

文章编号:1004-9037(2014)06-0849-10

# 基于集成光波导的超快光子微积分运算研究进展

董建绩 廖莎莎 郑傲凌 杨 婷 张新亮

(华中科技大学武汉光电国家实验室,武汉,430074)

**摘要:**为了克服电子计算的速率瓶颈,采用全光计算可以有效释放光子的巨大带宽资源,同时全光计算在全光通信网络中有着举足轻重的作用,集成光波导器件以其尺寸小、质量轻、功率代价小等优势已经成为最受关注的光子计算芯片资源之一。光子微积分运算是指在光域中直接对输入信号进行微积分数学运算。本文回顾了了几种常见的硅基光波导器件用于光子微积分运算的实现方案,包括高阶光子微分运算、分数阶微分运算、高阶常系数微分方程求解、可重构的一阶常系数微分方程求解,分别采用的硅基集成光子器件包括级联马赫增德尔干涉仪、掺杂型马赫增德尔干涉仪、级联微环谐振器和掺杂型微环谐振器。本文指出利用集成光波导器件来实现光子微积分器势必会成为光子微积分运算的重要发展方向。

**关键词:**光子微分器;光学微分方程求解;集成光子学

中图分类号:TN25

文献标志码:A

## Review of Ultrafast Photonic Differentiator and Integrator Employing Integrated Waveguides

*Dong Jianji, Liao Shasha, Zheng Aoling, Yang Ting, Zhang Xinliang*

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of  
Science and Technology, Wuhan, 430074, China)

**Abstract:** Photonic computing can offer huge bandwidth to overcome the electronic bottleneck of electronic circuits, and it also plays important roles in all optical networks. Integrated photonic waveguide is becoming one of the most promising resources to implement photonic computing due to the compact size, light weight, and low power consumption. Photonic differentiator and integrator based on integrated photonic waveguide attract more and more attentions in recent years. In this paper, we review several schemes of ultrafast photonic differentiator and differential equation solver employing integrated silicon cascaded or doped microring and Mech-Zehnder interferometer to realize high-order photonic differentiator, tunable fractional-order differentiator, high-order all-optical differential equation solver and all-optical constant-coefficient tunable differential equation solver. And they are one of the most important development directions of the optical differential and integral.

**Key words:** optical differentiator; optical differential equation solution; integrated photonics

## 引 言

微分和积分是高等数学中常用的运算之一,而

基于集成电路的微积分集成芯片早已实现了商业化,但是电路中的微积分运算受到于电子特性固有的速率瓶颈限制(通常低于 60 GHz),因此很难实现超高速运算,采用光子计算技术<sup>[1-6]</sup>可以有效释

**基金项目:**国家基础研究发展计划(“九七三”计划)(2011CB301704)资助项目;教育部新世纪优秀人才计划(NCET-11-0168)资助项目;全国优秀博士论文(201139)资助项目;国家自然科学基金(60901006,11174096)资助项目;国家杰出青年科学基金(61125501)资助项目。

**收稿日期:**2014-08-20;**修订日期:**2014-10-10

放光子的巨大带宽资源<sup>[7-9]</sup>,发挥光子计算在全光通信网络中举足轻重的作用。例如光子微分器在脉冲表征、超快信号产生、超高速编码等领域都有广泛的应用<sup>[3,9-12]</sup>,而光子积分器的一个重要应用就是解微分方程,微分方程可以描述许多科学领域的科学问题和工程问题<sup>[13]</sup>,比如求解温度扩散过程、有加速度与摩擦力同时作用运动物体的物理问题、电阻-电容电路响应等,因此需要对微分方程进行求解。

目前光子微分器的报道很多,主要可以分为两大部分:光场微分与光强微分<sup>[14]</sup>。光强微分是指微分现象体现在光强或光功率上,而不考虑信号的相位。这种微分可用于超宽带(Ultra-wideband, UWB)微波通信<sup>[15-17]</sup>和信号编码<sup>[18]</sup>。光场微分则是指输出信号的光场(包含相位与振幅)是输入信号的微分结果,可用于超短脉冲产生<sup>[3,19]</sup>,奇对称厄米高斯波形产生<sup>[10]</sup>和脉冲边沿识别<sup>[20]</sup>。其中又由于微分阶数是否为整数可以分为:整数阶微分和分数阶微分。采用的光学器件包括半导体光放大器<sup>[16,19,21]</sup>,非相干光处理器<sup>[22]</sup>,非线性光纤的非线性效应实现<sup>[15]</sup>,光纤布拉格光栅<sup>[23-27]</sup>,长周期光纤光栅<sup>[10,14,28-34]</sup>,干涉仪<sup>[35-36]</sup>,硅基微环<sup>[37-38]</sup>,片上布拉格光栅<sup>[39]</sup>和定向耦合器<sup>[40-42]</sup>等。典型的光子微分方程求解(主要是全光一阶微分方程)方案有两种,第一种需要一个光学反馈环路<sup>[43-44]</sup>,第二种是基于一个法布里-珀罗谐振腔,此腔有特殊时域冲击响应<sup>[45]</sup>。然而额外的环路<sup>[43-44]</sup>或附加的电源<sup>[44-45]</sup>会使这些方案体积大并且复杂。集成光波导器件以其尺寸小、质量轻、功率代价小等优势已经成为最受关注的光子计算芯片资源之一。本文回顾了儿种常见的硅基光波导器件用于光子微分运算的实现方案。

## 1 工作原理

众所周知,一个  $N$  ( $N$  为整数)阶光时域微分器可以求得光信号包络的  $N$  阶导数,其输出信号在频域上可以表示为

$$E_{\text{out}}(\omega) = [j(\omega - \omega_0)]^N E_{\text{in}}(\omega) \quad (1)$$

式中: $\omega_0$  是光载波频率, $E_{\text{in}}$  和  $E_{\text{out}}$  分别是输入和输出的光场。由此可以看出,只需要设计一个传递函数为  $[j(\omega - \omega_0)]^N$  的滤波器,就可以实现微分的功能。当  $N=1$  时,对应一阶微分器;当  $N>1$  时,对应高阶微分器。如果对式(1)进行推广,当  $N$  为分

数时,就能实现分数阶微分。硅基 MZI 结构的传递函数在其谐振频率附近近似为线性频率响应,所以可以实现一阶微分运算的功能。同理,级联多个 MZI 单元并保持相同的谐振频率则可以实现  $N$  阶微分运算。另外,对于两臂功率不均的非对称 MZI,其传递函数正好满足  $N$  为分数的情况,所以可以实现分数阶微分运算。

另外一阶常系数线性微分方程可表示为

$$\frac{dy(t)}{dt} + ky(t) = x(t) \quad (2)$$

式中: $x(t)$  表示输入信号, $y(t)$  是方程的解(即输出信号),而  $k$  为任意的正常数。在系统为零状态响应的情况下,可求解式(2)的理想频率响应函数  $H(\omega)$  为

$$H(\omega) = \frac{1}{j\omega + k} \quad (3)$$

式(3)恰好与单个上下路微环的下载端的传递函数相同,其中  $k$  是与微环  $Q$  有关的常数,所以只要改变微环的  $Q$ ,就可以实现常系数可变的微分方程求解器

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} + a \cdot \frac{dy(t)}{dt} + by(t) = x(t) \quad (4)$$

式中: $a=k_1+k_2$ ,  $b=k_1k_2$ ,  $k_1$  和  $k_2$  分别为两个微环(微环 1 和微环 2)传递函数中的系数  $k$ 。

## 2 基于硅基 MZI 的高阶光子微分器<sup>[46]</sup>

2008 年,上海交通大学苏翼凯教授团队在硅基微环上实现了一阶光子微分器<sup>[37]</sup>,其原理为单个上下路微环的下载端的传递函数在其谐振频率附近近似为线性频率响应,可以实现一阶微分运算的功能。文献<sup>[28]</sup>成功实现了 10 Gb/s 与 25 Gb/s 高斯脉冲、正弦信号和类方波信号的微分,结构紧凑。但该结构只实现了一阶微分功能,并且不具备可调性。

硅基 MZI 结构的传递函数在其谐振频率附近也可近似为线性频率响应,所以利用硅基 MZI 结构同样可以实现一阶微分运算的功能,若将多个 MZI 级联起来就可以实现高阶微分运算。图 1 为商用的绝缘体上硅(Silicon-on-insulator, SOI)上设计和制作的单个和级联 MZI 的显微图像。图 1 为 MZI-1, MZI-2, MZI-3 的图像。

该 SOI 的上硅层厚度为 340 nm,掩膜氧化硅厚度为 2  $\mu\text{m}$ 。首先,使用电子束光刻(E-beam li-

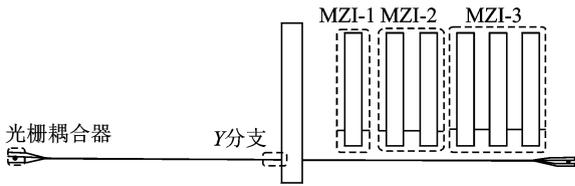


图 1 片上 MZI 的显微图像

Fig. 1 Microscope image of the on-chip MZIs

thography) 的方法将 MZI 结构转移到 ZEP520A 光刻胶上,然后采用感应耦合等离子体 (Inductively coupled plasma, ICP) 刻蚀将上硅层刻蚀掉 240 nm 形成脊波导以及输入输出光栅。为降低 MZI 两臂损耗的不均匀性,两臂波导宽度被设计为 1  $\mu\text{m}$ ,而弯曲波导的宽度为 500 nm,弯曲半径为 15  $\mu\text{m}$ 。较宽的直波导与较窄的弯曲波导之间采用一个 3  $\mu\text{m}$  长的线性锥形区连接。

图 2 为 MZI-1, MZI-2 和 MZI-3 的传递函数与标准一阶,二阶和三阶微分传递函数的比较。由图可以看出,在一定的带宽范围内两者十分吻合。MZI-1, MZI-2 和 MZI-3 的损耗分别为 1, 3.5 和 10.5 dB, 耦合损耗大约为 10 dB。MZI-1, MZI-2 和 MZI-3 谐振处凹陷的深度分别为 13.5, 9.3 和 16.6 dB, 自由光谱范围 (Free spectral range, FSR) 都为 80 GHz, 工作带宽分别为 43, 40 和 35 GHz。

用上述 MZI 结构实现高阶微分的实验装置图如图 3 所示。实验所用的连续光由可调激光器 (Tunable laser diode, TLD) 输出,其调节分辨率为 1 pm。用比特码型发生器 (Bit pattern generator, BPG) 驱动两个级联的马赫泽德调制器,使输入光经调制后产生归零码脉冲信号。第一个掺铒光纤放大器 (Erbium doped fiber amplifier, EDFA) 用于放大输入信号,而第二个 EDFA 则用于补偿芯片的损耗。由于制作的硅基波导只能支持横电模 (Transverse electrical, TE) 传输,所以在输入光进入硅片之前需加入一个偏振控制器 (Polarization controller, PC)。实验中采用垂直耦合的方法将信号脉冲输入到硅片中,最后输出的时域脉冲由一个数字通信分析仪接收处理。

首先,激光器波长调节为 1 564.4 nm。BPG 驱动两个 MZM 产生高斯脉冲序列,其脉宽为 18 ps,如图 4(a)所示。然后将此脉冲序列分别输入到 MZI-1, MZI-2 和 MZI-3 芯片上,并调节激光器

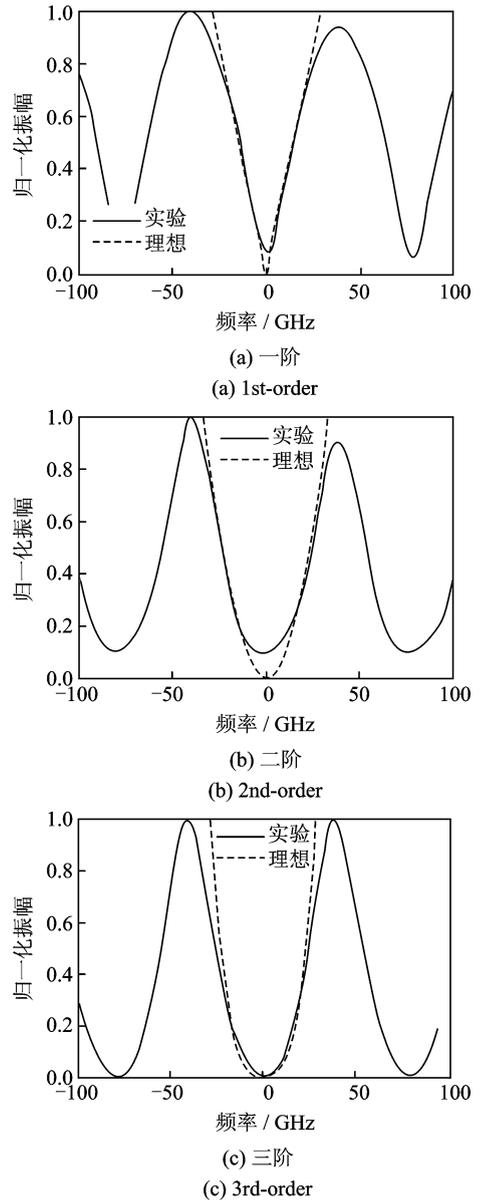


图 2 理想微分运算传递与实际测得 MZI 传递函数  
Fig. 2 Measured and ideal transfer functions

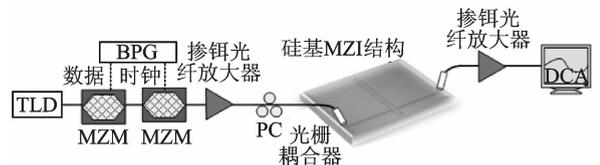


图 3 基于片上 MZI 实现高阶微分的实验装置  
Fig. 3 Experimental setup for the high-order DIFFs with the on-chip MZI structures

波长至 MZI 的谐振凹陷处。最后就可测量得到输出的 1 阶, 2 阶和 3 阶微分波形, 其结果如图 4(b-d) 所示。由图可看出, 测量结果与仿真所得结果除了 2 阶和 3 阶微分波形旁瓣处微小差异外都十分

匹配。上述差异可能是由 MZI 的有限带宽与有限凹陷深度引起。

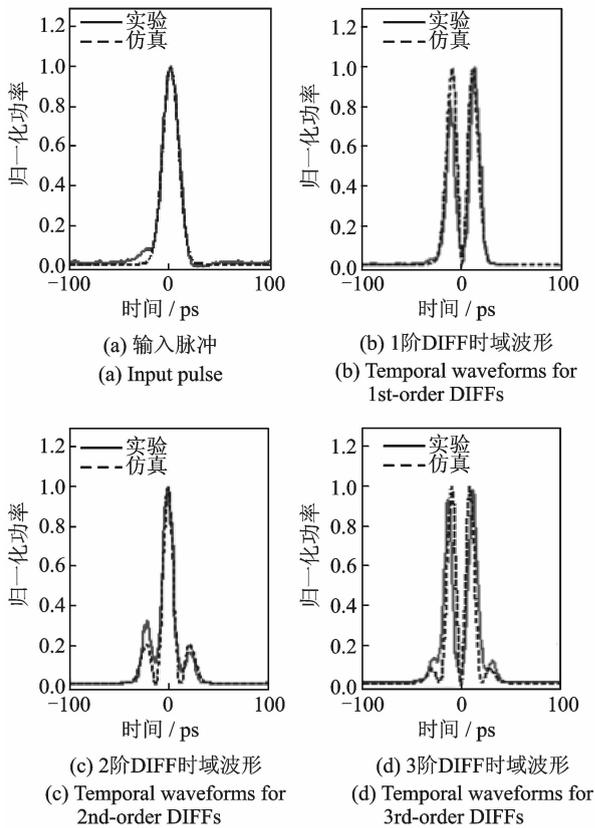


图 4 高阶微分时域波形

Fig. 4 Experimental results for high-order DIFFs

### 3 基于电调 MZI 的分数阶微分器<sup>[47]</sup>

2008 年,西班牙瓦伦西亚大学的 C. Cuadrado-Laborde 等人<sup>[48]</sup>首次提出了分数阶微分器的概念,并模拟了利用 MZI 结构实现全光时域分数阶微分,但文中对分数阶的可调性没有进行讨论。之后,国际上报导了许多实现分数阶微分器的方案,比如 2009 年 C. Cuadrado-Laborde 等人<sup>[49]</sup>又利用非对称相移光学布拉格光栅实现分数阶微分器,2011 年和 2012 年加拿大渥太华大学姚建平教授团队<sup>[12,50]</sup>利用倾斜的光纤布拉格光栅实现分数阶微分器,2013 年文献<sup>[51]</sup>又实现了利用硅基多模干涉仪与微环实现分数阶微分器。

由推导可知,当 MZI 两臂功率不均衡时,可以实现分数阶微分运算。使用掺杂型 MZI 就可以实现阶数可调的分数阶微分器。该方案结构简单,便于集成,MZI 整体结构如图 5 所示。

该 MZI 依然采用上硅层为 340 nm,掩埋氧化

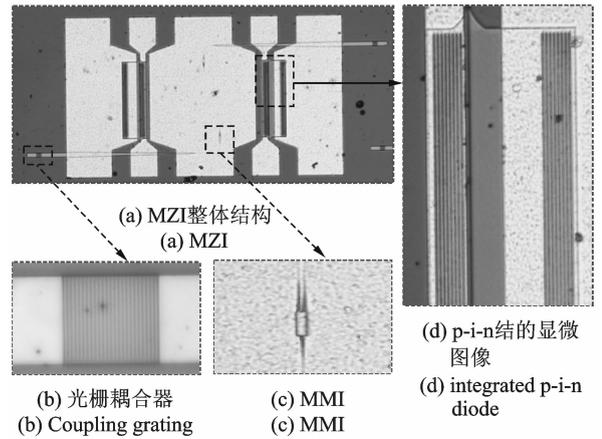


图 5 掺杂型 MZI 显微图像

Fig. 5 Micrographs of MZI

层为  $2 \mu\text{m}$  的 SOI 晶片。采用紫外曝光和干法刻蚀形成  $50 \text{ nm}$  厚度的波导和 MMI。之后采用硼和磷光体移植的方法形成 PN 结。为了使金属和硅紧密连接,在离波导  $700 \text{ nm}$  处进行了密度为  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  的高 P 型和 N 型掺杂。最后在硅片上溅射  $1 \mu\text{m}$  的铝层并刻蚀形成电极。

图 6 为 MZI 透过谱随加载电压变化的曲线,由图可以看出 MZI 谐振凹陷的位置、带宽和形状都随电压变化而变化,从而可以实现不同阶数的分数阶微分运算。该实验的实验装置图与图 3 类似。输入脉冲序列为高斯型,半高全宽为  $5.4 \text{ ps}$ ,重复频率为  $10 \text{ GHz}$ (如图 7(a)所示)。

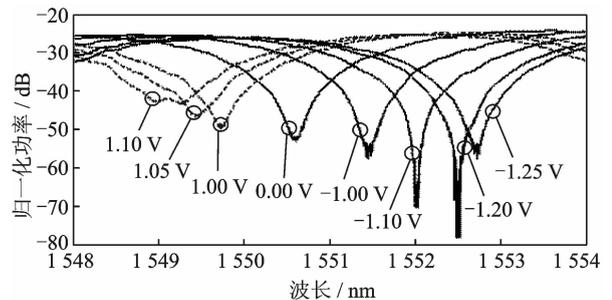


图 6 MZI 透过谱随加载电压变化曲线

Fig. 6 Measured transfer functions of the MZI at different voltages

改变 MZI 上电极的电压,并调节激光器波长使之与 MZI 凹陷波长对准,输出脉冲如图 7(b-i) 所示。图中也描绘了不同分数阶数微分脉冲的仿真结果,其微分阶数分别为  $N=0.83, 0.85, 0.88, 0.93, 0.96, 0.98, 1.00, 1.03$ 。由图可以看出,除了在脉冲凹陷处有微小差别外,实验测量脉冲与仿真所得脉冲符合良好。

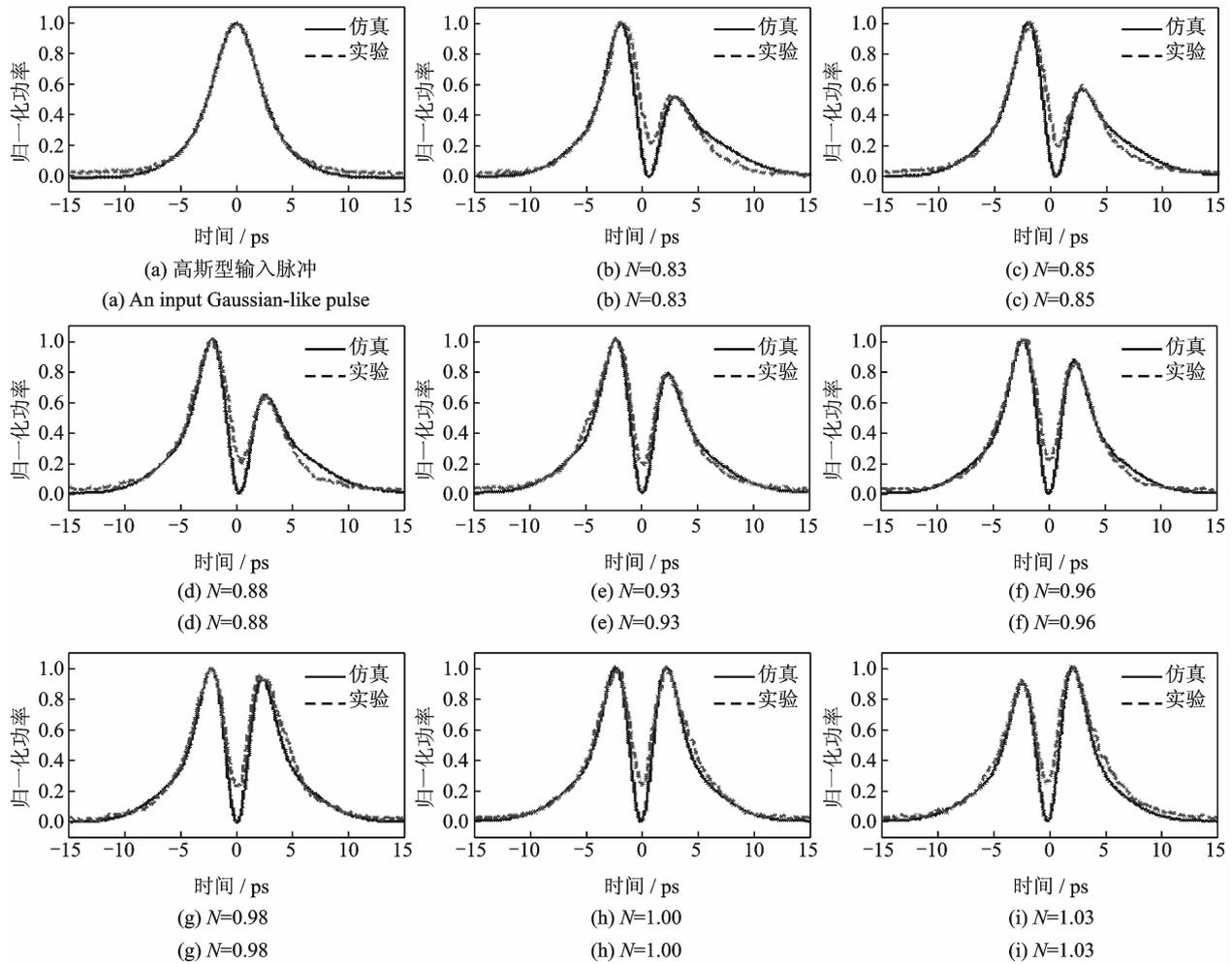


图 7 分数阶微分输出时域波形

Fig. 7 Experimental results of fractional differentiator

#### 4 基于微环谐振器的高阶全光微分方程求解器<sup>[52]</sup>

2012 年, 上海交通大学苏翼凯教授团队<sup>[43]</sup>利用单个硅基微环实现了一阶微分方程求解器, 结构紧凑, 可集成, 并能适应高速环境。但其只给出了仿真结果, 并未进行实验验证。

由于单个微环下载端可实现一阶常系数线性微分方程求解, 同理, 级联多个微环就可以实现高阶微分方程求解。

实验中所用的两个级联微环由通用 SOI 制作, 有不同的半径 ( $R_1 = 100 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $R_2 = 130 \text{ }\mu\text{m}$ ) 和  $Q$  ( $Q_1 = 22\ 038$ ,  $Q_2 = 19\ 045$ ), 如图 8(a) 所示。直波导和弯曲波导的宽度和厚度分别为 450 和 220 nm。直波导与弯曲波导间的间距为 200 nm。图 8(b) 为级联微环的 SEM 图, 图中量程条表示 200  $\mu\text{m}$ 。将 1, 2 端口接入光路, 微环 1 就能实现一阶全光线性

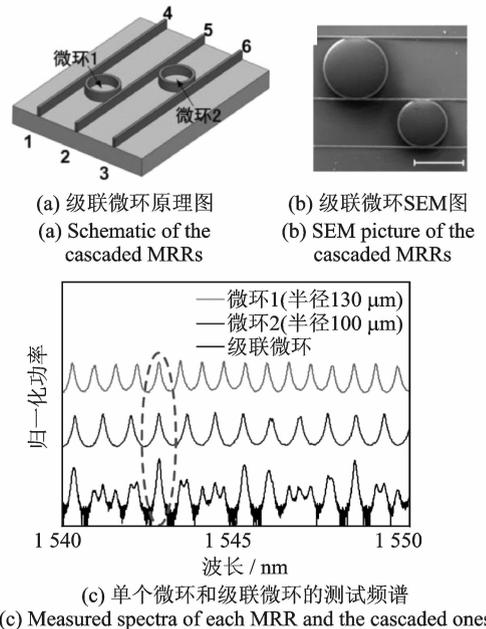


图 8 微环原理图与频谱测试结果

Fig. 8 Schematic diagram and measured spectra of MRRs

微分方程求解器,常系数为  $k_1=0.028/\text{ps}$ 。若将 5,6 端口接入光路,微环 2 可被当做常系数  $k_2=0.032/\text{ps}$  的一阶全光线性微分方程求解器。此外,将 3,4 端口接入光路,两级联微环可实现 2 阶全光线性微分方程求解器,其常系数分别为: $a=k_1+k_2=0.06/\text{ps}$ ,  $b=k_1k_2=0.000896/\text{ps}^2$ 。单个微环和级联微环的测量频谱如图 8(c)所示。

实验中输入的信号为超高斯脉冲。根据图 8(a),将端口 1,2 或 5,6 接入光路,此时微环 1 和微

环 2 可被当做是 1 阶全光线性微分方程求解器。测得的光谱和输出波形如图 9(a-d)所示,由理想滤波器得到的理论结果也显示在图中。

当输入脉冲从端口 3 输入时,式(4)的解可以从端口 4 得到,其中  $a=k_1+k_2=0.06/\text{ps}$  和  $b=k_1k_2=0.000896/\text{ps}^2$ ,反之亦然。测得的和理想的频谱和时域波形如图 9(e)和(f)所示。由图可以看出,级联微环可以实现高阶全光线性微分方程的求解器。

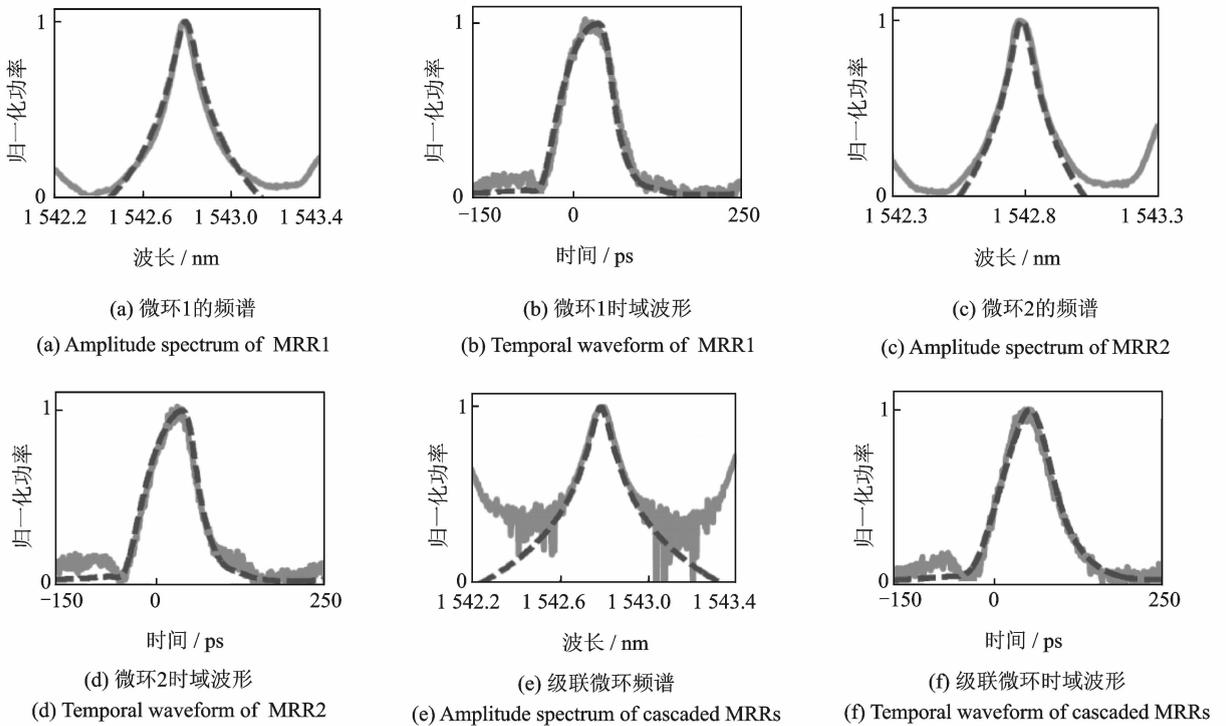


图 9 测得的实验频谱、时域波形结果(实线)和仿真的理论频谱、时域波形结果(点线)

Fig. 9 Measured amplitude spectra, simulated phase spectra, measured output waveforms (solid line), and corresponding simulated ideal results (dotted line) of MRR-based all-optical ODE solver

## 5 常系数可调全光微分方程求解器<sup>[18]</sup>

只要改变微环的  $Q$ , 就可以实现常系数可变的微分方程求解器,而有效快速改变微环  $Q$  的方法就是采用掺杂实现电调微环。图 10 为制作的电调微环。图 10(a)和(b)分布是整个微环和环区域放大后的显微图像。

微环透过谱随加载电压变化的曲线如图 11 所示。由图可知,随着加载电压的增减,微环的 3 dB 带宽也在增加,从而引起微环  $Q$  的变化。与此同时,微环的谐振波长也在朝短波长移动。当加载电压为 0 V 时,微环的谐振波长为 1 553. 202 nm, 3 dB 带宽为 0. 096 nm。而加载电压变为 1. 5 V 时,

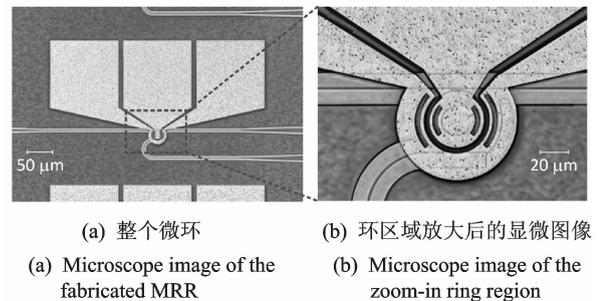


图 10 电调微环显微图像

Fig. 10 Microscope image of MRR

谐振波长变为 1 552. 417 nm, 3 dB 带宽变为 0. 25 nm。上述  $Q$  的变化就能实现可调的常系数

微分方程求解器。

实验装置与图 3 类似。输入信号为超高斯脉冲,半高全宽为 41.51 ps,如图 12 所示。当微环上加载的电压为 0 V 时,微分方程的常系数为 0.038/ps,输出波形(实线)如图 12(b)所示,图中点划线为计算所得的理论波形。当加载到微环上的电压变为 0.9, 1.0, 1.1 和 1.3 V 时,常系数分别为 0.046/ps, 0.054/ps, 0.063/ps 和 0.082/ps。测得的实验结果如图 12(c-f)所示。图 12 中的虚线是测得波形平滑处理后的结果。

在以上用硅基 MZI 实现微分器的方案中,器件的 3 dB 带宽决定了微分运算的带宽。而对于采用硅基微环实现线性微分方程求解的方案,决定求

解器带宽的则是器件的自由光谱范围。

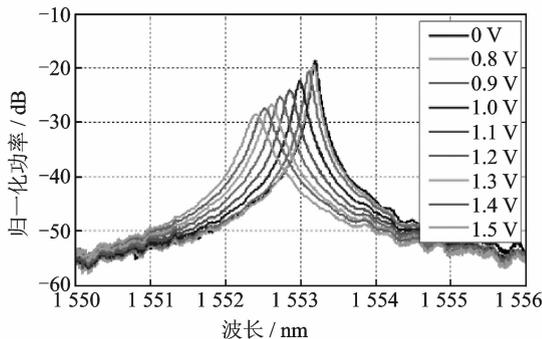


图 11 微环下载端透过谱随加载电压变化曲线

Fig. 11 Measured transmission spectra at the drop port of the fabricated MRR when varying the applied voltage

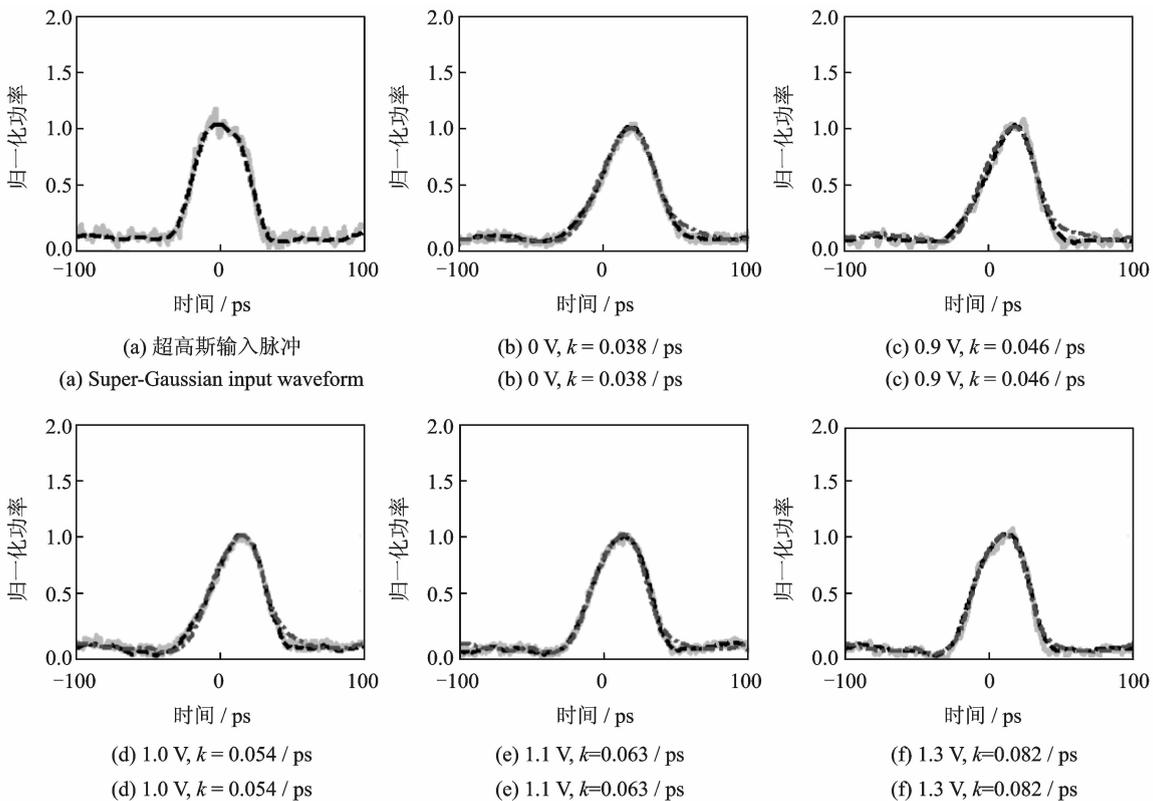


图 12 加载不同电压在微环上所得的输出脉冲

Fig. 12 Outputs with different voltages applied on MRR

### 6 结束语

全光计算在全光通信网络中有着举足轻重的作用,集成光波导器件以其尺寸小、质量轻、功率代价小等优势已经成为最受关注的光子计算芯片资源之一。光子微积分运算指在光域中直接对输入信号进行微积分数学运算。由于光子微分器在脉

冲边沿识别、光图形处理、任意波形产生、光超宽带信号产生等方面的应用,光子积分器在光存储、光技术、求解光微分方程等方面的应用,光子微积分器受到了越来越多的关注。利用集成光波导器件来实现光子微积分器势必会成为光子微积分运算的重要发展方向。本文回顾了几种常见的硅基光波导器件用于光子微积分运算的实现方案,包括高

阶光子微分运算、分数阶微分运算、高阶常系数微分方程求解、可重构的一阶常系数微分方程求解, 分别采用的硅基集成光子器件包括级联 MZI、掺杂型 MZI、级联微环谐振器和掺杂型微环谐振器。

#### 参考文献:

- [1] Robinson A L. Multiple quantum wells for optical logic[J]. *Science*, 1984,225:822-824.
- [2] Lei Lei, Dong Jianji, Yu Yuan, et al. All-optical canonical logic units-based programmable logic array (CLUs-PLA) using semiconductor optical amplifiers [J]. *J Lightwave Technol*,2012,30(22):3532-3539.
- [3] Ngo N, Yu S, Tjin S, et al. A new theoretical basis of higher-derivative optical differentiators [J]. *Opt Commun*, 2004,230(1):115-129.
- [4] Yang Ting, Dong Jianji, Liu Li, et al. Experimental observation of optical differentiation and optical Hilbert transformation using a single SOI microdisk chip [J]. *Sci Rep*, 2014,4:3960.
- [5] Quoc Ngo N. Design of an optical temporal integrator based on a phase-shifted fiber Bragg grating in transmission[J]. *Opt Lett*, 2007, 32 (20): 3020-3022.
- [6] FerreraM, Park Y, Razzari L, et al. All-optical 1st and 2nd order integration on a chip[J]. *Opt Express*, 2011,19(23):23153-23161.
- [7] Venema L. Photonic technologies[J]. *Nature*, 2003, 424(6950):809-809.
- [8] Shaw G, Manolakis D. Signal processing for hyperspectral image exploitation [J]. *IEEE Signal Proc Mac*, 2002,19(1):12-16.
- [9] Azaa J. Ultrafast analog all-optical signal processors based on fiber-grating devices[J]. *IEEE Photonics J*, 2010,2(3):359-386.
- [10] Slavík R, Park Y, Kulishov M, et al. Ultrafast all-optical differentiators [J]. *Opt Express*, 2006, 14 (22):10699-10707.
- [11] Slavík R, Park Y, Kulishov M, et al. Terahertz-bandwidth high-order temporal differentiators based on phase-shifted long-period fiber gratings[J]. *Opt Lett*, 2009,34(20):3116-3118.
- [12] Li M, Shao L Y, Albert J, et al. Continuously tunable photonic fractional temporal differentiator based on a tilted fiber Bragg grating [J]. *IEEE Photonic Tech L*, 2011,23(4):251-253.
- [13] McCloskey D N. History, differential equations, and the problem of narration[J]. *History and Theory*, 1991,30:21-36.
- [14] Slavík R, Park Y, Krčmařík D, et al. Stable all-fiber photonic temporal differentiator using a long-period fiber grating interferometer [J]. *Opt Commun*, 2009,282(12):2339-2342.
- [15] Velanas P, Bogris A, Argyris A, et al. High-speed all-optical first-and second-order differentiators based on cross-phase modulation in fibers[J]. *J Lightwave Technol*, 2008,26(18):3269-3276.
- [16] Xu Jing, Zhang Xinlang, Dong Jianji, et al. High-speed all-optical differentiator based on a semiconductor optical amplifier and an optical filter [J]. *Opt Lett*, 2007,32(13):1872-1874.
- [17] Yao Jianping. Photonics for ultrawideband communications[J]. *Microwave Magazine, IEEE*, 2009, 10 (4):82-95.
- [18] Dong Jianji, Yu Yuan, Zhang Yin, et al. All-optical binary phase-coded UWB signal generation for multi-user UWB communications[J]. *Opt Express*, 2011, 19(11):10587-10594.
- [19] Li Zhengyong, Wu Chongqing. All-optical differentiator and high-speed pulse generation based on cross-polarization modulation in a semiconductor optical amplifier[J]. *Opt Lett*, 2009,34(6):830-832.
- [20] Dong Jianji, Zhang Xinlang, Fu Songnian, et al. Ultrafast all-optical signal processing based on single semiconductor optical amplifier and optical filtering [J]. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal*, 2008,14(3):770-778.
- [21] Xu Jing, Zhang Xinlang, Dong Jianji, et al. All-optical differentiator based on cross-gain modulation in semiconductor optical amplifier[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(20):3029-3031.
- [22] Park Y, Asghari M H, Helsten R, et al. Implementation of broadband microwave arbitrary-order time differential operators using a reconfigurable incoherent photonic processor[J]. *IEEE Photonics J*, 2010, 2(6):1040-1050.
- [23] Rivas L M, Singh K, Carballar A, et al. Arbitrary-order ultrabroadband all-optical differentiators based on fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Photonic Tech L*,

- 2007,19(16):1209-1211.
- [24] Li M, Janner D, Yao J, et al. Arbitrary-order all-fiber temporal differentiator based on a fiber Bragg grating: design and experimental demonstration[J]. *Opt Express*, 2009,17(22):19798-19807.
- [25] Berger N K, Levit B, Fischer B, et al. Temporal differentiation of optical signals using a phase-shifted fiber Bragg grating[J]. *Opt Express*, 2007,15(2):371-381.
- [26] Preciado M A, Muriel M A. Design of an ultrafast all-optical differentiator based on a fiber Bragg grating in transmission[J]. *Opt Lett*, 2008,33(21):2458-2460.
- [27] Preciado M A, Shu X, Harper P, et al. Experimental demonstration of an optical differentiator based on a fiber Bragg grating in transmission[J]. *Opt Lett*, 2013,38(6):917-919.
- [28] Kulishov M, Azaña J. Long-period fiber gratings as ultrafast optical differentiators[J]. *Opt Lett*, 2005,30(20):2700-2702.
- [29] Krcmarik D, Slavik R, Park Y, et al. First-order loss-less differentiators using long period gratings made in Er-doped fibers[J]. *Opt Express*, 2009,17(2):461-471.
- [30] Rivas L M, Boudreau S, Park Y, et al. Experimental demonstration of ultrafast all-fiber high-order photonic temporal differentiators [J]. *Opt Lett*, 2009,34(12):1792-1794.
- [31] Kulishov M, Krcmarik D, Slavik R. Design of terahertz-bandwidth arbitrary-order temporal differentiators based on long-period fiber gratings [J]. *Opt Lett*, 2007,32(20):2978-2980.
- [32] Slavik R, Park Y, Azaña J. Tunable dispersion-tolerant picosecond flat-top waveform generation using an optical differentiator[J]. *Opt Express*, 2007,15(11):6717-6726.
- [33] Li F, Park Y, Azaña J. Linear characterization of optical pulses with durations ranging from the picosecond to the nanosecond regime using ultrafast photonic differentiation[J]. *J Lightwave Technol*, 2009,27(21):4623-4633.
- [34] Ashrafi R, Asghari M H, Azana J. Ultrafast optical arbitrary-order differentiators based on apodized long-period gratings[J]. *IEEE Photonics J*, 2011,3(3):353-364.
- [35] Park Y, Azaña J, Slavik R. Ultrafast all-optical first-and higher-order differentiators based on interferometers[J]. *Opt Lett*, 2007,32(6):710-712.
- [36] Park Y, Ahn T J, Azaña J. Stabilization of a fiber-optic two-arm interferometer for ultra-short pulse signal processing applications [J]. *Appl Optics*, 2008,47(3):417-421.
- [37] Liu Fabgfi, Wang Tao, Qiang Li, et al. Compact optical temporal differentiator based on silicon microring resonator[J]. *Opt Express*, 2008,16(20):15880-15886.
- [38] Dong Jianji, Zheng Aoling, Gao Dingshan, et al. High-order photonic differentiator employing on-chip cascaded microring resonators[J]. *Opt Lett*, 2013,38(5):628-630.
- [39] Rutkowska K, Duchesne D, Strain M, et al. Ultrafast all-optical temporal differentiators based on CMOS-compatible integrated-waveguide Bragg gratings[J]. *Opt Express*, 2011,19(20):19514-19522.
- [40] Li M, Jeong H S, Azaña J, et al. 25-terahertz-bandwidth all-optical temporal differentiator[J]. *Opt Express*, 2012,20(27):28273-28280.
- [41] Ahn T J, Azaña J. Wavelength-selective directional couplers as ultrafast optical differentiators[J]. *Opt Express*, 2011,19(8):7625-7632.
- [42] You Haidong, Ning Tigang, Jian Wei, et al. Optical temporal differentiator using a twin-core fiber[J]. *Opt Eng*, 2013,52(1):015005-015005.
- [43] Lu Liyang, Wu Jiayang, Wang Tao, et al. Compact all-optical differential-equation solver based on silicon microring resonator[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2012,5(1):99-106.
- [44] Tan Sisi, Wu Zhao, Lei Lei, et al. All-optical computation system for solving differential equations based on optical intensity differentiator[J]. *Opt Express*, 2013,21(6):7008-7013.
- [45] Slavik R, Park Y, Ayotte N, et al. Photonic temporal integrator for all-optical computing[J]. *Opt Express*, 2008,16(22):18202-18214.
- [46] Dong Jianji, Zheng Aoling, Gao Dingshan, et al. Compact, flexible and versatile photonic differentiator using silicon Mach-Zehnder interferometers[J]. *Opt Express*, 2013,21(6):7014-7024.

- [47] Zheng Aoling, Yang Ting, Xiao Xi, et al. Tunable fractional-order differentiator using an electrically tuned silicon-on-insulator Mach-Zehnder interferometer[J]. *Opt Express*, 2014,22(15):18232-18237.
- [48] Cuadrado-Laborde C. All-optical ultrafast fractional differentiator[J]. *Opt Qauant Electron*, 2008, 40(13):983-990.
- [49] Cuadrado-Laborde C, Andrés M. In-fiber all-optical fractional differentiator[J]. *Opt Lett*, 2009,34(6):833-835.
- [50] Shahoei H, Albert J, Yao J. Tunable fractional order temporal differentiator by optically pumping a tilted fiber Bragg grating [J]. *IEEE Photonic Tech L*, 2012,24(9):730-732.
- [51] Shahoei H, Xu D X, Schmid J H, et al. Photonic fractional-order differentiator using an SOI microring resonator with an MMI coupler[J]. *IEEE Photonic Tech L*, 2013,25(15):1408-1411.
- [52] Tan Sisi, Xiang Lei, Zou Jinghui, et al. High-order all-optical differential equation solver based on microring resonators[J]. *Opt Lett*, 2013,38(19):3735-3738.

**作者简介:**董建绩(1979-),男,教授,研究方向:集成光子学、微波光子学和高速光信号处理,E-mail:jjdong@mail.hust.edu.cn;廖莎莎(1990-),女,博士,研究方向:集成光子学、微波光子学和高速光信号处理;郑傲凌(1989-),男,硕士研究生,研究方向:集成光子学、微波光子学和高速光信号处理;杨婷(1989-),女,博士,研究方向:集成光子学、微波光子学和高速光信号处理;张新亮(1971-),男,教授,研究方向:高速光传输、全光信号处理关键技术及光电子/光子集成器件和微流光器件。