

有机无机杂化型共面波导行波电极电光调制器

高 磊 高伟男 邓 玲 闫云飞 孙小强 张大明

(吉林大学电子科学与工程学院 集成光电子国家联合重点实验室(吉林大学), 吉林 长春 130012)

摘要 针对有机无机杂化的电光材料设计了单模加载条形的波导结构,模拟了这种结构中光场的分布,制作了直波导,测得其传输损耗为 2.0 dB/cm;采用这种加载条形的波导结构设计了马赫-曾德尔干涉型(MZI)电光调制器,通过对 MZI 结构相互作用区的优化选择,相互作用区两波导间距为 30 μm ,长度为 15000 μm ;通过分析共面波导型行波电极的中心电极宽度及中心电极与地电极间距对特性阻抗、重叠积分因子以及半波电压的影响,得出中心电极宽度 9 μm ,中心电极与地电极间距 5 μm 时,器件半波电压最低,为 8.4 V。器件制作完成后对其进行测试得出了线性调制曲线,并测得半波电压为 9.0 V,与理论值基本符合。

关键词 电光调制器; 共面波导行波电极; 有机无机杂化; 加载条形波导

中图分类号 TN25 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092912.3511

Organic-Inorganic Hybrid Modulator with Coplanar Waveguide Electrode

Gao Lei Gao Weinan Deng Ling Yan Yunfei Sun Xiaoqiang Zhang Daming

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China)

Abstract A strip-loading waveguide structure was designed with organic-inorganic hybrid material, and its optical field was simulated. A straight waveguide was fabricated and its transmission loss was tested to be 2.0 dB/cm. A Mach-Zehnder interference (MZI) modulator was designed with this structure. By optimization, the distance between the two waveguides in the interaction region was selected to be 30 μm and the length to be 15000 μm . The center electrode width and the gap of coplanar waveguide (CPW) electrode were analyzed to make sure their influence to characteristic impedance, overlap integral factor and half wave voltage. By optimization when the center electrode width was selected to be 9 μm and gap to be 5 μm , the minimum half wave voltage of the modulator is 8.4 V. The device was successfully fabricated and tested. A linear modulating curve was obtained. The half wave voltage in the test was 9.0 V. It agreed with the theoretical value.

Key words electro-optic modulator; coplanar waveguide(CPW); organic-inorganic hybrid; strip-loading waveguide

1 引 言

当今人类正处于一个信息时代,在这个信息社会里,信息渗透于工农业生产、商业活动、医疗卫生、国防军事、政治以及人们日常生活的各个方面。在空间科学、现代防御体系、生命科学、遥感及管理科学等领域中都拥有大量的科学信息需要在有限的时间、空间、甚至实时地进行准确处理。因此信息技术已经成为当代科学技术的核心。信息技术的支撑学科是电子学和光学。光电子学则是由电子学和光学交叉形成的新兴学科,对信息技术的发展起着至关重要的作用。

光调制器是光通信的关键部件,是近年来通信领

收稿日期: 2008-12-24; 收到修改稿日期: 2009-03-26

基金项目: 国家 973 计划(2006CB302803)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NECT-05-0307)资助课题。

作者简介: 高 磊(1983—),男,博士研究生,主要从事集成光学方面的研究。E-mail: leonoler@gmail.com

导师简介: 张大明(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事集成光学、高速光电子学等方面的研究。

E-mail: zhangdm@mail.jlu.edu.cn(通信联系人)

域的研究热点^[1~9]。光调制器可以实现信息由光传输,在光网络中有许多应用,是光通信、光信息处理等光信息系统的核心器件之一。电光调制器的基本原理是利用材料的电光效应,通过加电场使材料折射率改变从而对光产生调制作用,这样就可以将信号加载到光信号上实现光通信。电光调制器材料的选择是其性能优劣的关键,由于有机无机杂化材料具有电光系数高、稳定性好等优点,近年来越来越受到人们的关注。本文就是采用有机无机杂化材料作为电光材料,采用了一种加载条形的波导结构,设计并制作出电光调制器,测试观察到线性调制现象。

2 加载条形结构波导的设计、制作与测试

设计时选择光通信波长 $1.55 \mu\text{m}$ 。实验中采用的电光材料是自主研发的一种有机无机杂化材料^[10,11],它是在二氧化硅(SiO_2)的三维网络结构中嵌入生色团 DR1,其折射率 1.650。极化后通过简单反射法测量其电光系数约为 80 pm/V 。通过一系列实验发现这种材料旋涂在 SiO_2 衬底上时,有很好的成膜性,但是薄膜的厚度只有 $0.5 \mu\text{m}$ 左右,单独用这种材料作为波导芯层很难形成通光良好的波导,所以设计了如图 1(a)所示的加载条形结构的波导:下包层选用 SiO_2 ,其折射率 1.450,芯层用 [PMMA+GMA+环氧树脂],折射率 1.495,上包层采用 [PMMA+GMA],折射率 1.483。

为了实现单模传输,经计算选择波导的参数为:下包层厚度 $2.0 \mu\text{m}$;杂化材料层厚度 $0.5 \mu\text{m}$;加载条形宽度 $4 \mu\text{m}$,厚度 $3 \mu\text{m}$;上包层厚度 $2.5 \mu\text{m}$ 。对

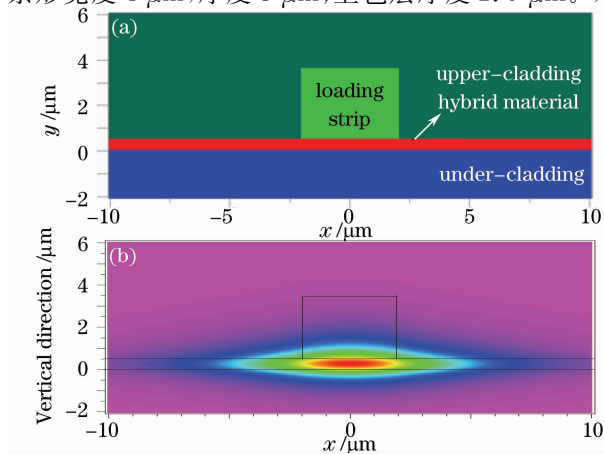


图 1 加载条形波导结构(a)及其光场分布(b)

Fig. 1 Strip-loading waveguide (a) and its optical field distribution (b)

这一结构进行模拟^[12~14],折射率以及光场分布如图 1(b)所示,光场越往杂化材料层加载区域中集中,即电极的积分重叠因子就越大,从而半波电压就越小。从图 1(b)可以看出,这种结构光场大部分集中在这个区域。

制作成功的直波导通光测试所得的近场输出光斑(输入光波长 1550 nm ,功率 0.2 mW)如图 2 所示,通过截断法测试这种波导的传输损耗约为 2.0 dB/cm 。

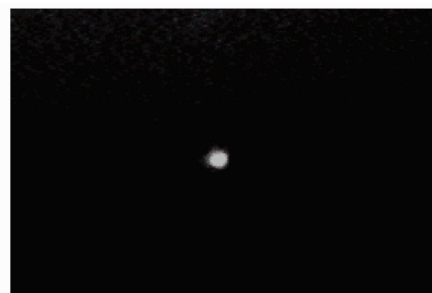


图 2 加载条形波导通光测试的近场输出光斑

Fig. 2 Near-field profile of the strip-loading waveguide

3 调制器的设计制作与测试

采用前面设计的加载条形的波导结构设计马赫-曾德尔干涉型(MZI)电光调制器,这种结构的特点是相互作用区的长度越长半波电压会越低,基于对器件尺寸的要求,本实验选择相互作用区长度是 $15000 \mu\text{m}$ 。相互作用区两波导间距应该保证这两波导之间不能发生耦合,通过计算模拟并且结合制作过程中工艺误差,选择两波导间距为 $30 \mu\text{m}$ 。

调制器的电极采用共面波导型行波电极^[15,16](CPW),中心电极宽度为 W ,中心电极与地电极间距为 G 。调制器半波电压的计算公式为

$$V_{\pi} = \frac{\lambda_0}{n_0^3 \gamma_{33}} \frac{G}{\Gamma L}, \quad (1)$$

其中 λ_0 是光波在自由空间中的波长, n_0 是光波导的光等效折射率, γ_{33} 是聚合物材料的电光系数(通常只有芯层材料才具有 γ_{33}), L 是光传播方向上的相互作用区长度, Γ 是重叠积分因子。

$$\Gamma = \frac{G}{U} \frac{\iint_{x,y} E_c(x,y) \cdot |E_0(x,y)|^2 dx dy}{\iint_{x,y} |E_0(x,y)|^2 dx dy}, \quad (2)$$

其中 U 是电极上所加的电位差, $E_0(x,y)$ 是波导中归一化的光场分布函数, $E_c(x,y)$ 是电极产生的电场分布函数为

$$\begin{aligned}
 E_x &= -\frac{U}{K'} \operatorname{Im} \frac{dw}{dz}, \\
 E_y &= -\sqrt{\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}} \frac{U}{K'} \operatorname{Re} \frac{dw}{dz}, \\
 \frac{dw}{dz} &= \frac{h}{\sqrt{(h^2 - k^2 z^2)(h^2 - z^2)}}, \quad (3)
 \end{aligned}$$

其中 $k = W/(W + 2G)$, $h = W/2$, $K' = K(k')$, $k'^2 = 1 - k^2$, K 为完全椭圆积分。调制器 G 和 W 变化, 重叠积分因子就变化, 从而调制器的半波电压也发生变化, 通过计算得出了重叠积分因子和半波电压随 G 的变化(这时候 W 也随 G 而变化使得 $Z = 50\Omega$), 重叠积分因子及半波电压的变化曲线如图 3 所示。从该图中可以看出, 重叠积分因子随着 G 变大有一个极大值, 而半波电压随 G 的变大先变小后变大。在 $G = 5 \mu\text{m}$, $W = 9 \mu\text{m}$ 时半波电压最小, 这个时候半波电压 $V_\pi = 8.4 \text{ V}$ 。

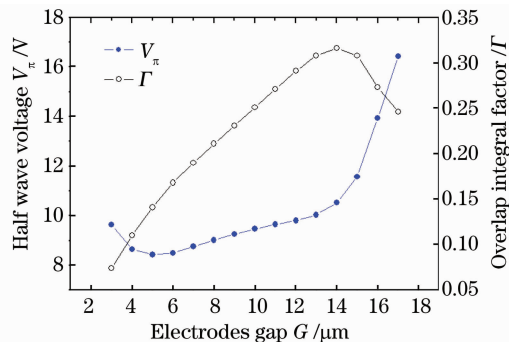


图 3 CPW 中心电极-地电极间距 G 对重叠积分因子和半波电压的影响

Fig. 3 Influences of CPW gap between center and ground electrodes G to overlap integral factor and half wave voltage

调制器制作完成后对其进行测试, 输入 1 kHz 的正弦交流信号, 然后加上合适的直流偏置使器件工作在线性工作区后, 器件能够实现信号的线性调制, 图 4 是示波器上显示的输入信号和调制信号的

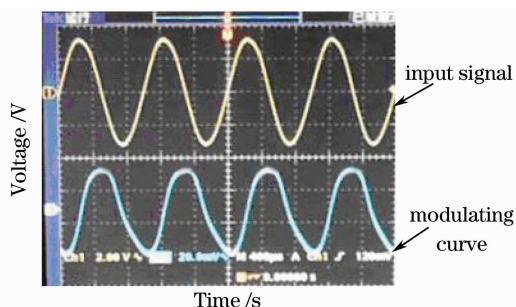


图 4 输入正弦交流信号的线性调制曲线

Fig. 4 Linear modulating curve of input sine wave AC signal

对比, 其中上面的波形是输入信号, 下面是调制信号, 可以看出这时调制信号对输入信号的线性调制。通过测试发现器件的半波电压是 9.0 V。这个结果与设计值 8.4 V 相差 7.1%, 可以认为在误差许可的范围之内。

4 结 论

采用有机无机杂化材料作为电光材料设计了加载条形的单模波导结构, 模拟了这种结构中光场的分布, 制作出加载条形的直波导测试通光, 并用截断法测得其传输损耗为 2.0 dB/cm。利用这种波导结构设计了 MZI 电光调制器, 通过一系列的优化设计, 选择波导相互作用区长度为 15000 μm , 相互作用区两波导间距为 30 μm ; CPW 行波电极中心电极宽度 9 μm , 中心电极与地电极间距 5 μm 时计算得出的半波电压为 8.4 V; 通过对制作出来的器件加上交流正弦信号测试, 观察到线性调制曲线, 测得器件的半波电压为 9.0 V, 与理论值基本符合。

参 考 文 献

- 1 Y. Enami, G. Meredith, N. Peyghambarian *et al.*. Hybrid electro-optic polymer/sol-gel waveguide modulator fabricated by all-wet etching process[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(23): 4692~4694
- 2 Y. Enami, C. T. DeRose, C. Loychik *et al.*. Low half-wave voltage and high electro-optic effect in hybrid polymer/sol-gel waveguide modulators[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**: 143506
- 3 A. Muraro, A. Passaro, N. M. Abe *et al.*. Design of electrooptic modulators using a multiobjective optimization approach [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26** (16): 2969~2976
- 4 Wang Wenshen, Chen Datong, H. R. Fetterman *et al.*. 40-GHz polymer electrooptic phase modulators [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1995, **7**(6): 638~640
- 5 C. T. DeRose, D. Mathine, Y. Enami *et al.*. Electro-optic polymer waveguide modulators with refractive index tapers leading to low coupling loss and a high confinement factor[C]. 2008 *Conference on Lasers and Electro-Optics & Quantum Electronics and Laser Science Conference*, 2008, 1-9: 1656~1657
- 6 K. Aoki, A. Ide, J. Kondo *et al.*. Low half-wave voltage X-cut thin LiNbO₃ sheet optical phase modulator with asymmetric coplanar waveguide electrode [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2008, **20**(21): 1811~1813
- 7 B. M. A. Rahman, S. Haxha, S. S. A. Obayya *et al.*. Design issues for high-speed electrooptic modulators [C]. *Active and Passive Optical Components for WDM Communications III Proc. SPIE*, 2003, **5246**: 287~298
- 8 H. Murata, Y. Okamura. Electrooptic modulator with polarization reversal and its application [C]. 2006 *IEEE LEOS Annual Meeting*, 2006. 340~341
- 9 S. Reem, H. S. William. Overlap integral factor enhancement using buried electrode structure in polymer Mach-Zehnder modulator[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(3): 031103
- 10 Gao Weinan, Tian Meiqiang, Sun Ciqiang *et al.*. A strip-

- loading optical waveguide using well poled stability organic/inorganic hybrid materials[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(3): 034205
- 11 Sun Jie, Zhu Guihua, Sun Xiaoqiang *et al.*. High cost performance organic-inorganic hybrid material for electro-optic devices[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(2): 024206
- 12 Liao Jinkun, Tang Xiongguo, Lu Rongguo *et al.*. Variational effective index analysis of polymer rib optical waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2267~2271
廖进昆, 唐雄贵, 陆荣国等. 聚合物脊形光波导的变分有效折射率法分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2267~2271
- 13 Xu Jianfeng, Bo Zhongyang, Bai Jian *et al.*. Synthetic subdomain method for large-scale integrated optical waveguide FDTD simulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 5~9
徐建锋, 薄中阳, 白 剑等. 大规模集成光波导时域有限元差分法仿真的子域合成法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 5~9
- 14 Zhang Yali, Zhang Tao, Zhu Ninghua *et al.*. Variational analysis of buried-ion-exchanged optical waveguide by using Hermite-Gaussian field approximations[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 981~986
张雅丽, 张 韬, 祝宁华等. 掩埋型离子交换玻璃光波导的变分分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 981~986
- 15 C. M. Kim, R. V. Ramaswamy. Overlap integral factors in integrated optics modulators and switches [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(7): 1063~1070
- 16 Akira Enokihara, Hiroyoshi Yajima, Hiroshi Murata. Guided-wave electro-optic modulators using novel electrode structure of coupled microstrip line resonator[J]. *IEICE Trans Electronics*, 2005, **E88-C**(3): 372~378