

阵列集成光波导应用于光学相控阵中的理论分析

杨登才^{1,2}, 杨作运^{1,2}, 王大勇^{1,2}

(1. 北京工业大学 微纳信息光子技术研究所, 北京 100124;

2. 北京工业大学 应用数理学院, 北京 100124)

摘要: 基于光学相控阵理论和钛扩散铌酸锂光波导的导模特性, 提出了一种新型阵列集成光波导应用于光学相控。根据光束传输法(BPM), 并结合现有半导体工艺水平及参数, 对该阵列波导的导光特性, 损耗特性以及耦合特性进行了仿真计算, 最终给出了相控阵的结构设计参数。结果表明, 应用该集成阵列波导的光学相控阵结构可实现光束连续精确定向偏转, 偏转角度可达 $\pm 4.5^\circ$, 相位控制半波电压小于 6 V, 其系统光学控制单元损耗低且响应速度快。

关键词: 光学相控阵; 光波导; 半波电压; 扫描角

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)08-1997-06

Theoretical analysis on array of integrated optical waveguides applied in laser-phased-array system

Yang Dengcai^{1,2}, Yang Zuoyun^{1,2}, Wang Dayong^{1,2}

(1. Institute of Information Photonics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Collage of Applied Science, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Based on the theory of the optical phased array (OPA) and behavior of the mode propagation in Ti-diffused Lithium Niobate (Ti-LiNbO_3) waveguide, a novel array of integrated optical waveguides applied in OPA system was proposed. According to the beam propagation method (BPM) and the existing semiconductor technology and parameters, optical characteristics of the waveguide array, loss characteristics, and coupling characteristics were simulated. The structure of phased array parameters was presented. Simulation result shows that the OPA based on the array of integrated optical waveguides performs well. This array of integrated optical waveguides can steer consequently and precisely with the steering angle of more than $\pm 4.5^\circ$. The half-wave voltage is less than 6 V, and the control unit has low loss and quick response.

Key words: optical phased array; optical waveguide; half-voltage; steering angle

收稿日期: 2013-01-24; 修订日期: 2013-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(61077004, 61205010); 北京市自然科学基金(1122004); 北京市教育委员会科技发展计划重点项目和北京市自然科学基金重点项目(B类)(KZ200910005001); 服务北京创新人才、团队建设项目

作者简介: 杨登才(1978-), 男, 博士生, 主要从事激光相控阵技术方面的研究工作。Email: dengcaiyang@bjut.edu.cn

导师简介: 王大勇(1968-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光学信息处理和光通信方面的研究工作。Email: wdyong@bjut.edu.cn

0 引言

光学相控阵是基于微波相控阵理论发展起来的新型光束指向控制技术。其核心部件之一是光学相位控制器件,近年来被广泛研究的主要有采用压电陶瓷型的光纤延迟线^[1]、液晶阵列移相器^[2]、波导型电光移相器^[3]等。随着半导体工艺的不断发 展,以电光晶体作为相位控制器件日趋成熟,该器件是利用电光晶体的双折射效应,通过改变加载在不同单元电压实现相位控制,具有快速、灵活、高精度等优点^[4],是当前研究的热点。在光学相控阵中,通过控制相邻光束的相位差就可以实现合成光束定向偏转。目前,国内外常见的光学相控阵均基于规则相控阵理论,而相控阵中单元间距限制了扫描范围和扫描精度,为了缩小相控阵单元间距,基于不同材料和结构的波导型相控阵不断被提出和证实^[3,5]。这种方法虽然有效地提高了占空比,但是相邻单元间的串扰却影响了扫描精度。

文中基于光学相控阵理论,设计了一种阵列集成光波导相位控制器件,并将其应用于光学相控阵,构成一种新型的阵列集成光波导光学相控阵。由于该相控阵结构采用集成光学技术将相位控制单元阵列和输出单元阵列集成在一片铌酸锂晶体上,可以有效减小相控阵单元间距,提高占空比,从而提高输出光束质量,扩大扫描范围和 提高扫描精度。基于目前较成熟的钛扩散铌酸锂波导制作工艺和集成光学技术,该相控阵还可以实现单元间的互不串扰。在此基础上,对其进行了理论分析和数值仿真模拟,结果显示该相控阵系统具有体积小、响应速度快、工作半波电压低、偏转角度可精确控制等优点,有望用于激光雷达、激光打印和空间光通信等领域。

1 钛扩散铌酸锂波导的相关理论

1.1 折射率截面

钛扩散铌酸锂光波导结构如图 1 所示,其折射率具有高斯型分布的特征,与初始钛条宽度和厚度、扩散温度、扩散时间均有关。

根据钛扩散理论^[6-7],在 Y 和 Z 方向上钛离子浓

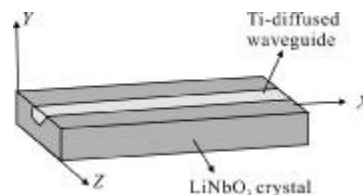


图 1 钛扩散铌酸锂光波导结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of Ti-LiNbO₃ waveguide

度分布为:

$$C(y,z)=C_0f(y)g(z) \quad (1)$$

其中

$$f(y)=\exp\left[-\left(\frac{y}{D_y}\right)^2\right] \quad (2)$$

$$g(z)=\frac{1}{2}\left\{\operatorname{erf}\left[\frac{W}{2D_z}\left(1+\frac{2z}{W}\right)\right]+\operatorname{erf}\left[\frac{W}{2D_z}\left(1-\frac{2z}{W}\right)\right]\right\} \quad (3)$$

式中: D_y 、 D_z 分别为 Y、Z 方向的扩散深度; W 为扩散前钛条的宽度。 C_0 表示单位体积内钛离子数:

$$C_0=\frac{2N_AAD}{\sqrt{\pi}D_y} \quad (4)$$

式中: $A=5.67\times 10^{22}\text{ mol}/\mu\text{m}^3$; D 为扩散前钛条厚度。

波导中, o 光和 e 光折射率分布与入射光波长及钛离子扩散浓度有关,钛离子浓度扩散导致折射率变化为:

$$\delta n_e(\lambda,C(y,z))=d_e(\lambda)f_e(C(y,z)) \quad (5)$$

$$\delta n_o(\lambda,C(y,z))=d_o(\lambda)f_o(C(y,z)) \quad (6)$$

根据参考文献[6],有

$$d_e(\lambda)=\frac{0.839(\lambda/\mu\text{m})^2}{(\lambda/\mu\text{m})^2-0.0645} \quad (7)$$

$$d_o(\lambda)=\frac{0.67(\lambda/\mu\text{m})^2}{(\lambda/\mu\text{m})^2-0.13} \quad (8)$$

$$f_e(C(y,z))=F_eC(y,z) \quad (9)$$

$$f_o(C(y,z))=[F_oC(y,z)]^\gamma \quad (10)$$

式中: $F_e=1.2\times 10^{-23}\text{ cm}^3$; $F_o=1.3\times 10^{-25}\text{ cm}^3$; $\gamma=0.55$ 。因此当 λ 一定时,扩散后折射率分布为:

$$n_e(y,z)=nb_e+\delta n_e(y,z) \quad (11)$$

$$n_o(y,z)=nb_o+\delta n_o(y,z) \quad (12)$$

常温下(25℃), $nb_e=2.1373$, $nb_o=2.2128$ ^[8]。

根据以上理论,用 MATLAB 模拟了钛条宽度为 $6\mu\text{m}$,钛条厚度为 110 nm (单模传输),在 1050°C 下扩散 7 h ,工作波长为 1550 nm 时 o 光和 e 光的折射率分布,分别如图 2(a)、2(b)所示。

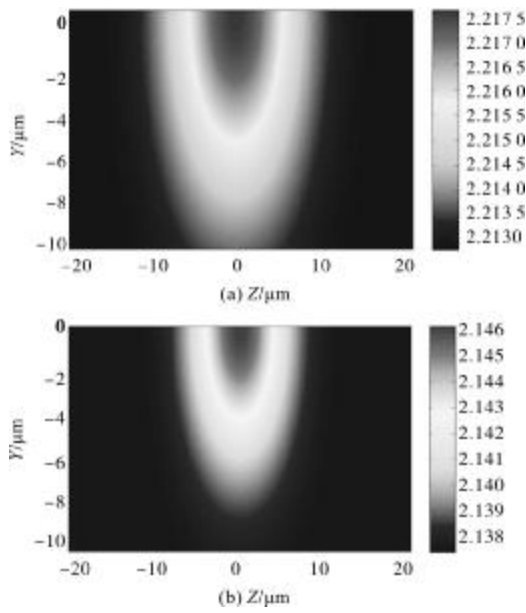


图 2 钛扩散铌酸锂光波导折射率截面

Fig.2 Refractive index distribution in cross-section of Ti:LiNbO₃ waveguide

1.2 光束传输法(BPM)与波动方程

光束传输法(BPM)是一种简单、高效、灵活性好的光波场数值模拟方法,它从单色光波的波动方程出发,引入所谓的缓变场,将沿传播方向的平均相位变化作为因子提出到所求方程外,并作一定的近似,通过常规数值方法(如有限差分法)对方程求解得到结果^[9]。该方法可以有效、准确地分析光在波导中的传输特性。

对于光波场:

$$E(x,y,z,t) = \phi(x,y,z)e^{-i\omega t} \quad (13)$$

其亥姆霍兹方程为:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + k_0^2 n(x,y,z)^2 \phi = 0 \quad (14)$$

式中: $k_0=2\pi/\lambda$,为自由空间波数; $n(x,y,z)$ 为空间折射率分布。当光场振幅沿传输方向缓慢变化时,可以将场分布写为:

$$\phi(x,y,z)e^{-i\omega t} = u(x,y,z)e^{ikz} \quad (15)$$

式中: $\bar{k} = nk_0$ 为参考波数; \bar{n} 为参考折射率。因此,亥姆霍兹方程可写为:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + 2i\bar{k} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \left[k_0^2 n(x,y,z)^2 - \bar{k}^2 \right] u = 0 \quad (16)$$

当光场沿 Z 轴传播时,可得到近轴 BPM 的基本

方程:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{i}{2\bar{k}} \left\{ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \left[k_0^2 n(x,y,z)^2 - \bar{k}^2 \right] u \right\} \quad (17)$$

根据公式(17),只要给定输入场 $u(x,y,z)$ 和折射率分布 $n(x,y,z)$,利用数值模拟即可得到空间 (x,y,z) 处的光场分布。这是研究阵列集成光波导光学相控阵中光的传播特性的理论基础。

2 阵列集成光波导相控阵结构设计原理

根据以上理论,文中提出如图 3 所示的阵列集成光波导相控阵结构,它可以分为三部分:相位控制单元、过渡区、输出阵列单元。四路具有等相位的相干光束经过相位控制单元产生恒等相位差,经过过渡区后到达输出阵列,阵列单元间距可达十几微米,与普通单模光纤阵列相比占空比提高了约 10 倍。根据相控阵理论,经输出阵列输出后,四路具有恒等相位差的光束在自由空间相干合成,实现光束定向偏转和扫描。

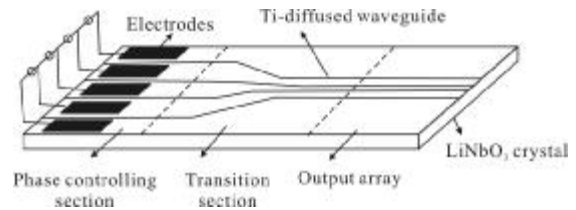


图 3 阵列集成光波导光学相控阵结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of optical phased array based on integrated optical waveguides

2.1 相位控制单元

利用铌酸锂晶体的电光效应,采用钛扩散工艺在铌酸锂基片上制作条形波导,在波导两侧镀上共面金属电极,为了减小金属电极对光的吸收,使电极的微波有效折射率可调节,需在波导与电极之间制作一层 SiO₂ 缓冲层^[10]。在外加电场作用下, LiNbO₃ 晶体产生电光效应,光的折射率发生变化,实现光的相位调制。通常希望相位调制具有较低的半波电压。

为了利用铌酸锂的最大电光系数,选择 Y 切 X 传方式,当在 Z 轴方向施加电场 E 后,沿 Z 轴偏振的光的折射率发生变化,为:

$$\delta n = \frac{1}{2} n_e^3 \gamma_{33} E_z \quad (18)$$

式中: n_e 为铌酸锂晶体中 e 光折射率; γ_{33} 为铌酸锂晶体的最大电光系数; E_z 为 Z 轴方向施加的电场强度。

折射率变化引起得相位延迟为:

$$\Delta\varphi_{TE} = \frac{\pi}{\lambda} n_e^3 \gamma_{33} E_z L = \frac{V\pi}{\lambda d} n_e^3 \gamma_{33} L \quad (19)$$

式中: λ 为输入光的波长; L 为电场区长度(即电极长度); V 为晶体两端所加电压; d 为电场区宽度(即电极间距)。

通常定义相位延迟 π 所需的电压为半波电压, 考虑到实际钛扩散铌酸锂波导相位调制单元制作工艺, 半波电压为^[11]:

$$V_{\pi} = \frac{\lambda d}{n_e^3 \gamma^3 \Gamma L} \quad (20)$$

式中: Γ 为电光重叠系数。

2.2 过渡区

为了获得较小的输出阵列单元间距, 提高占空比, 需从相位调制单元过渡到输出阵列区, 过渡区的波导是弯曲的, 需考虑弯曲损耗, 弯曲损耗包括两部分: 纯弯曲损耗 (pure bending loss) 和过渡损耗 (transition loss), 前者与波导的弯曲半径有关, 后者与曲率半径不连续变化有关, 若弯曲结构函数的一阶和二阶导数均连续则可使过渡损耗减至最小为零。纯弯曲损耗表达式为:

$$\alpha_R = \int \alpha(R) dx \quad (21)$$

式中: $\alpha(R)$ 为弯曲损耗系数。其表达式为:

$$\alpha(R)_{dx} = C e^{-C_0 R} \quad (22)$$

式中: R 为弯曲段的曲率半径; C 、 C_0 与 R 无关, 由相应的直波导决定^[12]。对于相同的参数的波导, 弯曲损耗只与曲率半径有关, 曲率半径越大, 损耗越小。

弯曲波导中常用上升余弦函数曲线, 其表达式为:

$$y(x) = H \left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{L} x\right) \right] \quad (23)$$

式中: L 为弯曲段水平长度; H 为上升高度。

$$R(x) = \frac{\left\{ 1 + \left[\frac{\pi H}{2L} \sin\left(\frac{\pi}{L} x\right) \right]^2 \right\}^{3/2}}{\left| \frac{\pi H}{2L^2} \cos\left(\frac{\pi}{L} x\right) \right|} \quad (24)$$

由公式(24)可知, 当 H/L 越大、 L^2/H 越大时, 曲率半径越大, 弯曲损耗越小。实验研究表明, 当 $L^2/H \geq 1\ 000$ 时, 弯曲损耗可以忽略不计^[13]。

2.3 输出单元阵列

输出单元阵列将经相位调制过的四路光束重新

排列, 在排列时需考虑波导间的串扰, 它会使各波导中的光束性质发生改变, 如相位和能量, 各路光束不再具有恒等相位差, 影响了扫描精度。因此, 为了避免输出单元间的串扰及尽可能提高占空比, 必须要选择合适的单元间距。

对于理想的两个平面波导, 仅考虑单模条件, 其耦合波方程为:

$$\frac{d\alpha_1(z)}{dz} = -i\beta_1 \alpha_1(z) + ik_{21} \alpha_2(z) \quad (25)$$

$$\frac{d\alpha_2(z)}{dz} = -i\beta_2 \alpha_2(z) + ik_{12} \alpha_1(z) \quad (26)$$

式中: $d\alpha_1(z)/dz$ 、 $d\alpha_2(z)/dz$ 分别表示两波导耦合模式间因功率交换而引起的幅度沿轴向的变化; β_1 、 β_2 分别为光场在两波导中的传播常数; k_{21} 、 k_{12} 为两波导光波模式间的耦合系数。利用边界条件求解该微分方程, 便可得到两波导中光波模式的幅度。

对于钛扩散铌酸锂波导, 边界条件较复杂, 可以借助光束传输法(BPM)进行数值模拟分析。选取的波导参数为: 钛条宽 $6\ \mu\text{m}$; 厚度 $110\ \text{nm}$; 在 $1\ 050\ ^\circ\text{C}$ 下扩散 $7\ \text{h}$; 工作波长 $1\ 550\ \text{nm}$ 。对两波导中心间距不同的情况进行模拟。

在模拟时定义了两个直波导: 波导 1 为干扰波导, 波导 2 为主波导, 在波导 2 中输入高斯光场, 同时监视波导 1 中的光功率变化, 从而观察两波导间的耦合情况。分别对两波导间距为 $10\ \mu\text{m}$ 、 $11\ \mu\text{m}$ 、 \dots 、 $20\ \mu\text{m}$ 进行了模拟, 共得到 11 幅模拟图, 图 4(a)、4(b)给出了波导间距分别为 $15\ \mu\text{m}$ 和 $20\ \mu\text{m}$ 的模拟

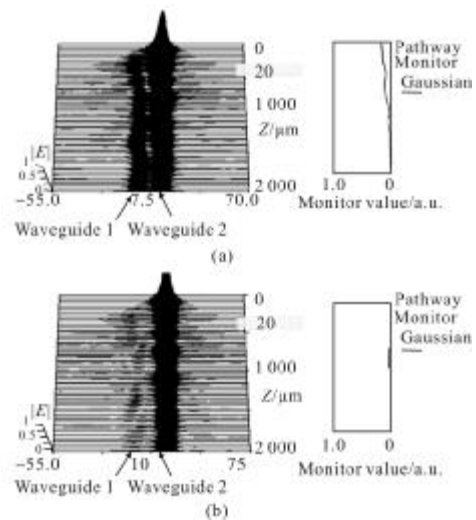


图 4 两波导间耦合模拟

Fig.4 Simulation of the coupling between two waveguides

图。通过对模拟结果的分析可知,当波导中心间距小于 $20\ \mu\text{m}$ 时,波导 1 中的光功率有明显变化,即波导间会发生明显串扰。

3 结构参数设计与仿真

基于上述理论分析和 BPM 数值模拟,综合考虑器件尺寸和目前的工艺水平,给出了四路阵列集成光波导光学相控阵的结构参数,并模拟了光在该阵列集成光波导中的传输特性。

为了实现单模、低损耗传输,对于波长为 $1550\ \text{nm}$ 的光,根据钛扩散工艺经验选择工艺参数:钛条宽度 $6\ \mu\text{m}$;厚度 $110\ \text{nm}$;在 $1050\ ^\circ\text{C}$ 下扩散 $7\ \text{h}$ 。

半波电压是该器件的重要参数,根据公式(20),要得到较低的半波电压,制作电极长度为 $5000\ \mu\text{m}$,电极间距为 $6\ \mu\text{m}$,由公式(20)可得到理论半波电压约为 $6\ \text{V}$ 。

考虑到过渡区的弯曲损耗、输出单元的占空比以及单元间的串扰问题,过渡区采用上升余弦曲线弯曲波导,长度为 $20\ 000\ \mu\text{m}$;输出阵列单元中心间距为 $20\ \mu\text{m}$ 。图 5 为阵列集成光波导光学相控阵整体结构参数示意图。

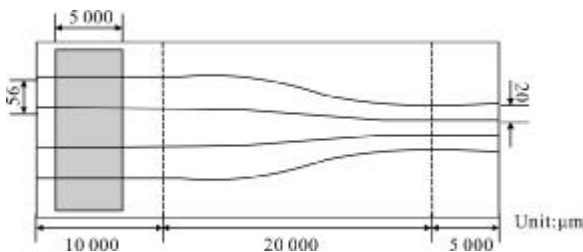


图 5 阵列集成光波导光学相控阵结构参数图
Fig.5 Structural parameters for optical phased array based on integrated optical waveguides

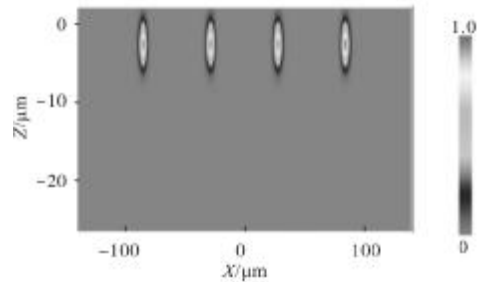
最后,对光在该阵列集成光波导中的传输进行仿真模拟,图 6 给出了光波模式和光场分布特征。从仿真结果看,四路光可以很好地被限制在波导中传输,在输出阵列单元中光波模式间并未发生串扰,而且整个传输过程中损耗很低。

理论上,当在相位控制单元加载一定电压,改变四路光的相位,在输出阵列单元便可以得到四路具有恒等相位差的相干光束,它们在自由空间(空气中)发生相干合成,合成光束将沿着等相位面传播,这样

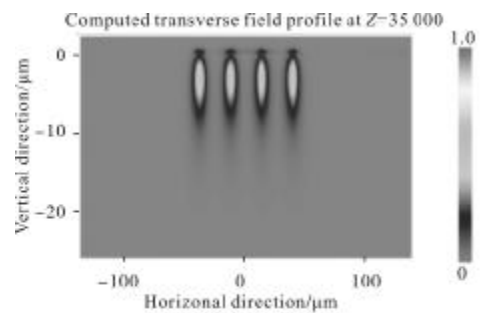
就获得了光束的偏转。根据参考文献[5],定义该相控阵的偏转角度为 θ ,满足:

$$d \sin \theta = \lambda \quad (27)$$

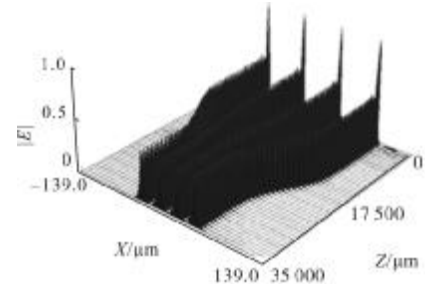
式中: d 为相邻波导中心间距。由公式(27)可以得出,该阵列集成光波导应用于光学相控阵中理论上可以实现 $\pm 4.5^\circ$ 的偏转。



(a) 输入端光波模式
(a) input mode of light wave



(b) 输出端光波模式
(b) output mode of light wave



(c) 光场分布
(c) Distribution of light field

图 6 阵列集成光波导光学相控阵光场传输模拟

Fig.6 Simulation of light propagation in the optical phased array based on integrated optical waveguides

4 结论

根据激光相控阵的性能要求,提出了一种新型集成光波导控相结构,并结合光束传输法(BPM)对其导光特性、损耗特性以及耦合特性进行了仿真计算,最终给出了相控阵的结构参数。与传统的波导相控

阵相比,该相控阵避免了传输单元间的串扰,提高了扫描精度。该集成光波导控相结构简单、占空比高、损耗低、半波电压小、响应速度快,而且在工艺上易于实现。随着科学的不断发展和进步,其在激光雷达、空间光通信等领域有重要的应用价值。

参考文献:

- [1] Thomas J A, Fainman Y E. Rogrammable diffractive optical element using a multichannel lanthanum -modified lead zirconate titanate phase modulator [J]. *Opt Lett*, 1995, 20: 1510-1512.
- [2] Xu Lin, Zhang Jian, Wu Liying. Voltage -phase shift characteristic of phase shift unit for liquid crystal optical phased array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 932-935. (in Chinese)
徐林, 张健, 吴丽莹. 液晶光学相阵列相移单元的电压-相移特征[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(6): 932-935.
- [3] Meyer R A. Optical Beam steering using a multichannel lithium tantalate crystal [J]. *Appl Opt*, 1972, 11(3): 613-616.
- [4] CHen Li, Du Peng, Yan Hong, et al. Progress and applied analysis of the optical phased array in beam steering [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 351-355. (in Chinese)
陈黎, 杜鹏, 颜宏, 等. 光学相控阵在光束偏转中的应用分析及进展[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(4): 351-355.
- [5] Liang Huawei. Theory and experiment study on waveguide optical phased array technology[D]. Xi'an: School of Technical Physics, Xidian University, 2007.
梁华伟. 光波导光学相控阵技术的理论和实验研究[D]. 西安: 西安电子科技大学技术物理学院, 2007. (in Chinese)
- [6] Strake E, Bava G P, Montrosset I. Guided modes of Ti:LiNbO₃ channel waveguides: a novel quasi -analytical technique in comparison with the scalar finite -element method [J]. *IEEE, Journal of Lightwave Technology*, 1988, 6(6): 1126-1134.
- [7] Burns W K, Klein P H, West E J. Ti diffusion in Ti:LiNbO₃ planar and channel optical waveguides [J]. *J Appl Phys*, 1979, 50(10): 6176-6182.
- [8] Chen Haibo, Yu Weilong. Temperature dependence of electro -optic modulator and its optimal design [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(10): 1353-1357. (in Chinese)
陈海波, 余卫龙. 电光调制器的温度特性及其最优化设计[J]. *光学学报*, 2004, 24(10): 1353-1357.
- [9] Yin Yuan. Design and fabrication of interference -type photonic integrated devices [D]. Zhejiang: Department of Optical Engineering, Zhejiang University, 2010. (in Chinese)
殷源. 干涉型集成光波导器件设计与实验研究[D]. 浙江: 浙江大学光电信息工程学系, 2010.
- [10] Hua Yong, Cui Jianmin, Lv Min, et al. Study on high -speed LiNbO₃ optical waveguide phase modulator with low half -wave voltage [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2010, 30(12): 1440-1443. (in Chinese)
华勇, 崔建民, 吕敏, 等. 低半波电压高速铌酸锂光波导相位调制器研究[J]. *北京理工大学学报*, 2010, 30(12): 1440-1443.
- [11] Cai Borong, Tan Zhifei, Sun Shouyao. *Integrated Optics*[M]. Chengdu: Press of Chengdu University of Electronic Science and Technology, 1990. (in Chinese)
蔡伯荣, 谭志飞, 孙守瑶. *集成光学*[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1990.
- [12] Yang Jianyi, Wang Minghua. Optimizing design to optical waveguide bend structure [J]. *Journal of Optoelectronics - Lasers*, 1999, 10(4): 305-309. (in Chinese)
杨建义, 王明华. 光波导弯曲的结构优化 [J]. *光电子·激光*, 1999, 10(4): 305-309.
- [13] Gan Xiaoyong. The key technologies research for high speed electro -optica modulators based on lithium niobate waveguide [D]. Chengdu: School of Optoelectronic Information, Chengdu University of Electronic Science and Technology, 2004. (in Chinese)
甘小勇. 高速铌酸锂波导电光调制器关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学光电信息学院, 2004.