

四波混频光生毫米波技术研究进展

刘丽^{1,2} 徐铁峰¹ 戴振祥² 刘太君¹ 戴世勋¹ 王训四¹ 张秀普¹

¹宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211

²宁波教育学院网络与教育技术中心, 浙江 宁波 315016

摘要 基于四波混频(FWM)效应的光生毫米波(MMW)技术因对信号频率、幅度和相位无限制且光转换效率高,已成为光生毫米波技术研究的一个重点方向。回顾了基于四波混频的光生毫米波技术的研究历程,讨论了目前基于半导体光放大器(SOA)、高非线性光纤(HNLF)和硅基波导等光学器件的四波混频效应生成毫米波的三种技术路线,综述了硫系玻璃光纤和硫系波导在光生毫米波领域的研究进展,并对光生毫米波技术的发展前景进行了展望。

关键词 非线性光学; 光生毫米波; 四波混频; 半导体光放大器; 高非线性光纤; 硫系波导; 硫系玻璃光纤

中图分类号 O437 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.050001

Research Progress on Optical Millimeter-Wave Generation Based on Four-Wave Mixing

Liu Li^{1,2} Xu Tiefeng¹ Dai Zhenxiang² Liu Taijun¹

Dai Shixun¹ Wang Xunsi¹ Zhang Xiupu¹

¹Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China

²Network and Educational Technology Center, Institute of Ningbo Education, Ningbo, Zhejiang 315016, China

Abstract The technology of optical millimeter-wave (MMW) generation based on four-wave mixing (FWM) effect has become a key research direction due to its various advantages like having no limitation on the signal frequency, amplitude and phase, and high optical conversion efficiency. This paper reviews the research history of the photonic generation technology of MMW based on FWM effect. Three technical routes for the photonic generation of MMW based on FWM effect are discussed, which include the utilization of semiconductor optical amplifier (SOA), highly nonlinear optical fiber (HNLF) and silicon waveguide. Research progress on chalcogenide glass fibers and chalcogenide waveguides for the photonic generation of MMW is reviewed. The development prospect for the photonic generation technology of MMW is also presented.

Key words nonlinear optics; optical millimeter-wave generation; four-wave mixing; semiconductor optical amplifier; highly nonlinear optical fiber; chalcogenide waveguide; chalcogenide glass fiber

OCIS codes 250.4390;190.4380;250.4745; 250.5980

1 引言

随着第五代移动通信系统(5G)技术的快速发展,毫米波(MMW)通信将在未来移动通信系统中被广泛采用,它可提供比现有的第四代移动通信系统(4G)更宽的信道带宽和更高的信号传输速率。制约毫米波通

收稿日期: 2015-12-01; **收到修改稿日期:** 2015-12-22; **网络出版日期:** 2016-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(61171040)、全国教育信息技术研究“十二五”规划课题(146241932)、浙江省“重中之重”学科开放基金(xkx11534)

作者简介: 刘丽(1982—),女,博士研究生,讲师,主要从事光纤无线电方面的研究。E-mail: 1301082005@nbu.edu.cn

导师简介: 徐铁峰(1961—),男,博士,教授,主要从事光通信器件、微波光子学等方面的研究。

E-mail: xutiefeng@nbu.edu.cn(通信联系人)

信广泛应用于民用通信系统的主要障碍是其相关硬件价格高昂,尤其是高频高稳定度毫米波信号发生源,成为了制约系统成本控制的瓶颈^[1]。目前,光生毫米波技术通过全光学方法生成高频毫米波信号,克服了电子倍频器件响应频率和带宽的限制,且成本低廉、结构简单、易生成相位噪声小的高性能毫米波,已成为国内外毫米波信号产生技术的研究热点^[2]。

光生毫米波技术按照毫米波生成的原理主要可分为4类:直接调制法^[3]、光学外差法^[4]、外部调制器调制法^[5]和基于非线性效应的方法^[6]。直接调制法采用强度调制器直接将毫米波信号加载到光波上,基站用光电检测器获得毫米波^[3]。该方法简单、易实现,但由于半导体激光器和发光二极管的弛豫振荡和频率啁啾特性,导致调制带宽小、频率响应度低,因而只适用于低频调制系统。光学外差法利用光电探测器(PD)对两个不同波长的光波拍频产生新频率信号而获得毫米波信号^[4]。该方法易产生毫米波,但受相位噪声影响较大,对两束拍频光的相位相关性要求很高,实现难度大,系统较复杂。外部调制器调制法一般使用某种外部调制器,如相位调制器、电吸收调制器或强度调制器等构成光生毫米波信号的核心,该方法具有较高的可靠性,系统实现成本较低^[5]。以外部调制技术为中心,衍生出了多种光生毫米波信号实现方法,例如单边带调制法(SSB)^[7]、双边带调制法(DSB)^[8]、抑制载波调制法(OCS)和光学倍频技术^[9]等。由于毫米波段频率已达到几十GHz甚至上百GHz,一般光调制器件的速度很难满足要求,即使部分超高速光调制器件能达到要求,也因价格高昂而难以普及。然而,通过光学拍频的方法产生几十GHz到上百GHz的毫米波信号则非常容易,比如在1550nm波段,0.8nm的光频差高达100GHz^[8]。因此,在实际研究中,两种或多种方法结合应用比较常见。例如,1992年,O'Reilly等^[5]最先提出利用OCS产生毫米波,他们用铌酸锂(LiNbO₃)调制器将18GHz微波调制到激光上,再用PD将已调信号的上下两个边频进行拍频,得到36GHz毫米波。2005年,Qi等^[9]用射频信号对激光进行相位调制,调制信号的频率从18.8GHz调到25GHz,再用PD将已调信号的上下边带进行拍频,分别得到37.6、50、75.2、100GHz的毫米波信号。2005年,渥太华大学姚建平课题组提出利用高功率射频信号驱动LiNbO₃调制器,并结合法布里-布拉格光栅滤波器实现OCS获得两个二阶光边带,最后在PD中拍频以实现四次倍频,实验获得32~50GHz的宽带可调毫米波信号^[10]。

利用非线性效应产生毫米波信号的方法^[11]是近年来提出的一种新技术,即利用光学器件的非线性效应产生新的频谱分量生成毫米波。此类方法易于实现高倍频毫米波信号,可极大地简化系统结构,且有益于系统集成和降低成本。国内外已有很多研究机构提出了基于不同的非线性效应产生毫米波的解决方案,利用的非线性效应主要包括自相位调制(SPM)^[12]、交叉相位调制(XPM)^[13]、四波混频(FWM)^[14]、交叉增益调制(XGM)^[15]、受激布里渊散射(SBS)^[16]等。其中,基于四波混频效应的光生毫米波技术因其对调制信号的速率和调制格式无限制,且产生的光载毫米波信号具备在传输链路中无功率周期性衰落效应、响应速度快、转换速率高、能实现多个波长变换和偏振不敏感等优势,成为一种极具潜力的光生毫米波方法,具有广阔的应用前景^[17]。目前,基于四波混频效应的光生毫米波技术的研究热点主要集中于基于半导体光放大器(SOA)^[18]、高非线性光纤(HNLF)^[19]和非线性晶体^[20]等介质的四波混频效应来产生毫米波信号。本文综述了基于四波混频产生毫米波信号的研究历程和发展现状,探讨四波混频光生毫米波技术的未来发展趋势。

2 基于四波混频的光生毫米波原理

2.1 四波混频原理

四波混频是由介质的三阶非线性极化引起的光学非线性效应,是指不同波长的三个光波(例如两个抽运光和一个信号光)在非线性介质中相互作用而产生新波长的光波(闲频光)的混频过程,即两个频率为 ω_{p1} 和 ω_{p2} 的抽运光与一个频率为 ω_s 的信号光相互作用,产生一个新的频率为 ω_i 的闲频光^[21]。抽运光、信号光和闲频光之间应满足表达式 $\omega_{p1} + \omega_{p2} = \omega_s + \omega_i$,抽运光将能量有效地转移给信号光和闲频光,从而放大了信号光和闲频光。当输入的抽运光和信号光满足相位匹配条件时,四波混频现象会非常明显。此外,四波混频效应分为简并和非简并两种情况。当 $\omega_{p1} = \omega_{p2} = \omega_p$ 时,只需要一个抽运光 ω_p 和一个信号光 ω_s 就可以激发四波混频获得两个闲频光(ω_{i1} 和 ω_{i2}),称之为简并四波混频;反之,则为非简并四波混频。后文所述四波混频皆为简并四波混频,其原理如图1所示。

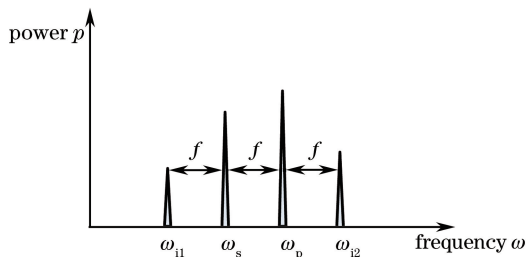


图1 简并四波混频原理图

Fig. 1 Diagram of degenerate four-wave mixing principle

2.2 基于四波混频的光生毫米波技术

光生毫米波系统一般由5部分组成,分别是激光源模块、全光波长转换模块、滤波器模块、光学混频模块和毫米波生成模块,系统结构如图2所示^[22]。工作原理为输入的一个或两个激光信号通过全光波长变换及光学滤波后生成具有一定波长间隔的两个新的光波,这两个新的光波通过PD进行光学混频,生成的差频信号即为所需的毫米波信号。其中,全光波长转换模块不仅是光纤无线电(ROF)系统中利用光学方法传输毫米波信号的基础,更是利用全光手段生成高频毫米波甚至太赫兹信号以降低高频毫米波及太赫兹信号源成本的重要途径。

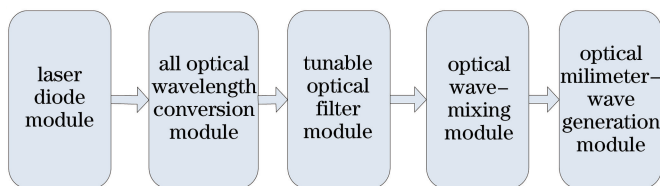


图2 简并四波混频光生毫米波系统模块图

Fig. 2 Degenerate FWM-based optical MMW generation system module chart

3 研究现状

根据所使用的光学非线性元件的不同,基于四波混频产生毫米波信号的方法主要可分为SOA法、HNLF法和硅基波导法。

3.1 基于SOA的四波混频毫米波信号生成

基于SOA的四波混频效应(SOA-FWM)产生毫米波方法的工作原理:两束不同波长的光在SOA的非线性有源介质中相互作用,有源介质中的载流子根据入射光强分布形成载流子光栅(其散射效率根据波长变换间隔的增加而下降),入射光经过光栅散射后形成一个闲频光信号,利用滤波器过滤获得闲频光,最后通过PD拍频得到高频毫米波信号^[23]。基于SOA-FWM的光生毫米波方法因其结构简单、转换效率高、成本低和易于集成等优点,成为国内外许多机构选择的光生毫米波方法。1998年,Kelly等^[24]利用2 mm长的SOA和布拉格光纤光栅,在SOA的电流偏置设置为540 mA的情况下,100 Gb/s光时分复用信号基于SOA-FWM实现波长转换而获得光生毫米波信号。同年,D'Ottavi等^[25]提出了一种基于长尺寸SOA-FWM的全光波长转换方案,输入信号为10 Gb/s,通过全光波长转换机制实现左右边带光信号的转换带宽分别为30 nm和15 nm。2006年,姚建平课题组提出了基于SOA-FWM产生六倍频光生毫米波的系统方案,实验利用5.6 GHz射频驱动信号获得33.6 GHz的光生毫米波载波信号^[26]。2007年,Kim等^[27]基于SOA-FWM利用2.5 GHz的光中频信号和37.5 GHz本地光振荡信号混频获得40 GHz光载毫米波信号。2011年,Kim等^[28]提出一种基于SOA-FWM的全光毫米波生成实验方案,实验中8路2.5 GHz的输入信号被同时调制到26.5 GHz的光生毫米波信号上,没有出现严重的码间串扰现象,且信号功率损失小于2.7 dB,适合于波分复用光纤无线电(WDM-ROF)系统。2013年,Filion等^[29]提出正交调幅信号基于SOA-FWM的波长变换生成毫米波信号方案。

国内在相关方面的研究也取得了一些成果。2009年,清华大学李沫等^[30]提出基于SOA-FWM的全双

工光生毫米波光纤无线电系统,如图3所示。该系统利用15 GHz射频信号驱动马赫-曾德尔调制器(MZM),通过OCS获得间隔为30 GHz的抽运波信号,信号光波和抽运波混合后通过SOA-FWM实现波长变换获得两个闲频波。实验中,他们选择一路闲频光信号作为上行链路的光本振信号与另一路光载毫米波信号一同传输到基站,然后通过PD混频获得60 GHz毫米波信号。该系统实现分布式光本振信号再利用,上行链路中减少电光本振器的应用,利于简化系统结构,有效减少系统噪声干扰,是典型的基于SOA-FWM的光生毫米波实验系统。同年,湖南大学余建军课题组提出一种偏振不敏感的基于SOA-FWM的ROF光生毫米波信号方案。该方案采取单边带调制技术,有效减少光纤色散的不利影响,增加传输距离^[31]。同时,因采用双抽运结构而具有偏振不敏感、波长稳定性高、对射频信号和光学元件的带宽要求低等优点。2012年,余建军课题组^[32]提出一种基于SOA-FWM的双向WDM-ROF系统新方案,即基于差分马赫-曾德尔调制器(DMZM)固有的非线性特性结合SOA-FWM机制产生60 GHz毫米波信号。其优势是实现结构简单灵活,构建成本低。不足之处在于使用了较多环形光路而影响光能转换效率,增加相位噪声。2013年,成都电子科技大学项宇等^[33]提出两组正交偏振的抽运波利用SOA-FWM获得10个新频率光波的光生毫米波方案,可应用于多基站ROF系统的多路毫米波信号生成。2015年,北京邮电大学Qin等^[34]提出不归零正交相移键控(NRZ-QPSK)信号基于SOA-FWM的多信道同步传输系统,并验证两个速率为25 Gb/s的NRZ-QPSK通过SOA的四波混频效应可以产生多种不同频率的光生毫米波信号。

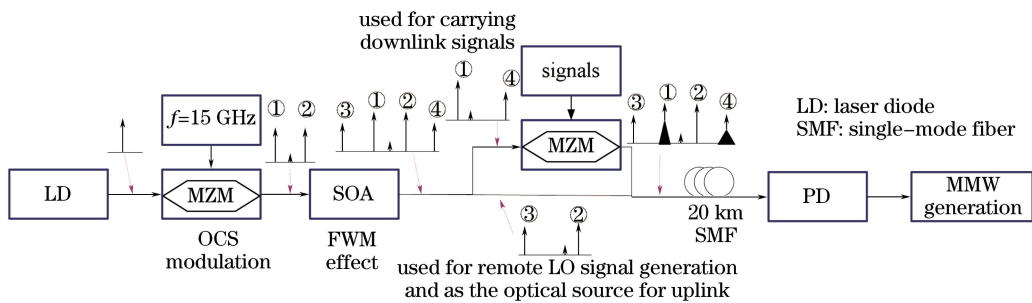


图3 基于SOA-FWM效应生成60 GHz光生毫米波信号系统原理图

Fig. 3 Principle diagram of 60 GHz optical MMW generation system based on SOA-FWM effect

3.2 基于HNLF的四波混频毫米波信号生成

基于HNLF的四波混频效应(HNLF-FWM)产生毫米波的工作原理:将激光器的输出光送入MZM中,并将产生的谐波分量通过放大器后传送到HNLF中,利用四波混频效应输出经滤波器得到的新的光频分量,最后利用PD转换为毫米波信号^[35]。光纤作为四波混频非线性介质的优点是响应时间短,转换码率几乎不受限制,且因没有载流子浓度限制,可同时多路信号光实现频率变换^[36]。传统石英光纤非线性小,所以需要很长的光纤才能产生较明显的四波混频效应,普通的色散移位光纤产生四波混频需要几千米的长度。2003年,Okuno等^[37]成功研制出色散斜率为 $0.0002 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-2} \cdot \text{km}^{-1}$ 、有效模场面积 $A_{\text{eff}} = 16.5 \mu\text{m}^2$ 的HNLF,该光纤能在较小功率的抽运光作用下实现准可调谐的波长转换和宽频的光毫米波信号。随后,出现了各种基质材质的HNLF^[38],其非线性系数值可以达到 10^{-3} 量级,因此,HNLF能在较短长度内实现四波混频效应,可以将其视为一个毫米波产生器件。2006年,Wiberg等^[38]提出利用HNLF-FWM和光纤布拉格光栅(FBG)滤波器实现光毫米波倍频技术,实验验证能使6.67 GHz的射频信号变换为40 GHz光毫米波载波信号,该信号线宽小于3 Hz,信噪比大于50 dB,且成功地将2.5 Gb/s的数据信号加载到该光毫米波载波信号上。2008年,Galili等^[39]提出一种利用新型椭圆纤芯的保偏高非线性光纤(PM-HNLF)中的四波混频效应,以实现640 Gb/s数据信号的全光波长转换方案,该方案能达到零误码率,平均接收偏振敏感保持在 -3 dB 左右。2010年,Wang等^[40]分别对基于SOA和HNLF的四波混频效应实现的多信道波长变换在减小偏振敏感度方面进行比较分析,发现在输入信号功率较大时,HNLF的偏振不敏感性比SOA强,且输入信号分别为开关键控(OOK)信号和相移键控(PSK)信号时,使用HNLF进行波长转换产生的功率损耗小于使用SOA。2015年,Sharif等^[41]提出并验证了一种基于HNLF-FWM实现归零差分相位键控信号(RZ-DPSK)的波长变换方案,该方案允许抽运信号的带宽可调谐。同年,Fernández-Ruiz等^[42]提出一种基

于 HNLF 的 XPM 和 FWM 效应联合作用进行全光上下变频的理论方案,该方案在理论上证明可通过激发 HNLF 的 XPM 效应产生短时的全息影像,从而在不需要相位匹配的条件下进行 FWM 以产生光毫米波。

国内研究虽然起步较晚,但也有一些代表性的成果。2010 年,湖南大学余建军等^[43]提出基于非线性铋基光纤的四波混频效应实现全光上变频生成 60 GHz 毫米波的技术方案,如图 4 所示。他们利用 30 GHz 射频信号驱动强度调制器获得间隔为 60 GHz 的两个抽运光,两个抽运光和 10 Gb/s 的 OOK 信号混合,经过 2 m 长铋基光纤的偏振不敏感性作用后在信号光两边生成间隔同为 60 GHz 的两个闲频光。通过滤波器过滤剩下一个闲频光信号,该信号不仅偏振不敏感且能在标准单模光纤中无色散传输 20 km。最后在基站利用 PD 对该闲频光和信号光进行混频获得 60 GHz 毫米波信号。

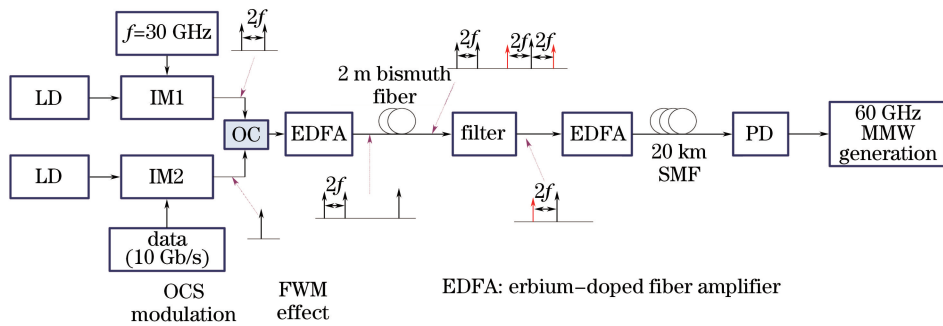


图 4 基于铋基光纤四波混频效应的偏振不敏感全光毫米波生成系统结构原理图

Fig. 4 Principle diagram of polarization-insensitive all-optical MMW generation system based on FWM effect in bismuth oxide-based fiber

2010 年,清华大学王天亮^[44]提出基于 HNLF-FWM 实现四倍频全光上变频的技术方案。方案选用 OCS 技术,利用一个光源产生两个同偏振态抽运光,使得 7.5 GHz 射频信号获得了 30 GHz 毫米波信号。其优点是可用来实现高比特率和复杂调制格式信号的全光上变频,且对于光器件与电设备的带宽要求不高。不足之处是采用的非线性光纤零色散波长远小于 1550 nm,大大降低毫米波信号的信噪比,相位噪声明显,产生的毫米波信号稳定性较差。2012 年,浙江大学 Gao 等^[45]提出并验证了采用连续的单抽运光,基于 HNLF-FWM 的波长变换机制生成毫米波的技术方案。该方案能同时产生 6 个信道的新光波,适用于全光多信道广播通信系统。

3.3 基于硅基波导的四波混频毫米波信号生成

光波导的非线性效应一般强于光纤,基于波导中四波混频效应的毫米波生成技术具有噪声较小、带宽较宽、能通过准相位匹配提高转换效率等优势,但为了实现准相位匹配而在波导中加工周期极化结构的难度很大,且波导的体积较大,难以和集成电路加工工艺相兼容,也限制了光波导在集成光学中的应用。然而,硅基集成光波导中四波混频效应的发现,开辟了波长转换技术的新局面,为硅基波导在毫米波生成方面的应用打开了大门。2005 年,Fukuda 等^[46]通过实验观察到长为 1.58 cm 的硅纳米线波导中发生了明显的四波混频现象,利用长度为 5.8 cm 的硅纳米线波导将 10 Gb/s 信号光进行波长转换生成新的光波,波长转换效率为 -34 dB。因波导的耦合效率较低,且波导中的光功率密度不够高,使得基于波导的四波混频效应的波长转换效率不高。为解决这一问题,Yamada 等^[47]基于带模斑转换器的硅纳米线波导四波混频效应实现波长转换,选用 160 mW 的连续光作为抽运光,采用芯层区域光功率密度达到 430 mW/cm² 的硅纳米线波导,使得四波混频效应得到加强,波长转换效率提高到 -10.6 dB。然而,随着抽运光功率的增加,硅纳米线波导中自由载流子吸收效应逐渐趋于明显,光功率密度会出现饱和现象,从而影响到转换效率的进一步提高。2006 年,Rong 等^[48]提出基于改良硅基波导的四波混频效应的高效波长转换实验系统,系统结构如图 5 所示。他们首次提出硅基纳米线波导中引入反转偏压 p-i-n 二极管结构,如图 6 所示,可以极大缩短载流子的寿命,有效降低由双光子吸收效应引起的自由载流子吸收。实验采用功率为 320 mW 的抽运光,与 10 Gb/s 伪随机码信号共同通过长度为 8 cm 的带 p-i-n 二极管结构的硅基线波导实现波长转换,转换效率为 -11.5 dB,实验结果如图 7 所示。

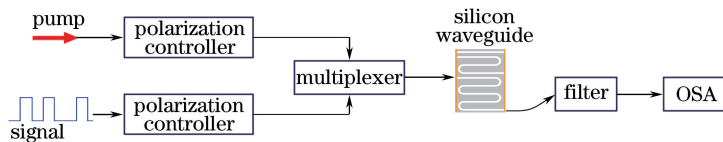


图 5 基于硅基波导四波混频效应的波长变换实验原理图

Fig. 5 Schematic of wavelength conversion experiment based on silicon waveguide FWM effect

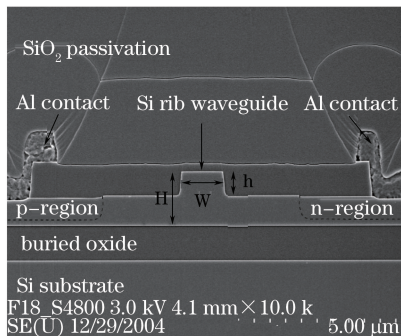


图 6 带 p-i-n 二极管结构的硅基波导横截面图

Fig. 6 Cross-section image of silicon waveguide with p-i-n diode structure

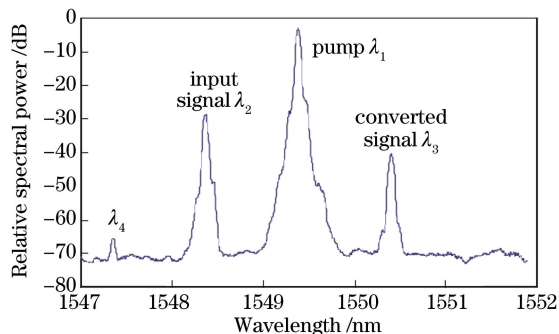


图 7 经过 8 cm 长硅基波导后输出的光波频谱

Fig. 7 Spectrum of the output beam from an 8 cm long silicon waveguide

2007 年, Ayotte 等^[49]对基于硅基波导多信道相位共轭光信号的色散补偿性能进行研究, 实验获得 4 路间隔为 100 GHz 的密集波分复用信号, 分别加载 10 Gb/s 的数据信号后, 可以在 320 km 的标准光纤上同步传输。2015 年, Chen 等^[50]提出了基于硅基波导的双抽运四波混频效应实现 1310~1550 nm 波段的波长转换方案, 这种双抽运四波混频结构可以在波分复用系统中实现信道自由选择。

尽管基于硅基波导四波混频效应的波长转换机制作为一种光生毫米波技术得到了原理性实验验证, 但在实用化的进程中, 仍存在许多问题亟需解决, 诸如波导的色散效应和波导双折射、波导如何设计及选择合适波长满足相位匹配以提高转换效率、如何有效抑制硅基波导中的双光子吸收效应和自由载流子吸收等问题。

4 发展趋势

随着光通信材料制备技术的发展, 硫系玻璃逐渐成为目前的热门研究领域之一。硫系玻璃的非线性折射率 n_2 ($n_2 = 2 \times 10^{-18} \sim 20 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$) 是石英玻璃材料的 100~1000 倍^[51], 易于光学集成, 使其可突破现代电子学的速率瓶颈, 成为超高速非线性光子集成器件的理想基质平台。几种典型光学材料的非线性参数^[52]如表 1 所示, 其中 α 为衰减常数, D 为色散参量, γ 为非线性系数, FCA 为自由载流子吸收效应。由表 1 可见, 硫系玻璃材料具有非常高的三阶非线性以及超快的非线性响应, 且基本不会受到自由载流子吸收效应的影响, 使其在超高速全光信号再生与处理中的应用越来越受到国际上众多研究机构的关注。澳大利亚悉尼大学、英国南安普顿大学、诺丁汉大学以及美国麻省理工学院、佛罗里达大学光学中心等, 均在硫系玻璃光器件制备及应用方面取得了大量创新性研究成果^[53]。

表 1 不同光学材料在 1550 nm 处的非线性参数

Table 1 Nonlinear parameters at 1550 nm for different optical materials

Nonlinear medium	$n_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1})$	$\alpha / (\text{dB} \cdot \text{m}^{-1})$	$D / (\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1})$	$\gamma / (\text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1})$	FCA
SiO ₂	2.2×10^{-20}	Ignored	0.03	21	No
Bi ₂ O ₃	1.1×10^{-18}	Ignored	-260	1360	No
As ₂ S ₃	3×10^{-18}	60	29	9900	No
Si	6×10^{-18}	400	40	150000	Strong

4.1 基于硫系波导的四波混频毫米波信号生成

近年来, 随着硫系波导制备技术的发展, 硫系波导器件开始在近红外通信波段的超高速全光信号产生和处理领域得到广泛应用。2009 年, Luan 等^[55]提出并验证了基于 As₂S₃ 脊型波导的四波混频效应实现全光

波长转换的方案。实验中采用 6 cm 长、2 μm 宽、脊高 870 nm、刻蚀深度 350 nm 的 As_2S_3 脊型波导进行色散调控,该波导的非线性系数 $\gamma=9800 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,反常色散 $D=29.2 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,满足四波混频的相位匹配条件。当误码率为 10^{-9} 时,40 Gb/s 的信号通过这个方案实现全光波长转换,转换带宽为 80 nm。2010 年,Pelusi 等^[56]提出基于色散位移 As_2S_3 脊型波导的四波混频效应实现波长变换的技术方案,原理如图 8、9 所示。该方案基于 7 cm 长的 As_2S_3 脊型波导实现高速差分移相键控(DPSK)信号和二进制 OOK 信号的全光波长转换,实验验证 40 Gb/s 的 DPSK 信号和 160 Gb/s 的 OOK 信号能分别获得 33 nm 和 15 nm 的转换带宽。其中,40 Gb/s DPSK 信号的实验中,抽运波长 λ_p 为 1547 nm,信号波长 λ_s 在 1554~1564 nm 间调谐,通过波长转换获得闲频光 λ_i 在 1531~1540 nm 之间变化,转换效率为 -12.8 dB,如图 10 所示。该研究表明基于硫系波导的四波混频效应在对信号码率、调制格式无限制及存在微小相位失真情况下对信号的处理能力具有强大优势。

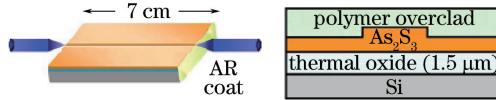


图 8 As_2S_3 色散位移脊型波导的结构原理图

Fig. 8 Schematic of dispersion-shifted As_2S_3 planar rib waveguide

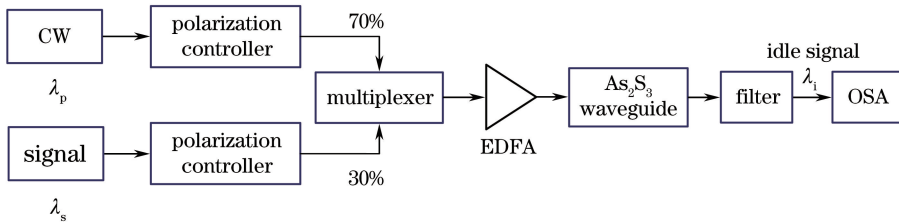


图 9 基于 As_2S_3 硫系波导四波混频效应的波长变换实验原理图

Fig. 9 Schematic of wavelength conversion experiment based on FWM effect in As_2S_3 chalcogenide waveguide

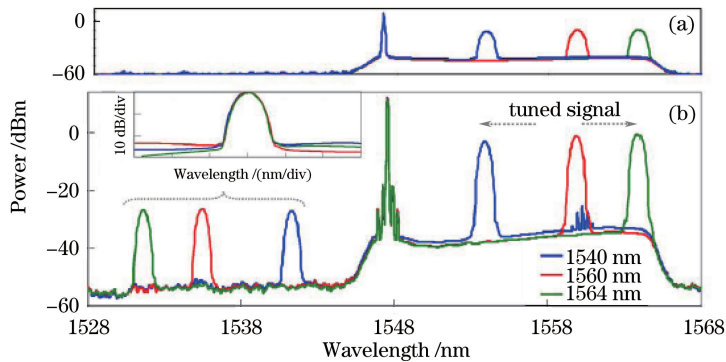


图 10 40 Gb/s DPSK 信号通过 As_2S_3 硫系波导实现波长变换前后的信号光谱对比图。(a) 变换前;(b) 变换后

Fig. 10 Signal spectrum comparison of 40-Gb/s DPSK signal through As_2S_3 chalcogenide waveguide.

(a) Before wavelength conversion; (b) after wavelength conversion

4.2 基于硫系玻璃光纤的四波混频毫米波信号生成

硫系玻璃光纤是目前唯一具备声子能量低、非辐射跃迁几率低和透远红外的光纤类型,而且由于其非线性系数 n_2 比石英材料高两个数量级、响应时间快(亚皮秒)、色散大(可达到 $-410 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$),已成为国外许多研究机构进行全光信号处理、波长转换等应用的重要器件^[57]。

2009 年,Szpułak 等^[58]提出基于 As_2S_3 硫系悬吊芯光纤的四波混频效应实现中红外波长转换的理论方案。方案通过改变硫系玻璃光纤的纤芯结构,将光纤的零色散波长偏移到 2 μm ,利用掺铊光纤激光器发射 1.8~2.1 μm 的抽运光在光纤的正常色散区产生四波混频效应。仿真验证了抽运光波长为 1.92 μm 时,1.3 μm 的抽运光和 4.5 μm 的信号光在芯径为 2.2 μm 的光纤中实现相位匹配,且在 10~20 cm 长的硫系玻

璃光纤中利用四波混频效应将近红外波长(约 $2\ \mu\text{m}$)变换到中红外波长(约 $4.5\ \mu\text{m}$)。

硫系微结构光纤可通过结构设计灵活调节零色散点位置,以便在厘米级长度的光纤中获得理想光谱波段之间的相位匹配,从而实现四波混频效应。2010年,Nguyen等^[59]实验验证了AsSe硫系悬吊芯光纤的四波混频现象,即产生斯托克斯光和反斯托克斯光,实验原理如图11所示。实验采用非线性系数为 $31300\ \text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 的AsSe硫系悬吊芯光纤(图12),选用脉宽为8 ps、波长为1553 nm的脉冲波 f_1 和平均功率为14 mW、波长为1557 nm的连续光 f_2 作为输入AsSe硫系光纤的两个抽运光,两路抽运光混合后一起通过孔径为 $1.4\ \mu\text{m}$ 、长为43 cm的AsSe硫系悬吊芯光纤实现波长转换,且随着 f_2 波长的变化,相应的斯托克斯光和反斯托克斯光波长也随之变化,实验结果如图13所示。该实验波长转换效率达到-27 dB,结果表明硫系光纤在全光信号处理的应用中存在巨大潜能。2011年,Bres等^[60]首次实验验证了在2.5 cm长的硫化物微结构光纤中,利用其四波混频效应实现脉冲半高频率为8 GHz的4 ps超快波长转换,波长转换带宽超过50 nm。

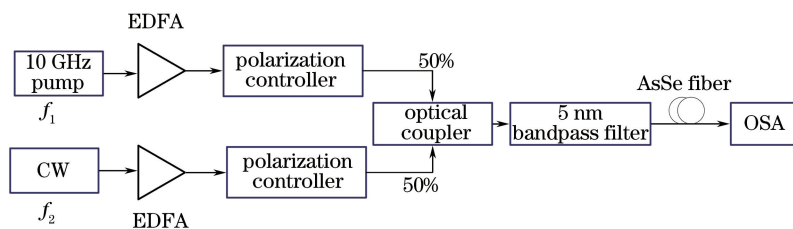


图11 基于AsSe硫系光纤FWM效应的波长变换实验原理图

Fig. 11 Schematic of wavelength conversion based on FWM effect in AsSe chalcogenide fiber

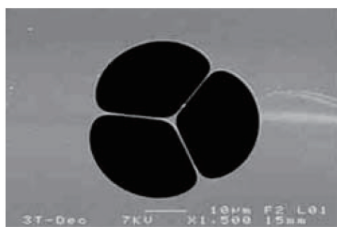


图12 AsSe悬吊芯光纤端面

Fig. 12 Cross section of AsSe suspended-core fiber

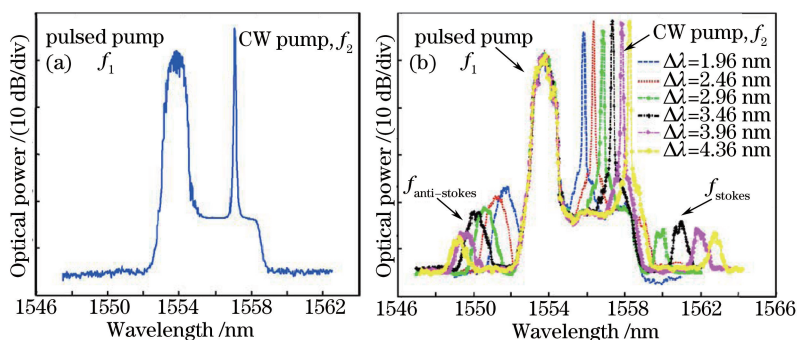


图13 (a) 连续波及脉冲抽运光输入光谱; (b) AsSe悬吊芯光纤输出光谱

Fig. 13 (a) Input spectrum of continuous wave and pulsed pump light; (b) output spectra of AsSe suspended-core fiber

5 结束语

基于四波混频的光生毫米波技术作为微波光子学的一个重要方向,因其具有对信号的调制格式无限制、可多波长同时转换、光毫米波带宽可调谐和低功率损耗等显著优势,研究和应用前景十分广泛。综述了基于四波混频的光生毫米波方案的研究现状及进展,分析可知在较低频率毫米波信号产生的技术方案中,与基于HNLF-FWM的方案相比,基于SOA-FWM的方案系统结构更简单,转换效率更高,调谐带宽更宽。但因

SOA 有载流子恢复时间限制、与光纤耦合损耗较大及稳定性较差等因素影响,其对光信号的响应速度和转换效率受限,因而在产生 40 GHz 以上高频毫米波方案中一般会选择 HNLF-FWM 机制。

但是,在实际应用中,因普通非线性光纤的三阶非线性系数一般小于 SOA 的非线性系数,因此,需用较长的光纤来激发非线性效应。目前,毫米波产生技术的研究重点正向着低成本、高性能、远距离、高频率的方向发展,简化系统结构并降低成本而获得高性能的高频毫米波信号是未来无线接入技术发展的必然趋势,也是研究毫米波产生技术的主要目标。随着硫系光子器件出现,凭借其超高的非线性特性,以硫系波导和硫系玻璃光纤为主流的硫系光子器件必将成为光生毫米波技术的一个重点研究领域。其中,基于硫系波导四波混频效应的光生毫米波技术因其实现准相位匹配的难度高、波导体积较大、较难与光纤集成耦合等问题,在光生毫米波中的应用受到了限制。而硫系玻璃光纤因其超高的非线性系数和超快的响应速度等优势,将成为利用全光方法生成高频毫米波技术中最具潜力的非线性器件。

参 考 文 献

- 1 Xie Shizhong, Chen Minghua, Chen Hongwei. Advance in microwave photonics[J]. ZTE Technology Journal, 2009, 15(3): 6-10.
谢世钟, 陈明华, 陈宏伟. 微波光子学研究的进展[J]. 中兴通信技术, 2009, 15(3): 6-10.
- 2 Yao J. Microwave photonics[J]. J Lightwave Technol, 2009, 27(3): 314-335.
- 3 Davies P A, Foord A P, Razavi K E. Millimeter-wave signal generation by optical filtering of frequency modulated laser spectra[J]. Electron Lett, 1995, 31(20): 1754-1756.
- 4 Fukushima S, Silva F C C, Muramoto Y, *et al.*. Optoelectronic millimeter-wave synthesis using an optical frequency comb generator, optically injection locked lasers and a unidirectional carrier photodiode[J]. J Lightwave Technol, 2003, 21(12): 3043-3051.
- 5 O'Reilly J J, Lane P M, Heidemann R, *et al.*. Optical generation of very narrow linewidth millimeter wave signals[J]. Electron Lett, 1992, 28(25): 2309-2311.
- 6 Yu J, Gu J, Liu X, *et al.*. Seamless integration of an 8×2.5 Gb/s WDM-PON and radio-over-fiber using all-optical up-conversion based on Raman-assisted FWM[J]. IEEE Photonic Technol Lett, 2005, 17(9): 1986-1988.
- 7 Smith G H, Novak D. Broad-band millimeter-wave (38 GHz) fiber-wireless transmission system using electrical and optical SSB modulation to overcome dispersion effects[J]. IEEE Photonic Technol Lett, 1998, 10(1): 141-143.
- 8 Ma J, Yu J, Yu C, *et al.*. Transmission performance of the optical mm-wave generated by double-sideband intensity-modulation[J]. Opt Commun, 2007, 280(2): 317-326.
- 9 Qi G, Yao J P, Seregelyi J, *et al.*. Optical generation band distribution of continuously tunable millimeter-wave signals using an optical phase modulator[J]. J Lightwave Technol, 2005, 23(9): 2687-2695.
- 10 Chen X, Deng Z, Yao J. Photonic generation of microwave signal using a dual-wavelength single-longitudinal-mode fiber ring laser[J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2006, 54(2): 804-809.
- 11 Shen Yichun. Study on applications of stimulated Brillouin scattering in RoF systems [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005: 18-30.
沈一春. 受激布里渊散射在 RoF 系统中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005: 18-30.
- 12 Galili M, Oxenlowe L K, Zibar D, *et al.*. 160 Gb/s Raman-assisted SPM wavelength converter [C]. 30th European Conference on Optical Communication, Stockholm, Sweden, 2004.
- 13 Jia Z, Yu J, Chang J K. All-optical 16×2.5 Gb/s WDM signal simultaneous up-conversion based on XPM in an NOLM in ROF systems[J]. IEEE Photonic Technol Lett, 2005, 17(12): 2724-2726.
- 14 Leesti B, Zilkie A J, Aitchison J S, *et al.*. Broad-band wavelength up-conversion of picosecond pulses via four-wave mixing in a quantum-dash waveguide[J]. IEEE Photonic Technol Lett, 2005, 17(5): 1046-1048.
- 15 Inoue K, Yoshino M. Noise suppression effect in cascaded wavelength conversion using light-injected DFB-LDs [J]. Electron Lett, 1996, 32(23): 2165-2166.
- 16 Shen Y, Zhang X, Chen K. Optical single sideband modulation of 11-GHz ROF system using stimulated Brillouin scattering[J]. IEEE Photonic Technol Lett, 2005, 17(6): 1277-1279.
- 17 Ma J, Yu J, Yu C, *et al.*. Wavelength conversion based on four-wave mixing in high-nonlinear dispersion shifted fiber

- using a dual-pump configuration[J]. *J Lightwave Technol*, 2006, 24(7): 2851-2858.
- 18 Wang Q, Zeng F, Rideout H, *et al.*. Millimeter-wave generation based on four-wave mixing in an SOA[C]. *International Topical Meeting on Microwave Photonics*, Grenoble, France, 2006.
- 19 Ma J, Yu J, Yu C, *et al.*. Reducing polarization sensitivity for all-optical wavelength conversion of the optical packets based on FWM in HNL-DSF using co-polarized pump scheme[J]. *Opt Commun*, 2006, 260(2): 522-527.
- 20 Schneider T. *Nonlinear optics in telecommunications*[M]. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004: 167-200.
- 21 Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics* (4th edition)[M]. Boston: Academic Press, 2007: 402-409.
- 22 Chi Nan, Qi Jiang. Theoretical optimization and experiment of SOA wavelength converter based on four-wave-mixing[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2000, 11(5): 457-460.
- 迟楠, 齐江. SOA 四波混频波长变换器的理论优化与实验研究[J]. *光电子·激光*, 2000, 11(5): 457-460.
- 23 Seo J H, Choi C S, Kang Y S, *et al.*. SOA-EAM frequency up/down-converters for 60-GHz bi-directional radio-on-fiber systems[J]. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2006, 54(2): 959-966.
- 24 Kelly A E, Ellis A D, Nasset D, *et al.*. 100 Gbit/s wavelength conversion using FWM in an MQW semiconductor optical amplifier[J]. *Electron Lett*, 1998, 34(20): 1955-1956.
- 25 D'Ottavi A, Spano P, Hunziker G, *et al.*. Wavelength conversion at 10 Gb/s by four-wave mixing over a 30-nm interval [J]. *IEEE Photonic Technol Lett*, 1998, 10(7): 952-954.
- 26 Wang Q, Rideout H, Zeng F, *et al.*. Millimeter-wave frequency tripling based on four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier[J]. *IEEE Photonic Technol Lett*, 2006, 18(23): 2460-2462.
- 27 Kim H J, Song H J, Song J I. All-optical frequency up-conversion technique using four-wave mixing in semiconductor optical amplifiers for radio-over-fiber applications[C]. *Proceedings of IEEE/MTT-S International Microwave Symposium*, Honolulu, US, 2007: 67-70.
- 28 Kim H J, Song J I. Simultaneous WDM RoF signal generation utilizing an all-optical frequency up-converter based on FWM in an SOA[J]. *IEEE Photonic Technol Lett*, 2011, 23(12): 828-830.
- 29 Filion B, Ng W C, Nguyen A T, *et al.*. Wideband wavelength conversion of 16 Gbaud 16-QAM and 5 Gbaud 64-QAM signals in a semiconductor optical amplifier[J]. *Opt Express*, 2013, 21(17): 19825-19833.
- 30 Li M, Chen H, Yin F, *et al.*. Full-duplex 60-GHz RoF system with optical local oscillating carrier distribution scheme based on FWM effect in SOA[J]. *IEEE Photonic Technol Lett*, 2009, 21(22): 1716-1718.
- 31 Lu J, Yu J J, Zhou H, *et al.*. Polarization insensitive wavelength conversion based on dual-pump four-wave mixing for polarization multiplexing signal in SOA[J]. *Opt Commun*, 2011, 284(22): 5364-5371.
- 32 Xiao Y, Yu J. Novel 60 GHz RoF system with optical single sideband mm-wave signal generation and wavelength reuse for uplink connection[J]. *Opt Commun*, 2012, 285(3): 229-232.
- 33 Xiang Y, Jiang N, Wang D, *et al.*. Multiple basestation RoF system enabled by multiple wavelength conversion based on polarization multiplexed FWM in SOA [C]. *12th International Conference on Optical Communications and Networks*, Chengdu, China, 2013.
- 34 Qin J, Ji Y, Wang H, *et al.*. Multichannel wavelength multicasting for two QPSK signals based on FWM in SOA[J]. *Chin Opt Lett*, 2015, 13(1): 010601.
- 35 Hsueh Y T, Jia Z, Chien H C, *et al.*. A novel bidirectional 60-GHz radio-over-fiber scheme with multiband signal generation using a single intensity modulator[J]. *IEEE Photonic Technol Lett*, 2009, 21(18): 1338-1340.
- 36 Kibria R, Austin M W. All optical signal-processing techniques utilizing four wave mixing[J]. *Photonics*, 2015, 2(1): 200-213.
- 37 Okuno T, Hirano M, Kato T, *et al.*. Highly nonlinear and perfectly dispersion-flattened fiber for efficient optical signal processing applications[J]. *Electron Lett*, 2003, 39(13): 972-974.
- 38 Wiberg A, Pérez-Millán P, Andrés M V, *et al.*. Microwave-photonic frequency multiplication utilizing optical four-wave mixing and fiber Bragg gratings[J]. *J Lightwave Technol*, 2006, 24(1): 329-334.
- 39 Galili M, Mulvad H C H, Grüner-Nielsen L, *et al.*. 640 Gbit/s optical wavelength conversion using FWM in a polarization maintaining HNLF [C]. *34th European Conference on Optical Communication*, Brussels, Belgium, 2008: Tu.3.D.5.

- 40 Wang D, Cheng T H, Yeo Y K, *et al.*. Performance comparison of using SOA and HNLF as FWM medium in a wavelength multicasting scheme with reduced polarization sensitivity[J]. *J Lightwave Technol*, 2010, 28(24): 3497-3505.
- 41 Sharif G M, Nguyen-The Q, Matsuura M, *et al.*. All-optical pulse width-tunable wavelength conversion of return-to-zero differential phase-shift keying signal[J]. *Opt Rev*, 2015, 22(4): 553-559.
- 42 Fernández-Ruiz M R, Lei L, Rochette M, *et al.*. All-optical wavelength conversion based on time-domain holography[J]. *Opt Express*, 2015, 23(17): 22847-22856.
- 43 Yu J, Dong Z, Jian W, *et al.*. All-optical up-conversion 10-Gb/s signal in 60-GHz RoF system using 2-m bismuth oxide-based fiber[C]. *Optical Fiber Communication Conference, Optical Society of America, San Diego, US, 2010: OThO6.*
- 44 Wang Tianliang. Studies on millimeter wave radio-over-fiber key technology[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010: 31-60.
王天亮. 毫米波信号光纤传输关键技术的研究[D]. 北京: 清华大学, 2010: 31-60.
- 45 Gao S, Xiao X. All-optical wavelength multicasting based on cascaded four wave mixing with a single pump in highly nonlinear fibers[J]. *Opt Commun*, 2012, 285(5): 784-789.
- 46 Fukuda H, Yarnada K, Shoji T, *et al.*. Four-wave mixing in silicon wire waveguides[J]. *Opt Express*, 2005, 13(12): 4629-4637.
- 47 Yamada K, Fukuda H, Tsuchizawa T, *et al.*. All-optical efficient wavelength conversion using silicon photonic wire waveguide[J]. *IEEE Photonic Technol Lett*, 2006, 18(9): 1046-1048.
- 48 Rong H, Kuo Y H, Liu A, *et al.*. High efficiency wavelength conversion of 10 Gb/s data in silicon waveguides[J]. *Opt Express*, 2006, 14(3): 1182-1188.
- 49 Ayotte S, Rong H, Xu S, *et al.*. Multichannel dispersion compensation using a silicon waveguide-based optical phase conjugator[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(16): 2393-2395.
- 50 Chen J, Gao S. Wavelength-assignable 1310/1550 nm wavelength conversion using completely phase-matched two-pump four-wave mixing in a silicon waveguide[J]. *Opt Commun*, 2015, 356: 389-394.
- 51 Smeckkala F, Brilland L, Chartier T, *et al.*. Recent advances in the development of holey optical fibers based on sulfide glasses[C]. *SPIE*, 2006, 6128: 61280M.
- 52 Eggleton B, Luther-Davies B, Richardson K. Chalcogenide photonics[J]. *Nat Photon*, 2011, 5(3): 141-148.
- 53 Zhang Zhenying, Chen Fen, Nie Qiuhua, *et al.*. Research progress on nonlinear application of chalcogenide optical waveguide[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(12): 120003.
张振营, 陈芬, 聂秋华, 等. 硫系基质光波导的非线性应用研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(12): 120003.
- 54 Wang Cui, Dai Shixun, Zhang Peiqing, *et al.*. Research progress of infrared supercontinuum generation in chalcogenide glass fibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(3): 030001.
汪翠, 戴世勋, 张培晴, 等. 基于硫系玻璃光纤的红外超连续谱的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(3): 030001.
- 55 Luan F, Pelusi M D, Lamont M R E, *et al.*. Dispersion engineered As_2S_3 planar waveguides for broadband four-wave mixing based wavelength conversion of 40 Gb/s signals[J]. *Opt Express*, 2009, 17(5): 3514-3520.
- 56 Pelusi M D, Luan F, Madden S, *et al.*. Wavelength conversion of high-speed phase and intensity modulated signals using a highly nonlinear chalcogenide glass chip[J]. *IEEE Photonic Technol Lett*, 2010, 22(1): 3-5.
- 57 Dai Shixun, Yu Xingyan, Zhang Wei, *et al.*. Research progress of chalcogenide glass photonic crystal fibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(9): 090602.
戴世勋, 於杏燕, 张巍, 等. 硫系玻璃光子晶体光纤研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(9): 090602.
- 58 Szpulak M, Février S. Chalcogenide As_2S_3 suspended core fiber for mid-IR wavelength conversion based on degenerate four-wave mixing[J]. *IEEE Photonic Technol Lett*, 2009, 21(13): 884-886.
- 59 Nguyen D M, Le S D, Lengle K, *et al.*. Demonstration of nonlinear effects in an ultra-highly nonlinear AsSe suspended-core chalcogenide fiber[J]. *IEEE Photonic Technol Lett*, 2010, 22(24): 1844-1846.
- 60 Bres C S, Zlatanovic S, Wiberg A O J, *et al.*. Demonstration of continuous-wave four-wave mixing in AsSe chalcogenide microstructured fiber[C]. *37th European Conference and Exposition on Optical Communications, Geneva, Switzerland, 2011.*