃ 集成波导外调制器进行了电极优化设计。对高功率激光在波导中的传播进行了仿真。基于仿真结果, 分析了非线性效应所带来的影响, 确定了器件最大输入光功率。该项研究对空间光通信等需要高速大功率激光调制技术的领域提供了有益的参考。

关键词: 集成光学; 非线性效应; 光束传播算法; 光损伤

中图分类号: TN929.13; TN25 **文献标识码:** A

Analysis of the effect of nonlinearity on MgO:LNbO₃ high power waveguide modulator

YN He, MA Jing, TAN Li-ying, LI Mi

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to break through the power restriction in DC (intersatellite optical communication), the electrodes of MgO:LNbO₃ was optimally designed based on quasistatic conformal transformation theory in the background of DC. The propagation of optical field with high input power was simulated. The effect of nonlinearity on modulator was analyzed and finally the maximum input power was determined. The research is significant for high power laser modulation field, such as DC.

Key words: integrated optics; nonlinear effect; beam propagation method; laser induce damage threshold

引 言

目前在光纤通信系统中使用的外调制器通常是 LNbO₃ 电光调制器, 它具有宽调制带宽、低插入损耗、低驱动电压、消光性能好、色散小等优点。近几年来, 国内外对 LNbO₃ 调制器的基本原理和参数、结构设计等方面均已进行了深入研究。

空间光通信系统同样需要采用 LNbO₃ 集成外调制器获得高带宽, 由于信号的传输距离较远, 要求有高强度的激光信号输出, 以便于实现捕获跟踪技术和低的误码率。但是, 铌酸锂晶体易于发生光折变效应, 低的光损伤阈值^[1,2]限制了其波导器件在高光功率密度场合时的应用。实验发现, 在 LNbO₃ 晶体生长时掺入一定摩尔比的 MgO, 形成 MgO:LNbO₃ 晶体, 其抗光损伤能力比 LNbO₃ 增强了约 100 倍^[3-5]。而在以往的集成波导调制器设计过程中, 并未考虑强通光功率所带来的影响, 如光损伤、非线性效应产生的信号畸变

等。作者利用准静态保角变换原理^[6]对 MgO:LNbO₃ 集成波导外调制器进行了电极优化设计, 采用光束传播算法^[7]利用 BEAMPROP 软件对高功率激光在所设计的器件中的传输进行了仿真研究, 对产生的非线性效应对信号的影响进行了分析, 并讨论了保持调制器正常工作情况下的最大输入光功率。

1 基本原理

1.1 调制器电极设计参数

在行波电极结构中, 模式可认为是 TEM 模, 特征阻抗可表示为^[8]: $Z = 1/c \sqrt{CC_0}$ (1) 式中, c 是光速, C 是电极单位长度的电容, C_0 是传输线的衬底用空气代替这种电极结构的单位电容。

调制器的调制带宽为^[9]:

$$\Delta f \approx \frac{1.4c}{\pi L (N_{\text{eff}} - N_0)} \quad (2)$$

式中, $N_{\text{eff}} = \sqrt{C/C_0}$ 为微波的有效折射率, N_0 为 MgO:LNbO₃ 波导的光波折射率, L 为调制器的电极长度。调制器半波电压 V_π 的表达式为:

$$V_\pi = \lambda G / (2n_e^3 \gamma_{33} \delta_0 \Gamma L) \quad (3)$$

式中, n_e 是 MgO:LNbO₃ 衬底的非常光折射率, γ_{33} 是电

作者简介: 尹 赫 (1981-), 女, 硕士研究生, 从事卫星光通信外调制技术的研究。

* 通讯联系人。E-mail: majing@hit.edu.cn

收稿日期: 2006-04-19; 收到修改稿日期: 2006-05-22

光系数, δ_0 是 SiO₂ 缓冲层产生的场衰减因子, Γ 是电光重叠积分因子, λ 为自由空间的波长, G 为电极间距。

1.2 波导的非线性折射率

LiNbO₃ 晶体可看成为各向同性媒质, 在光波中可以将极化强度表示为:

$$P(t) = \epsilon_0 \chi_1 E(t) + \epsilon_0 \chi_3 E^3(t) \quad (4)$$

式中, χ_1 和 χ_3 分别是介质的一阶和三阶电极化率张量, ϵ_0 为真空的介电常数, E 为电场强度。电位移则为:

$$D(t) = \epsilon_0 E(t) + P(t) =$$

$$\epsilon_0 [1 + \chi_1 + \chi_3 E^2] E(t) = \epsilon_0 n^2 E(t) \quad (5)$$

$$n = n_1 + n_2 E^2 \quad (6)$$

式中, n_1 是折射率的线性部分, 而 $n_2 E^2$ 是折射率的非线性部分。由 (6) 式可以看出, 光波导的折射率除了一个线性部分外, 还有一个与外加光强成正比的非线性修正项。

由于掺铋铌酸锂晶体具有非线性的折射率, 因而光波在传播过程中的相位变化必然也受到此非线性折射率的影响, 这是因为相位因子的变化与传播距离 d 之间的关系近似为:

$$\phi(d) = k_0 nd = k_0 (n_1 + n_2 E^2) d \quad (7)$$

式中, $k_0 = 2\pi/\lambda$, 为真空中波数。从 (7) 式中可知, 相位因子受到光强的调制, 这种现象称为自相位调制。

1.3 仿真算法

文中所采用的仿真算法是光束传播算法 (beam propagation method, BPM)。BPM 算法具有简单直观的特点, 能用于任意折射率分布波导结构的模拟分析, 而且在分析光场传输特性时, 能直观分析模场的分布、传输、畸变等特征。BPM 算法计算精度高, 速度快, 是目前大多数软件所采用对光场传播的算法。

BPM 算法实质上是对单色赫姆霍兹方程的数值求解。在三维坐标中赫姆霍兹方程如下表示:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + k(x, y, z)^2 \phi = 0 \quad (8)$$

式中, $k(x, y, z) = k_0 n(x, y, z)$ 。光场相位变化主要是由于光场 z 轴传播所致, 坐标变化近似有:

$$\phi(x, y, z) = u(x, y, z) \exp(ikz) \quad (9)$$

u 为电场复振幅的慢变化近似。引入参考波数 $\bar{k} = k_0 n_0$ 。将以上表达式带入 (8) 式中, 赫姆霍兹方程表达为:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + 2ik \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + (k - \bar{k}^2) u = 0 \quad (10)$$

假设 u 相对于 z 的变化并非很剧烈, 因此 $\partial^2 u / \partial z^2$ 可以忽略, 即做傍轴近似。据此, 赫姆霍兹方程变为:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{-i}{2k} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + (k - \bar{k}^2) \right] \quad (11)$$

(11) 式为三维空间中的 BPM 基本方程: 二维空间情

况下, 可以略去与 y 相关项。根据此方程, 给定输入场 $u(x, y, z=0)$, 光场在 $z > 0$ 空间中的分布就可以进行数值求解。

2 高功率 MgO:LiNbO₃ 调制器的设计仿真及结果分析

2.1 调制器的优化设计

调制器电极需要设计的参数如图 1 所示, G 表示

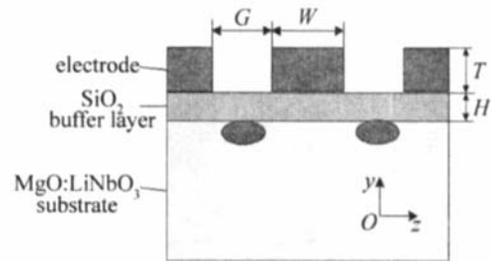


Fig 1 Cross-sectional view of MgO:LiNbO₃ waveguide modulator

电极间距, W 表示中央电极宽度, T 表示电极厚度, H 表示 SiO₂ 缓冲层厚度。电极设计时需要考虑微波和光波的相位速度匹配, 低微波损耗, 驱动源特性阻抗匹配, 低半波电压等。本文中采用准静态角变换原理优化设计出来的调制器的参数值, 如表 1 所示。

Table 1 The design value of modulator electrode

W	G	T	H	L	N_{eff}	Z	Δf	V
10 μm	15 μm	10 μm	2 μm	24000 μm	2.34	40.02 Ω	19.7GHz	4.5V

2.2 调制器的 BPM 仿真及结果分析

采用 BPM 算法^[10]对输入光场在所设计器件中的传播过程进行仿真, 当输入功率逐渐加大时, 可观察到明显的非线性效应。如从图 2 中可看出, 输入光功率为 45W 时, 光场在非线性介质 MgO:LiNbO₃ 传输过程中产生了自相位调制现象。自相位调制导致光信号在传输过程中产生附加的非线性相移, 使信号的频谱明显展宽。对于一个高斯脉冲, 最大频偏近似为^[11]:

$$\delta\omega_{\text{max}} = 0.86\phi_{\text{max}}/T_0 = 0.86\Delta\omega\phi_{\text{max}} \quad (12)$$

式中, $\Delta\omega = 1/T_0$ 是脉冲初始谱宽, T_0 是脉冲的初始宽度, ϕ_{max} 是当光脉冲在波导中传输距离 d 时, 其最大的非线性相位值。在传输距离较长、初始脉冲功率较大时, $\delta\omega$ 可以明显大于 $\Delta\omega$, 从而导致传输过程中信号频谱的展宽, 从图 2 中可以看出自相位调制导致高斯脉冲的频谱展宽的现象, 当传输距离 $d = 5\mu\text{m}$ 时, 信号的功率密度将分瓣。这种频谱的展宽对通信将产生显著的影响。在正常色散条件下, 自相位调制对光通信系统会严重制约系统的比特速率距离积。

图 3 描述了波导内传输功率密度的最大值和输入功率的关系, 从图中可以看出, 当输入功率小于 30W 时, 曲线的斜率逐渐增加, 输入功率大于 30W 时, 曲线

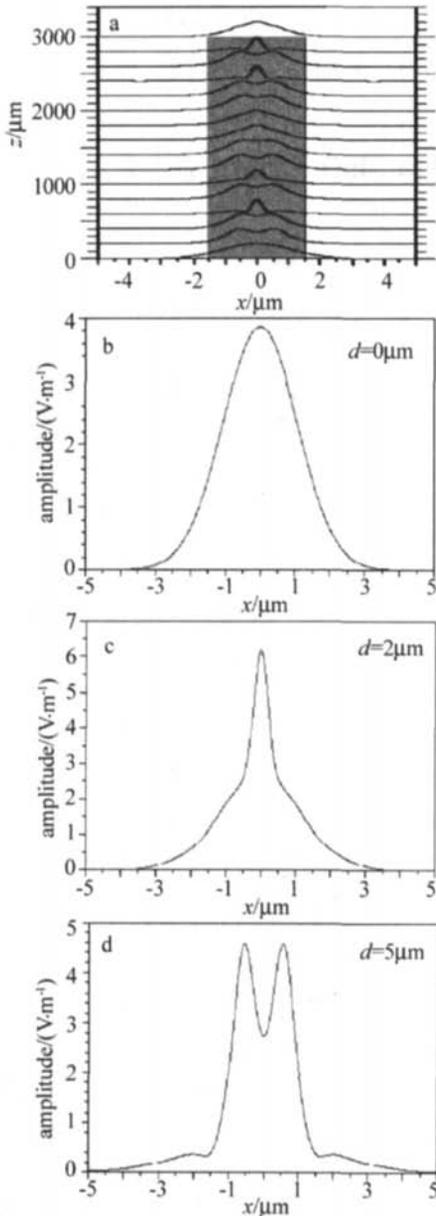


Fig 2 Nonlinear effect in waveguide at $P = 45W$

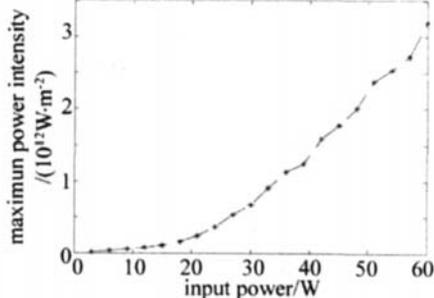


Fig 3 Relationship between the maximum power intensity in waveguide and input power

近似成直线。分析原因如下,波导中由于输入功率不同而影响功率密度的因素主要有两个,一个是由于非线性引起的自聚焦,另一个是波导宽度引起的衍射。输入功率小于 30W 时,光波在自聚焦作用较强,所以功率密度上升比较快;当输入功率大于 30W 时,自聚

焦和衍射相互平衡,功率密度曲线近似成线性。

仿真结果表明,当输入功率大于 200W 时,波导内最大功率密度达到 $10^4 MW/cm^2$ 量级,大于 $MgO:LiNbO_3$ 晶体的光损伤阈值,这时器件将发生局部光损伤。

大功率激光在 Y 分支波导中的传输过程见图 4。

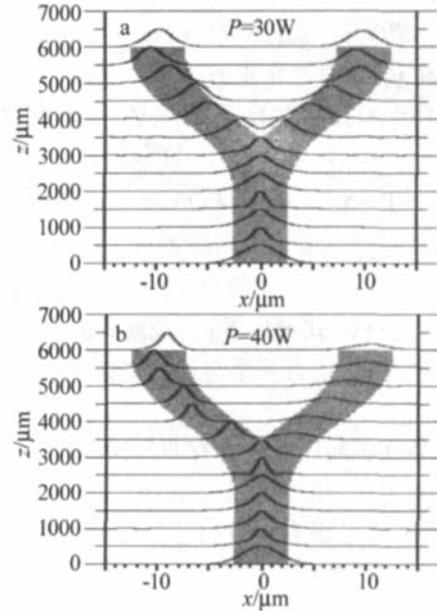


Fig 4 Propagation of high power laser in Y-branch waveguides

当输入功率较大时,非线性效应破坏了波导单模传输条件,此时 Y 波导不能正常传输光波,即将输入光波分成相等的两部分,出现 Y 分支光波不对称情况。这种非线性的破坏导致了输入功率较大时 ($P > 30W$),调制器已不能对输入光波起到调制的作用,见图 5。

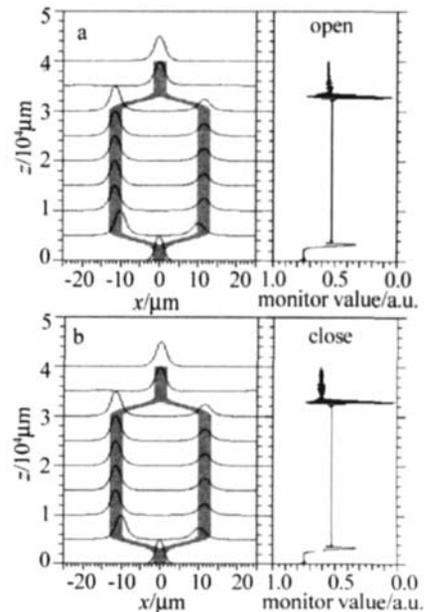


Fig 5 Propagation of high power laser in modulator ($P = 40W$)

图 6 为输入功率和消光比倒数的关系曲线图,从图中可以看出,当输入功率大于 25W 时,消光比大幅度下降,到 35W 时,已经趋近于 1。这说明输入电压大

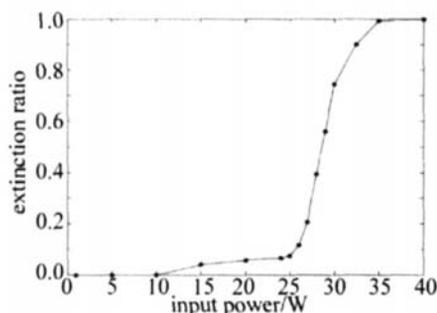


Fig 6 Relationship between input power and the reciprocal of extinction ratio

于 25W 时,调制器已经无法正常工作。因此器件保持正常工作情况下的最大输入功率为 25W。考虑器件的损耗小于 4dB,输出功率可达到 10W,完全可以达到空间光通信系统的需求。

3 结 论

设计了可对高功率激光进行高速调制的 MgO:LNbO₃ 波导集成外调制器。利用准静态角变原理对具有高光损伤阈值的 MgO:LNbO₃ 集成波导外调制器进行了电极优化设计,调制带宽可达到 12GHz。采用光束传播算法对高功率激光在 MgO:LNbO₃ 波导中的传播进行了仿真,利用仿真结果对非线性效应所带来的影响进行了分析,由分析可知,器件保持正常工作的条件下最大输入功率不应超过 25W。结果表明,MgO:LNbO₃ 波导调制器可实现大功率电光调制。该项研究对解决空间光通信系统中高速光调制的功率受限问题具有重要意义,并为惯性约束核聚变等需要高速大功率激光调制技术的应用领域提供了有益

的参考。

参 考 文 献

- [1] ZHONG G G, JIAN J, WU Zh K Measurement of optically induced refractive-index damage of lithium niobate doped with different concentration of MgO [A]. 11th international Quantum Electronics Conference [C]. New York: IEEE, 1980. 631.
- [2] ZHAO W, WANG K R, YU G X Optical damage of lithium niobate channel waveguide [J]. Chinese Journal of Laser, 1994, 21 (12): 940 ~944 (in Chinese).
- [3] GUO Y J, ZHOU Y X, ZHANG J *et al* Study on growth and photo-damage of Mg:Ln:Er:LNbO₃ crystal waveguide substrate [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2004, 33 (2): 197~200 (in Chinese).
- [4] BRYAN D A, GERSON R, TOMASCHKE H E Increased optical damage resistance in lithium niobate [J]. A P L, 1984, 44 (9): 847 ~849.
- [5] XU W Sh, XU Sh W, WANG R *et al* Investigation on photo-damage properties of Mg:Ln:LNbO₃ waveguide substrate [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2003, 31 (1): 5~8 (in Chinese).
- [6] VEYERES C, FOUAD V H Extension of the application of conformal mapping techniques to coplanar lines with finite dimensions [J]. International Journal of Electronics, 1980, 48 (1): 47~56.
- [7] HADLEY G R. Transparent boundary condition for the beam propagation method [J]. Opt Lett, 1991, 16 (9): 624.
- [8] CUI H J. Research on broadband LNbO₃ electrooptical modulators with integrated optical waveguides [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2003. 15~19 (in Chinese).
- [9] LEN B, CHUA T W. Ultra-broadband integrated interferometric optical modulators [A]. Proceeding of Workshop on Applied Radio Science [C]. Australia: Monash University, 2002. 20~22.
- [10] GAN X Y, LU Y Zh, LAO J K SEM-BPM simulation for waveguide modulators [J]. Laser Technology, 2003, 27 (5): 431~433 (in Chinese).
- [11] LI Y Q, CUI M. The theory and technology of optical waveguide [M]. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 2002. 203~207 (in Chinese)

(上接第 234 页)

配方式的选择上都有一定的要求。根据抽运光功率密度的大小以及能量比,选择合适长度的晶体,可以使得和频转换效率尽可能地提高。由文献 [1] 和表 1 可知, LBO I 类匹配和 KTP II A 类匹配无论是在有效和频系数,还是在允许参量范围上,都比其它几种匹配方式高,因此,在室温下利用 KTP 和 LBO 对波长 1320nm 与 1064nm 激光进行和频时,应优先考虑采用这两种匹配方式进行和频。另外, LBO 在 32~84℃ 能到达温度匹配,增加温度调节装置,也可考虑采用此种匹配方式。

参 考 文 献

- [1] CHAO L, YUAN X, ZHU Ch H *et al* Phase-matching characteristics of 589 nm radiation generated by SFG with double-axis crystals [J]. Laser Technology, 2005, 29 (5): 459~461 (in Chinese).
- [2] ARMSTRONG J A, BLOEMBERGEN N, DUCUNG J *et al* Interactions between light waves in a nonlinear dielectric [J]. Phys Rev, 1962, 127 (6): 1918~1939.
- [3] FAN Q K, WU C K, MAO Sh Q. Nonlinear optics [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1989. 5~7 (in Chinese).
- [4] LI G, HAO H L. The influence of crystal length for the efficiency of second harmonic [J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 1992, 18 (1): 73~76 (in Chinese).
- [5] YAO J Q, SHENG W D, SHI W Q. Accurate calculation of the optimum phase-matching parameters in three-wave interactions with biaxial nonlinear optical crystals [J]. J O S A, 1992, 9 (6): 891~902.
- [6] MANN G, SEDEL S, WEBER H. Influence of mechanical stress on the conversion efficiency of KTP and LBO [J]. Proc SPIE, 1999, 3823: 289~297.
- [7] KATO K. Temperature-tuned 90° phase-matching properties of LiB₃O₅ [J]. IEEE J Q E, 1994, 30 (12): 2950~2952.
- [8] MOORE G T. Resonant sum-frequency generation [J]. IEEE J Q E, 2002, 38 (1): 12~18.
- [9] LI Ch Y, WANG Y G, HUANG L *et al* Frequency-doubling study of noncritical phase-matched LBO crystal [J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2003, 29 (2): 221~224 (in Chinese).