基于波长路由的光真延时模块

陈 阳1,郎婷婷2,何建军1

¹浙江大学光电科学与工程学院,浙江 杭州 300027; ²中国计量大学光学与电子科技学院,浙江 杭州 300027

摘要 设计并制作了一种全集成的基于波长路由的光真延时(OTTD)模块。该模块由两个相同的通道间隔为 1.6 nm的 16×16 阵列波导光栅路由器(AWGR)与一组波导延时线阵级联而成。测试结果表明该模块性能优异,工作波长通道间串扰小于-27 dB,光纤端到端峰值波长的插入损耗约为 12 dB。采用矢量网络分析仪测试得到延时线阵提供的光延时步长为(6.24 ± 0.4) ps。该模块中两个阵列波导光栅路由器及延时线阵均被集成在一块硅基片之上,并且都由二氧化硅(SiO₂)波导制作而成,整个器件尺寸为 $3.5 \text{ cm} \times 3.5 \text{ cm}$ 。

关键词 光学器件,集成光器件,光真延时,光控相控阵雷达,阵列波导光栅路由器

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0223001

Integrated Optical True Time Delay Module Based on Optical Wavelength Router

Chen Yang¹, Lang Tingting², He Jianjun¹

¹ College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 300027, China; ² College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 300027, China

Abstract A fully integrated optical true time delay (OTTD) module based on optical wavelength router is designed and fabricated. Two 16×16 arrayed waveguide grating routers (AWGR) with channel spacing of 1.6 nm are cascaded with a group of waveguide delay lines to form the module. The experimental result shows that this module has excellent performance, the device crosstalk at working wavelengths is lower than -27 dB, and the insertion loss is about 12 dB at peak wavelength end to end. The optical delay increment of (6.24 ± 0.4) ps is measured experimentally by vector network analyzer. Two AWGR and delay line array of the module are integrated on the silicon substrate. This device is fabricated with silicon dioxide waveguide and the whole size is $3.5 \text{ cm} \times 3.5 \text{ cm}$.

Key words optical devices; integrated optics devices; optical true time delay; optical phased array radar; arrayed waveguide grating router

OCIS codes 230.3120; 060.5625; 350.4010

1 引 言

光学真延时(OTTD)模块被广泛应用于微波光子学^[1]研究中,并且是光控相控阵雷达系统中不可或缺的模块之一。与传统微波雷达机械性空间扫描相比,使用 OTTD 模块的光控相控阵雷达仅需要使用光学延时模块来实现微波相位的切换,从而实现微波波束扫描功能。众所周知,传统的微波相控阵雷达在实现宽带扫描时不可避免地会出现波束倾斜的现象,而基于光模块的光控相控阵雷达系统完美地解决了宽带下波束倾斜的问题,同时具有抗电磁干扰、损耗小、尺寸小、质量轻等优点。

作为光控相控阵雷达的核心部分,OTTD 模块成为目前的研究热点。迄今为止,各种各样的方法被用来实现光学延时功能,比如使用光纤棱镜^[2]、光纤延时线^[3]、光纤布拉格光栅^[4]、啁啾光纤布拉格光栅^[5]、高色散光纤^[6]、异质多核光纤^[7]、集成光学^[8]等方法。上述的方法有其各自的优点,但是也存在着一些固有缺

收稿日期: 2016-08-01; 收到修改稿日期: 2016-09-18

基金项目: 国家 863 计划(2013AA014401)、国家科技重大专项(2015ZX03001021)

作者简介: 陈 阳(1991—),男,博士研究生,主要从事集成光学方面的研究。E-mail: chenyang@ioe-zju.org

导师简介:何建军(1964—),男,博士,教授,主要从事集成光学方面的研究。E-mail: jjhe@zju.edu.cn(通信联系人)

点,比如系统复杂、可重构性差、可拓展性差、动态范围小、功率消耗大等。例如,随着微波天线的增加,基于光纤的 OTTD 模块将需要大量的光纤以及光开关,这必然将增加系统的复杂度以及功率的消耗^[2-6]。使用异质多核光纤^[7]来制作 OTTD 模块能够很好地减少光纤的使用量,但是由于单光纤中纤芯数量的限制,大大限制了系统的可拓展性。相比较而言,基于集成光学^[8]的 OTTD 模块具有尺寸小、质量轻、损耗小等优点。然而,到目前为止,大部分基于集成光学的 OTTD 模块都是通过使用大量光开关来实现光延时的,这在增加系统损耗的同时,也增加了整个系统的复杂度。

本文提出了一种全集成的基于波长路由的 OTTD 模块,并进行了实验验证。该模块由两个相同的通道间隔为 1.6 nm 的 16×16 的阵列波导光栅路由器(AWGR)^[9]与一组波导延时线阵级联而成。

2 基本原理

在相控阵雷达系统中,各微波辐射阵元之间均匀排列,相邻阵元之间距离为d。各阵元发射的微波在空间某一方向 θ 的叠加场分布E可表示为

$$E(\theta,t) = \frac{\sin(N\delta/2)}{\sin(\delta/2)} \exp(i2\pi f_m t), \qquad (1)$$

式中 f_m 为天线发射的微波频率,t 为时间, $\delta = \frac{2\pi f_m}{c} d \sin \theta - \Delta \varphi$ 为相邻微波阵元在 θ 方向上的相位差,c 为真空中光速,d 为相邻微波阵元之间的距离, $\Delta \varphi$ 为相邻微波阵元初始相位差(即光真延迟线上引入的微波相位差)。从场分布公式中可以得出,当 $\Delta \varphi$ 满足如下条件

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi f_{\rm m}}{f} d \sin \theta \,, \tag{2}$$

微波场在 θ 方向上出现干涉极大。即微波信号辐射方向空间角度为 θ 。同时相邻微波阵元之间的初始相位差 $\Delta \varphi$ 与相邻通道光信号的时延差 ΔT 的关系满足 $\Delta T = \frac{\Delta \varphi}{2\pi f_{\rm m}}$,对应的相邻通道光学延时线之间的长度差为 $\Delta L_{\rm adj} = \Delta \tau \frac{c}{n_{\rm eff}}$,式中 $n_{\rm eff}$ 为延时线阵中光波导的有效折射率, $\Delta \tau$ 为相邻光延时线之间的光延时差。代人

(2)式,可得光控相控阵雷达系统中,微波信号被调制到光载波上,波束扫描角度表示为[1]

$$\theta = \arcsin\left(\frac{n_{\text{eff}}\Delta L_{\text{adj}}}{d}\right) = \arcsin\left(\frac{c\Delta T}{d}\right),\tag{3}$$

由(3)式可以看出,此时微波波束扫描角度与发射的微波频率无关,因此就可以实现宽带微波波束扫描,从而解决了传统微波雷达宽带情况下的波束倾斜问题。并且,光控相控阵雷达系统可以轻松地通过改变相邻通道的光延时差 ΔT 来改变雷达空间扫描角度。

和传统光栅的工作原理一样,阵列波导光栅的原理也是基于光波的衍射和干涉。由于光栅的色散,由同一输入波导输入的不同波长的光,将被成像在阵列波导光栅的不同输出波导。阵列波导光栅的光栅方程可表示为

$$n_s(\lambda) d_a \sin \theta + n_a(\lambda) \Delta L_a = m\lambda$$
, (4)

式中 $n_s(\lambda)$ 和 $n_s(\lambda)$ 分别是阵列波导光栅输入/输出自由传播区的有效折射率和阵列波导的有效折射率, d_a 为阵列波导间距, ΔL_a 为阵列波导长度差, θ 是衍射角度,m是衍射级次。阵列波导光栅具有复用和解复用功能,从阵列波导光栅输入端口输入的不同波长光信号将被解复用到阵列波导光栅的不同输出端口。

如图 1 所示,两个 16×16 的阵列波导光栅路由器 AWGR1 和 AWGR2 与一组延时线阵相连,从而组成了所提出的基于波长路由的光真延时模块。图 1 中的两个阵列波导光栅路由器的设计参数完全相同,这在一定程度上简化了模块复杂度。由于该模块的对称性,从第 N 个输入端口输入的光信号,也只能从第 N 个输出端口输出,其中 $N=1,2,3,\cdots,16$ 。延时线阵由一组长度呈等差数列的光波导组成,其长度分别为 $L_n=L_0+n\Delta L$,其中 $n=0,1,2,3,\cdots,15$, L_0 是第一根光波导的长度, ΔL 是光波导之间的长度差。对于某一输入通道,由于 AWGR1 的分光功能,从该通道输入的不同波长光信号将输出到 AWGR1 的不同输出端口,从而经过不同长度的延时线阵。因此,只需改变输入通道的光信号波长,即可选择光信号通过哪一根延时波

导,从而得到所需的光延时。

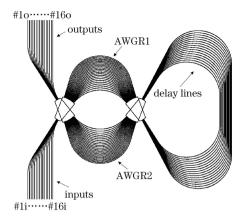


图 1 基于波长路由的 OTTD 模块原理图

Fig. 1 Schematic of the OTTD module based on wavelength route

3 实验与测试

所提出的 OTTD 模块是基于掩埋型二氧化硅(SiO₂)波导结构,在硅基底上依次采用等离子体增强化学气相沉积方法(PECVD)生长 12 μ m 纯净 SiO₂ 下包层和 6 μ m 掺锗 SiO₂ 芯层。采用深紫外光刻的方法,用铬做硬掩膜,利用等离子体刻蚀(ICP-RIE)将掩膜图形转移到芯层 SiO₂。最后,再次通过 PECVD 生长纯净 SiO₂ 上包层,每生长 3 μ m 进行一次退火操作,重复 6 次,最终完成整个芯片制作。波导芯层的尺寸为 6 μ m×6 μ m,由棱镜耦合仪测得包层和芯层在 1550 nm 波长下的折射率分别为 n_1 = 1.455 和 n_2 = 1.465。使用时域有限差分的方法计算可得,该波导 TE 模式的有效折射率 $n_{\rm eff}$ = 1.460。本设计的光延时线阵的长度差 ΔL = 1284.2 μ m,由此可以计算得出光延时差 $\Delta \tau$ = $n_{\rm eff}$ $\Delta L/c$ = 6.25 ps。设计并制作了通道间隔为 1.6 nm的 16×16 的阵列波导光栅路由器,表 1 给出了该阵列波导光栅路由器的其他参数。

表 1 阵列波导光栅路由器的主要设计参数

Table 1 Main design parameters of the AWGR

Parameter	Symbol	Quantity
Channel spacing	$\Delta \lambda$	1.6 nm
Center wavelength	λ_{c}	1550 nm
Minimum bending radius	R	$5000~\mu\mathrm{m}$
Arrayed waveguide pitch	$d_{\rm a}$	$12~\mu\mathrm{m}$
Output waveguide pitch	d_{\circ}	$19.47~\mu\mathrm{m}$
Path length difference	ΔL	$64.76~\mu\mathrm{m}$
Grating order	m	61
Number of the arrayed waveguides	$N_{ m WG}$	140
Length of free propagation	$L_{ m FPR}$	$3500~\mu\mathrm{m}$
Free spectral range	$\lambda_{ m FSR}$	25.6 nm

图 2 给出了制作完成的掩埋 SiO₂ 波导横截面的扫描电镜图(SEM)。从图 2 中可以看出,由于制作误差,实际制作出来的波导宽度为 6.2 μ m,高度为 6.8 μ m。这种波导尺寸的细微变化会使得波导有效折射率发生变化,从而引起阵列波导光栅路由器波长漂移,以及延时线阵光延时差 $\Delta \tau$ 的细微变化。

图 3 为制作的 OTTD 模块在 TE 模式下的频谱特性测试结果,图中蓝色线为从中心通道(ch9)输入、中心通道(ch9)输出的频谱图,绿色线为从中心通道(ch9)输入、间隔一个通道(ch8)输出的频谱图,红色线为从中心通道(ch9)输入、间隔两个通道(ch7)输出的频谱图。从图 3 可以看出,在工作衍射级次对应的 1530~1556 nm 这个光谱范围内,该 OTTD 模块的通道间串扰小于-27 dB,从输入光纤端到输出光纤端峰值波长的插入损耗为 12 dB。通过综合优化,器件的损耗和串扰性能都能达到更优水平,比如可以增加波导的最小

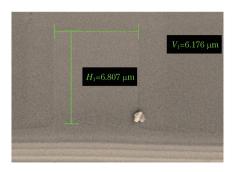


图 2 波导横截面扫描电镜图

Fig. 2 SEM picture of the waveguide cross section

弯曲半径等。从图 3 中蓝色线可以看出,光信号通过不同光延时线的损耗波动为 4.5 dB,这种损耗波动可以通过光域或者电域处理来得到补偿。测试得到阵列波导光栅路由器的自由光谱范围(FSR)为 25.14 nm,与设计值 25.6 nm 非常接近,验证了本设计的阵列波导光栅路由器具有优良的波长路由功能(FSR 等于通道数乘以通道间隔)。

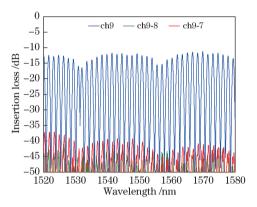


图 3 TE模式下 OTTD 模块的透射频谱图

Fig. 3 Transmission spectrogram of the OTTD module under TE mode

使用射频矢量网络分析仪(VNA)来测试延时线阵的光延时差。如图 4 所示,可调谐半导体激光器 (TLS)发出的光信号经过偏振控制器(PC)保证其 TE 偏振输出。VNA 输出的微波信号,通过马赫-曾德尔干涉仪调制器(MZM)调制到输入光信号上。经过调制的光信号输入到待测器件(DUT),掺铒光纤放大器 (EDFA)被用来补偿光经过 OTTD 模块的传播损耗。最终,使用一个半导体光探测器(PD)来将微波信号从光信号中解调出来,并将其输入到 VNA 的输入端口。在测试过程中,将光信号输入到 OTTD 模块的中心输入波导,由于对称性,光信号最终也将从 OTTD 模块的中心输出波导输出。由阵列波导光栅路由器的波长路由功能可知,对于 OTTD 模块的某一输入端口,每个通道波长都有唯一确定的延时线与之对应,通过改变波长即可将光信号切换到不同的延时线中传输,从而获得不同的光延时。首先,调节 TLS 输出的光信号波长,使其通过延时线阵的第一根波导,即最短延时线,然后对 VNA 进行校准操作,将第一根延时线作为参考。然后调节 TLS 输出波长,使得光信号经过第二根光延时线,VNA 发出的微波信号频率从 40 MHz 到 10 GHz 扫描,测试此时的透射系数 S_{21} 。采用相同的方法,依次测试每一个通道波长对应的光延时线的透射系数 S_{21} 。

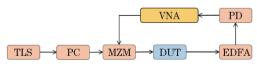


图 4 光延时测试系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of optical time delay measurement system

图 5 中给出了对中心通道测试所得每个通道波长光信号对应的 S21 的相位与频率的关系图。通过计算

所有 16 个曲线的斜率,可以计算得到所有通道波长所对应的光延时大小。此外,利用相同的方法测试了实验系统中光纤连接线等引入的色散,测试结果为-0.444 ps/nm。图 6 给出了最终计算所得的所有 16 根光延时线对应的光延时,也即所有通道波长所对应的光延时。计算得到的光延时步长为 $\Delta \tau = (6.95\pm0.4)$ ps,该结果中包含了实验系统所引入的色散影响。减去系统色散所引入的延时后,可以得到实际 OTTD 模块中光延时线的延时步长为 $\Delta \tau = (6.95-0.444\times1.6)\pm0.4=(6.24\pm0.4)$ ps,这与本研究的设计值 6.25 ps 非常接近。

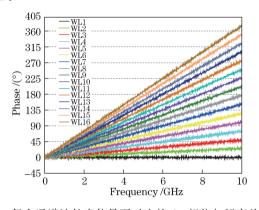


图 5 每个通道波长光信号下对应的 S_{21} 相位与频率关系图 Fig. 5 Relationship between measured S_{21} phase of every channel wavelength for optical signal and frequency

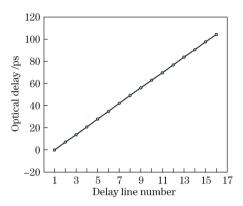


图 6 所有 16 根延时线对应的光延时

Fig. 6 Optical time delay of all 16 delay lines

从公式 $\Delta \tau = n_{\rm eff} \Delta L/c$ 可以看出,影响延时线阵的光延时步长 $\Delta \tau$ 的主要因素是光波导的有效折射率 $n_{\rm eff}$ 和延时线的长度差 ΔL 。制作过程中,由于实际波导截面比设计的波导截面大,因此实际的波导有效折射率 会偏大,然而计算结果表明波导截面的稍微增大对 $n_{\rm eff}$ 的影响非常小。而延时线的长度差 ΔL 是由本设计的掩膜决定的,由于掩膜的精度为 $0.1~\mu m$,因此 ΔL 对最终结果的影响也微乎其微。分析认为最终测试结果的±0.4 ps 的延时波动,主要是由于测试系统的不稳定性造成的,比如测试过程中的温度变化、外界震动等导致的调制器、探测器的波动。有理由相信,通过选择更稳定的调制器和探测器,可以将测试延时波导进一步优化。图 7 给出了在硅基底上制作的 OTTD 模块实物图,该模块的实际尺寸为 $3.5~{\rm cm} \times 3.5~{\rm cm}$,该紧凑的器件结构为大规模集成提供了可能[10]。

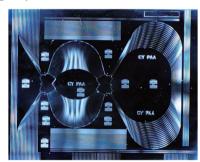


图 7 制作的 OTTD 模块实物图

Fig. 7 Physical photo of the fabricated OTTD module

4 结 论

给出一种基于波长路由的光真延时模块的设计,并进行了实验验证。与其他光真延时模块相比,提出的 OTTD 模块具有损耗小、尺寸小、质量轻、光延时精度高等优点。最后给出了一种基于该模块搭建的光控相 控阵雷达系统框架图。由于提出的具有 16 个单元的 OTTD 模块尺寸较小,仅为 3.5 cm×3.5 cm,采用混合集成的方法,可以将整个光控相控阵雷达系统集成在同一片衬底之上,为片上雷达系统提供了可能。由于实验条件限制,涉及到有源无源集成等难点,本研究未能提供整个光控雷达系统的实验,后续将进一步对整个系统进行实验。

参考文献

- [1] Yao J. Microwave photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3): 314-335.
- [2] Esman R D, Frankel M Y, Dexter J L, et al. Fiber-optic prism true time-delay antenna feed [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1993, 5(11): 1347-1349.
- [3] Ng W, Walston A, Newberg I, et al. Wideband fibre-optic delay network for phased array antenna steering [J]. Electronics Letters, 1989, 25(21): 1456-1457.
- [4] Zmuda H, Soref R A, Payson P, et al. Photonic beamformer for phased array antennas using a fiber grating prism[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, 9(2): 241-243.
- [5] Cruz J L, Ortega B, Andres M V, et al. Chirped fibre Bragg gratings for phased-array antennas [J]. Electronics Letters, 1997, 33(7): 545-546.
- [6] Chen M Y. Hybrid photonic true-time delay modules for quasi-continuous steering of 2-D phased-array antennas [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(6): 910-917.
- [7] Garcia S, Gasulla I. Design of heterogeneous multicore fibers as sampled true-time delay lines [J]. Optics Letters, 2015, 40(4): 621-624.
- [8] Moreira R L, Garcia J, Li W, *et al*. Integrated ultra-low-loss 4-bit tunable delay for broadband phased array antenna applications[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(12): 1165-1168.
- [9] Takahashi H, Oda K, Toba H, et al. Transmission characteristics of arrayed waveguide N×N wavelength multiplexer[J]. Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(3): 447-455.
- [10] Kato K, Tohmori Y. PLC hybrid integration technology and its application to photonic components [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2000, 6(1): 4-13.