



# 基于光纤激光器的微波光子移相器研究进展

## 摘要

微波光子移相器是微波光子学领域中一种重要的信号处理技术,该技术采用电信号或射频信号经调制器控制光信号,再通过光器件调节光信号的相位响应,从而实现光信号在电子学领域中的移相,这种技术具有线性度高、可调谐性好、覆盖率广等优点.本文简要阐述了微波光子移相器产生的机理,总结报道了几种典型的微波光子移相技术及其应用进展,指出微波光子移相器作为一种重要的微波信号光处理方法,有望引发微波光子学领域的一次革新.

## 关键词

布拉格光栅;移相器;微波;光纤激光器

中图分类号 TP929.1

文献标志码 A

收稿日期 2017-02-10

资助项目 国家自然科学基金(61605021);重庆市教委科学技术研究项目(KJ1600441);重庆邮电大学青年科学研究项目(A2015-58);重庆邮电大学博士科研基金(A2015-26);太原工业学院青年科学基金(2015LQ07)

## 作者简介

尚海燕,女,硕士,讲师,主要研究微波与光纤通信技术.shanghaiyan2006@126.com

- 1 太原工业学院 电子工程系,太原,030008
- 2 重庆邮电大学 医用电子与信息技术工程研究中心,重庆,400065
- 3 中国移动研究院,北京,100031

## 0 引言

在微波电子学以及超快速光学迅速发展的背景下,微波光子学作为一个崭新的领域应运而生,其主要研究的对象为工作在微波、毫米波甚至是太赫兹波段的光子器件及其相关应用,研究内容包括测量、超快信号高速信号的产生、处理、转换和分配,以及宽带光链路上微波信号的传输<sup>[1-2]</sup>.随着通信技术的发展,特别是光通信技术的飞速发展,微波光子学被广泛地应用于微波与光波之间.它通过光学技术实现了射频(RF)信号的产生、分布、控制、探测以及分析测量等,克服了电学中抽样速度有限的瓶颈,为高频宽带信号处理提供了更有前景的解决方案,使得很多在微波上无法实施的设备和系统成为现实<sup>[3]</sup>.移相器作为主要的微波频移元件,具有频带宽、抗电磁干扰强、损耗低、质量轻和体积小等优点,已在通信、仪器和微波频率测量系统中广泛应用并逐渐成为研究的主要方向<sup>[4]</sup>.

本文首先介绍微波光子移相器的基本原理,其次介绍光纤激光器在微波光子移相器中的运用,最后着重介绍分布式布拉格(DBR)光纤激光器在微波光子移相器中的应用研究.

## 1 微波光子移相器的基本特性及应用

微波光子移相器主要用于相控阵天线和模拟信号处理,它为相控阵天线系统中的每个天线元件提供适当的相位反馈,而且扫描天线方向可控.它的特点是设置微波信号的相位,且不影响振幅.微波光子移相器可分3个部分,首先微波信号通过光电转换模块转换成光信号,然后在光处理模块对光信号进行移相,最后通过光电转换模块将光移相转换成微波移相,从而实现微波光子移相,如图1所示.

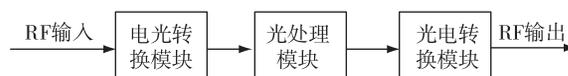


图1 微波光子移相器结构

Fig. 1 Schematic diagram of microwave photonic phase shifter

近年来,国内外关于微波光子移相器的报道很多,采用的技术主要有光学真延时技术<sup>[5-6]</sup>、外差混频技术<sup>[7-8]</sup>、矢量和技术<sup>[9-11]</sup>等.基于光实时延迟技术的微波光子移相器研究最早,但其结构通常由多个延迟单元组成,调相较为复杂.外差混频会引入随机相位噪声,稳定性

欠佳.基于矢量和技术的微波光子移相器的研究主要通过改变两个通道的振幅来实现相位移,但是存在可控相移范围小、输出微波幅度波动大等问题.从光器件角度的研究集中在光纤激光器、光信号处理器上.例如基于非线性环境内交叉相位调制实现 $180^\circ$ 移相<sup>[12]</sup>,载波与边带信号拍频产生微波信号,而相移直接转化成微波信号的移相;基于 Brillouin 散射产生窄带增益和谐波损耗的特性<sup>[13]</sup>,通过调节泵功率可实现 $240^\circ$ 相移;基于单边带调制完成光相移到 RF 相移的直接映射<sup>[14-17]</sup>,单边带调制过程中用到 $90^\circ$ 混合耦合器,因此移相带宽性能差.尽管可以用滤波的方法实现单边带调制,但信号能量急剧衰落,系统信噪比较高.基于双驱动平行 MZM<sup>[18-20]</sup>结构实现移相,虽然实现了 $360^\circ$ 线性稳定移相,但对驱动信号的要求比较高.这些方法均不能实现宽带可调移相,虽然有些能满足,但系统复杂,且需要光带通滤波器<sup>[21]</sup>.Yang 等<sup>[22]</sup>用傅氏光处理器控制两个 RF 调制边带的幅度和相位,实现宽带 $360^\circ$ 连续移相.Peng 等<sup>[23]</sup>用分布反馈(DFB)激光器实现了 8.75 GHz 微波信号 $101^\circ$ 移相.Li<sup>[24]</sup>提出基于 DBR 光纤激光器同时产生微波信号和实现 $360^\circ$ 相移,该方法性能好、成本低、易操作、可行性强.

由于光纤激光器具有光束质量好、调谐方便的优势,它在微波光子移相中的应用备受重视.以下介绍几种不同类型的光纤激光器在微波光子移相器中的应用.

## 2 光纤激光器在微波光子移相器中的研究

光纤激光器在高速通信中占有重要地位.它有许多应用,如长度标准、时间测量、干涉传感器、相干光通信等.将光纤光栅(FBG)插入光纤激光器,激光腔不再依赖大量光元件,而向简单紧凑、强大的全光纤激光腔方向发展.此外,FBG 波长的调谐能力增强了系统的功能,如激光波长的调谐性、偏振选择性、开关性.FBG 全光调谐提供更快的潜在开关速度,且保持鲁棒性.它在相控阵天线、微波光子延迟线滤波器、超宽带信号发生器、光电振荡器、微波光子任意波形发生器、微波光子移相器等方面已得到广泛的应用<sup>[25]</sup>.

### 2.1 基于 TFBG 光纤激光器的微波光子移相器的研究

基于 TFBG 光纤激光器的微波光子移相器是基于倾斜光纤光栅(TFBG)的耦合模理论,通过外部控

制 TFBG 的透射谱实现的.不同于普通光纤折射率受光纤长度的影响,TFBG 折射率的变化存在一定的倾斜度,它会影响透射谱.而 TFBG 透射谱中存在两种耦合模,一种是前后导模之间的耦合,另一种是前后导模与包层模之间的耦合,相应的谐振波长都与折射率有关.根据 Kramers-Kronig 关系,幅度变化会引起相位改变,从而引入群延时.那么在包层模谐振带宽内,只要微调谐振波长,就会产生移相和群延时.当光载波单边带信号输入 TFBG,且注入泵浦光时,只要调节泵浦功率,那么谐振波长发生移动,从而产生移相.为了得到更好的移相效果,可在特殊光纤中写入 TFBG,增强其吸收能力.当光载单边带信号输入 TFBG 后,通过合理设置载频和泵浦参数,对载波进行移相.当载波和边带信号经过光电探测器后,产生微波信号,其相移来自载波的相移.

这种方法具有结构简单、耦合性强、增益平坦的优势,且受温度影响小、效率高.此外也可以用级联 FBG 和长周期 FBG 结构多包层谐振的方式进行移相,但是系统复杂度高、效率低.

基于 TFBG 器件的微波光子移相器在光纤传感、光通信领域有着广泛的应用,例如信道监控、偏振相关器件、折射率传感器、全光纤化的信号解调等.目前,国外以渥太华大学的 Hiva Shahoei 团队<sup>[26]</sup>对此研究处于领先地位,国内南开大学<sup>[27]</sup>、暨南大学<sup>[28]</sup>和天津理工大学<sup>[29]</sup>在此方面的研究比较先进.

### 2.2 基于保偏 FBG 光纤激光器的微波光子移相器的研究

基于保偏 FBG 光纤激光器的微波光子移相器是通过保偏 FBG 器件实现的,它的基本原理是在保偏光纤中写入 FBG,使得这种器件的光谱对输入信号分别在快轴、慢轴进行不同的偏振选择.基于保偏 FBG 反射谱中存在两个独立且偏振正交的反射带,当调制光信号输入时,它分别在快慢轴上对其反射,反射回来的两路光信号经偏振分析后,拍频产生移相的微波信号.或是基于保偏 FBG 在快轴、慢轴上的两个独立传输阻带,当带载波的光单边带信号输入后,在输出端得到两个正交偏振的光信号,一个是有载波的信号,一个是无载波的信号.这两个正交的信号通过可调装置后输入检偏器,然后拍频.此方法关键在于调节输入激光的中心波长,使得它和保偏 FBG 的频谱响应相对应.

这种方法调谐方便、频带宽、偏振串扰低、噪声小、可靠性好、免维护,可广泛用于航天、航空、航海

业制造等国民经济的各个领域.

目前,国外渥太华大学的 Li W. 团队<sup>[30]</sup>在此方向的研究起着引领作用,国内暨南大学的冯新焕团队在此方向的研究比较先进<sup>[31]</sup>.

### 2.3 基于啁啾 FBG 光纤激光器的微波光子移相器的研究

基于啁啾 FBG 光纤激光器的微波光子移相器是通过掺杂线性啁啾 FBG 器件实现的,它的基本原理是通过特殊的 FBG 写入方法使得这种器件的反射带具有平坦的幅度响应和非均匀相位响应.通过光调制和滤波得到带载波的单边带调制信号,然后输入掺杂线性啁啾 FBG.而在泵浦的作用下,光纤啁啾 FBG 的折射率随泵浦功率的变化而改变.若将泵浦注入啁啾 FBG 的某一端口,那么相位响应也会随之变化.此时通过合理设置参数使得载波和边带光信号分别分布在啁啾 FBG 不同的相位响应区域内,使得在调节泵浦功率的过程中,载波相位发生改变,而边带相位不变,即用泵浦对光载波进行移相.同时,载波和边带信号用于在光电探测器产生的微波信号和载波相移转换为微波信号的相移,从而实现微波光子相移.

该方法具有响应快、插入损耗低、稳定性好、操作简单、抗干扰能力强、可实现均匀通道间距及理想信道传输滤波器等优点.此外,还可以用外部加热或机械式方法对 FBG 进行调谐实现移相,但是在操作过程中,光纤的双折射效应却难以避免.

目前,国外以渥太华大学 Yao Jianping 团队<sup>[32]</sup>对这种方法的研究比较先进,国内北京邮电大学翟文胜团队<sup>[19-20]</sup>基于线性啁啾 FBG 取得了最新研究成果,此方法在微波系统及雷达领域有很好的发展潜力.

综上所述,采用 FGB 实现微波信号移相,均需

外部光信号作为载波,而由 FGB 构成的光纤激光器可以直接作为光源,还可以产生微波信号,降低了系统的复杂性.在这些 FBG 构成的线性腔激光器中,DBR 光纤激光器以其独有的稳定性高、制作简单、线宽窄、波动小等有利特性,在微波光子领域得到了最新的推广应用.

### 3 DBR 光纤激光器在微波光子移相器中的研究

由于 DBR 光纤激光器具有双频、双偏振的输出特性,它的双折射性对光相位具有很好的调谐性,所以被应用于微波光子移相器中.

#### 3.1 工作原理

如图 2 所示,基于 DBR 光纤激光器实现微波信号的线性相移,其中 PC 为偏振控制器,WDM 为波分复用器,PD 为光电探测器.该光纤激光器是在 Er/Yb 共掺光纤中直接刻写一对 FBG 得到,其中一个是高反光栅,另一个是低反光栅,中间有一定间隔.光栅写入过程中,通过合理设计刻写了 7 种不同参数的光纤激光器,相对应于不同的波长间隔,其频率分布为 1.6 ~ 3.7 GHz.980 nm 泵浦光经 WDM 耦合输入到光纤激光器中,然后激光器的反向输出输入相位调制器,接着调制后的光信号经检偏器后到达 PD 处,最后到达示波器.

由于掺铒光纤的有效双折射效应<sup>[33]</sup>,激光输出具有双偏振和双频特性.设两个频率分别为  $f_1, f_2$ ,它们是互相正交的关系,且相位是锁定的,那么 DBR 光纤激光器的输出可写为

$$\vec{E}_1 = (\hat{x} \cdot A_1 e^{j2\pi f_1 t}) + (\hat{y} \cdot A_2 e^{j2\pi f_2 t + \phi_1}). \quad (1)$$

设原来的相位差为  $\phi_1$ ,如图 2a 所示,其经耦合输入偏振敏感的光相位调制器.由于相位调制器对 TE、TM 模表现出不同的移相性能,在调制器的输出

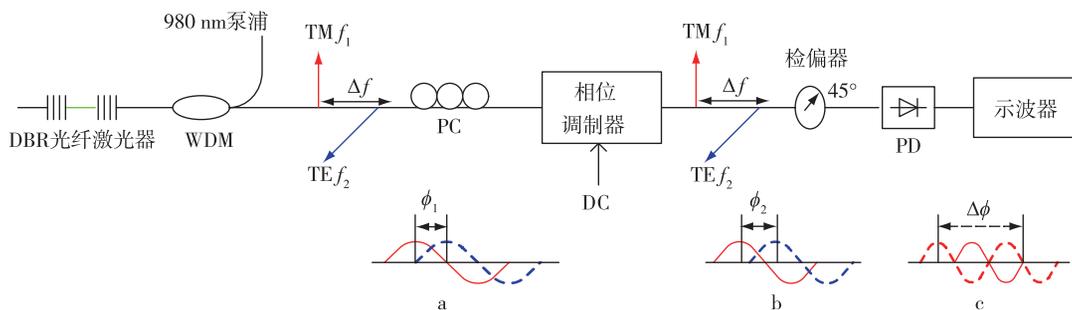


图 2 基于 DBR 光纤激光器实现微波光子移相器的实验装置

Fig. 2 Experimental setup of microwave photonic phase shifter based on DBR fiber laser

$f_1$  和  $f_2$  各自经历不同的相位变化,但是不存在模式竞争.若在调制器外加一个直流偏置电压,那么得到新相位差  $\Phi_2$ ,如图 2b 所示,输出光信号可写为

$$\vec{E}_2(t) = (\hat{x} \cdot A_1 e^{j2\pi f_1 t + (V/V_\pi)\pi}) + (\hat{y} \cdot A_2 e^{j2\pi f_2 t + \eta(V/V_\pi)\pi}), \quad (2)$$

其中  $V$  为直流偏置电压,  $V_\pi$  为相位调制器的半波电压,  $\eta$  为 TE 模和 TM 模移相比.  $\vec{E}_2$  经  $45^\circ$  检偏器后,输出为

$$\vec{E}_3(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \hat{x} (A_1 e^{j2\pi f_1 t + (V/V_\pi)\pi} + A_2 e^{j2\pi f_2 t + \eta(V/V_\pi)\pi}), \quad (3)$$

此时相对相位差<sup>[34]</sup>可表示为

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = (\eta - 1)\pi V/V_\pi. \quad (4)$$

$f_1$  和  $f_2$  在光电探测器上拍频获得 RF,其相位即  $\Delta\Phi$ ,如图 2c 所示.显然  $\Delta\Phi$  跟偏置电压密切相关,只要调电压的大小就能实现相位连续可调.

### 3.2 结果与分析

在传统的 RF 光子移相器中,一方面受光 MZM 非线性传输的影响,另一方面驱动信号的带宽有限,通常 RF 信号会失真.本方案中用 DBR 光纤激光器取代了外部光 MZM 调制,RF 信号是固有的,这就避免了非线性失真.

实验中分别用 7 个 DBR 光纤激光器实现移相,结果都很接近,如图 3 所示,是对 2.9 GHz 微波信号移相的波形.由于受光纤激光器功率的波动和人为因素带来的影响,RF 信号有约 0.2 dBm 的波动.

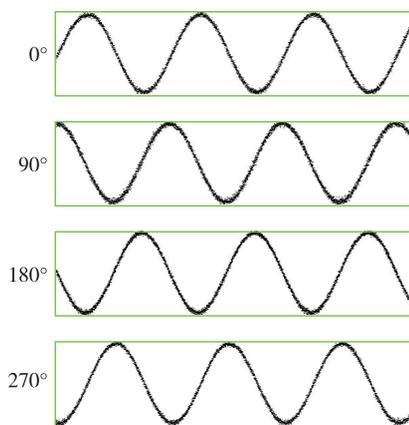


图 3 2.9 GHz RF 信号的移相波形

Fig. 3 Waveforms of RF phase shift at 2.9 GHz

当偏置电压在 0~1.8 V 范围连续变化时,2.9 GHz 微波信号产生  $0^\circ \sim 360^\circ$  移相,如图 4 所示.当光纤激光器的频率在 1.6~3.7 GHz 逐渐变化时,分别

测得  $180^\circ$ 、 $360^\circ$  移相,如图 5 所示.显然,当偏置电压从 0 V 逐渐增加到 1.8 V 时,微波信号相位可在  $0^\circ \sim 360^\circ$  连续可调,即宽带线性微波光子移相器.

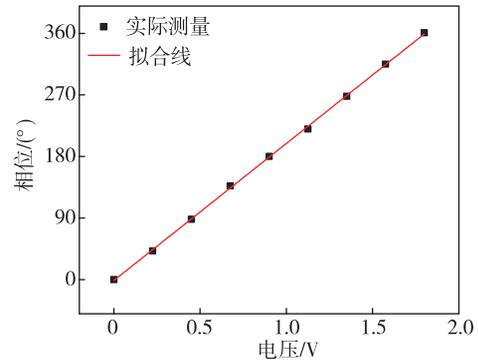


图 4 2.9 GHz 信号相位随偏置电压变化的曲线

Fig. 4 Phase shift vs. relative voltage applied for 2.9 GHz

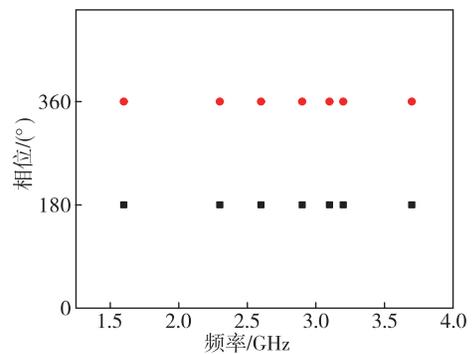


图 5 不同频率下测量的移相

Fig. 5 Measured phase shift with frequency from 1.6 GHz to 3.7 GHz

为了进一步研究该移相器的性能,用交流电压(AC)取代直流偏置电压重新测量.当 AC 为  $f=100$  MHz、 $V_{pp}=2.5$  V 的矩形波时,测得的结果如图 6 所示.移相器会对微波信号引入一定的时延,如图 6b、6c 分别为 82 和 165 ps.由于实际矩形波信号的上升沿、下降沿较平缓,经相位调制时会引入相位抖动,若采用边沿变化较陡的 AC 信号,即可消除相位噪声.

## 4 总结

虽然微波光子移相器的研究发展迅速,但还有很多方面有待完善.本文阐述的大多数方法都是基于光纤激光器;或是利用 FBG 独特的光谱特性,采用泵浦或机械化方式改变光纤折射率,对光波引入相移;或是通过 FBG 相位响应进行移相,再通过相

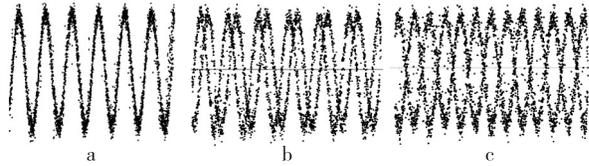


图6 2.9 GHz 波形(a)及其在 AC 下测得 90°移相(b)和 180°移相(c)

Fig. 6 Measured waveform with frequency 2.9 GHz (a), 90° (b) and 180° (c) phase shifting when the control voltage is AC

关技术将此移相转换成 RF 移相,此方法的移相速度有待进一步提高;或是采用 DBR 光纤激光器的单纵模稳定输出,同时产生微波信号及移相,但此方法带宽有限,影响其在高速光通信中的应用.因此,如何进一步提高移相速度和带宽,实现微波光子移相器的集成化和一体化,提高系统的可操作性 and 稳定性,实现具有高灵敏度、高分辨率的实时快速的微波光子移相,使其真正具有实用性,才是广大科研工作者需要进一步努力的方向.

## 参考文献

### References

- [ 1 ] Seeds A J, Williams K J. Microwave photonics [ J ]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24( 12 ): 4628-4641
- [ 2 ] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds [ J ]. Nature Photonics, 2007, 1( 6 ): 319-330
- [ 3 ] Yao J P. Microwave photonics [ J ]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27( 3 ): 314-335
- [ 4 ] Zou X H, Lu B, Pan W, et al. Photonics for microwave measurements [ J ]. Laser & Photonics Reviews, 2016, 10( 5 ): 711-734
- [ 5 ] Lee S S, Udupa A H, Erilg H, et al. Demonstration of a photonically controlled RF phase shifter [ J ]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1999, 9( 9 ): 357-359
- [ 6 ] Chen H, Dong Y, He H, et al. Photonic radio-frequency phase shifter based on polarization interference [ J ]. Optics Letters, 2009, 34( 15 ): 2375-2377
- [ 7 ] Xue X X, Zheng X P, Zhang H Y, et al. Tunable 360 ° photonic radio frequency phase shifter based on optical quadrature double-sideband modulation and differential detection [ J ]. Optics Letters, 2011, 36( 23 ): 4641-4643
- [ 8 ] Liu W L, Li W Z, Yao J P. An ultra-wideband microwave photonic phase shifter with a full 360° phase tunable range [ J ]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25( 12 ): 1107-1110
- [ 9 ] Shahoei H, Li M, Yao J P. Continuously tunable time delay using an optically pumped linear chirped fiber Bragg grating [ J ]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29( 10 ): 1465-1472
- [ 10 ] Wei Y F, Yuan C W, Huang S G, et al. Optical true time-delay for two-dimensional phased array antennas using compact fiber grating prism [ J ]. Chinese Optics Letters, 2013, 11( 10 ): 100606-100609
- [ 11 ] Ghorbani K, Mitchell A, Waterhouse R B, et al. A novel wide-band tunable RF phase shifter using a variable optical directional coupler [ J ]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47( 5 ): 645-648
- [ 12 ] Dong Y, He H, Hu W S, et al. Photonic microwave phase shifter/modulator based on a nonlinear optical loop mirror incorporating a Mach-Zehnder interferometer [ J ]. Optics Letters, 2007, 32( 7 ): 745-747
- [ 13 ] Pagani M, Marpaung D, Choi D Y, et al. Tunable wideband microwave photonic phase shifter using on-chip stimulated Brillouin scattering [ J ]. Optics Express, 2014, 22( 23 ): 28810-28818
- [ 14 ] Pan S L, Zhang Y M. Tunable and wideband microwave photonic phase shifter based on a single-sideband polarization modulator and a polarizer [ J ]. Optics Letters, 2012, 37( 21 ): 4483-4485
- [ 15 ] Zhang Y M, Wu H, Zhu D, et al. An optically controlled phased array antenna based on single sideband polarization modulation [ J ]. Optics Express, 2014, 22( 4 ): 3761-3765
- [ 16 ] Wang M G, Yao J P. Tunable 360° photonic radio-frequency phase shifter based on polarization modulation and all-optical differentiation [ J ]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31( 15 ): 2584-2589
- [ 17 ] Li W, Sun W H, Wang W T, et al. Optically controlled microwave phase shifter based on nonlinear polarization rotation in a highly nonlinear fiber [ J ]. Optics Letters, 2014, 39( 11 ): 3290-3293
- [ 18 ] Shen J G, Wu G L, Zou W W, et al. Linear and stable photonic radio frequency phase shifter based on a dual-parallel Mach-Zehnder modulator using a two-drive scheme [ J ]. Applied Optics, 2013, 52( 34 ): 8332-8337
- [ 19 ] Zhai W S, Huang S, Gao X L, et al. Microwave photonic phase shifter using linear chirped fiber Bragg grating and optical phase modulator [ C ] // Asia Communications and Photonics Conference, 2016, DOI: 10. 1364/ACPC. 2016. AF2A.3
- [ 20 ] Zhai W S, Gao X L, Xu W J, et al. Microwave photonic phase shifter with spectral separation processing using a linear chirped fiber Bragg grating [ J ]. Chinese Optics Express, 2016, 14( 4 ): 16-19
- [ 21 ] Li W, Sun W H, Wang W T, et al. Photonic-assisted microwave phase shifter using a DMZM and an optical bandpass filter [ J ]. Optics Express, 2014, 22( 5 ): 5522-5527
- [ 22 ] Yang J, Chan E H, Wang X, et al. Broadband photonic microwave phase shifter based on controlling two RF modulation sidebands via a Fourier-domain optical processor [ J ]. Optics Express, 2015, 23( 9 ): 12100-12110
- [ 23 ] Peng P C, Wu F M, Jiang W J, et al. RF phase shifter using a distributed feedback laser in microwave transport systems [ J ]. Optics Express, 2009, 17( 9 ): 7609-7614
- [ 24 ] Li Z H. Linear RF photonics phase shifter based on polarization sensitive optical phase modulator [ C ] // IEEE International Conference on Communication Systems, 2010: 461-464

- [25] Wang C, Yao J P. Fiber Bragg gratings for microwave photonics subsystems [J]. *Optics Express*, 2013, 21 ( 19 ) : 22868-22884
- [26] Shahoei H, Yao J P. Tunable microwave photonic phase shifter based on slow and fast light effects in a tilted fiber Bragg grating [J]. *Optics Express*, 2012, 20 ( 13 ) : 14009-14014
- [27] Miao Y, Liu B, Zhang K, et al. Weakly tilted fibre Bragg grating inscription in all-solid photonic bandgap fibres [J]. *Electronics Letters*, 2011, 47(4) :275-277
- [28] Feng X, Tam H Y, Wai P K A. Switchable multiwavelength erbium-doped fiber laser with a multimode fiber Bragg grating and photonic crystal fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(9) : 1088-1090
- [29] Lin W, Miao Y P, Zhang H, et al. Two-dimensional magnetic field vector sensor based on tilted fiber Bragg grating and magnetic fluid [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31( 15 ) : 2599-2605
- [30] Li W Z, Zhang W F, Yao J P. A wideband 360° photonic-assisted microwave phase shifter using a polarization modulator and a polarization-maintaining fiber Bragg grating [J]. *Optics Express*, 2012, 20( 28 ) : 29838-29843
- [31] Niu T, Wang X D, Chan Erwin H W, et al. Dual-polarization dual-parallel MZM and optical phase shifter based microwave photonic phase controller [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8 ( 4 ) : 5501114. DOI: 10. 1109/JPHOT. 2016.2593584
- [32] Liu W L, Yao J P. Ultra-wideband microwave photonic phase shifter with a 360° tunable phase shift based on an erbium-ytterbium co-doped linearly chirped FBG [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(4) :922-924
- [33] 阿戈沃. 非线性光纤光学原理及应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010
- Govind P Agrawal. *Nonlinear fiber optics & applications of nonlinear fiber optics* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010
- [34] Li Z H, Yu C Y, Dong Y, et al. Linear photonic radio frequency phase shifter using a differential-group-delay element and an optical phase modulator [J]. *Optics Letters*, 2010, 35( 11 ) : 1881-1883

## Research progress in microwave photonic phase shifter based on optical fiber laser

SHANG Haiyan<sup>1</sup> WANG Xiuxin<sup>2</sup> LÜ Guangna<sup>3</sup>

1 Department of Electronic Engineering, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008

2 Medical Electronics and Information Technology Engineering Research Center, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065

3 China Mobile Research Institute, Beijing 100031

**Abstract** In the field of microwave photonics, microwave photonic phase shifter plays a key role in signal processing technology. The main component of this technology is the modulator, which can be driven by electrical signal or radio frequency signal to control the optical signal. Then the phase response of the optical signal can be adjusted through optical device. Thus the phase shift of the optical signal can be achieved in the electronic domain. It has the advantages of high linearity, good tenability and wide band, etc. In this paper, the mechanism of microwave photonic phase shifter is introduced briefly, and then several typical schemes and their latest applications are summarized. It is pointed out that microwave photonic phase shifter is expected to lead to an innovation in the field of microwave photonics.

**Key words** fiber Bragg grating; phase shifter; microwave; optical fiber laser