



电子信息前沿技术丛书



Applications in Communication Technology of Brillouin Scattering in Optical Fiber

光纤中的布里渊散射效应在通信技术中的应用

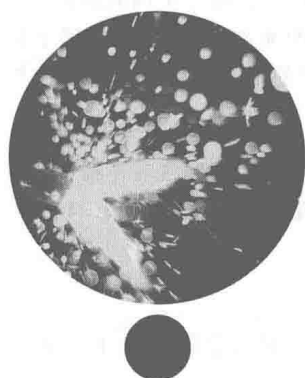
王如刚 周锋 著

Wang Rugang Zhou Feng

清华大学出版社



电子信息前沿技术丛书



Applications in Communication Technology of Brillouin Scattering in Optical Fiber

光纤中的布里渊散射效应 在通信技术中的应用

王如刚 周锋 著

Wang Rugang Zhou Feng

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

为了获得高频通信系统中的可调谐微波信号源,本书首先分析了高频微波信号光学产生方法的国内外研究进展;在分析光纤中受激布里渊散射效应的基础上,设计了单纵模环形腔布里渊激光器;利用获得的单纵模激光器,提出了基于单纵模激光器融合布里渊散射移频单元的多带宽高频微波信号产生的方法,并分析了微波信号的性能;提出并实验验证了多环结构受激布里渊散射效应的微波信号产生的方法;从理论上分析了受激布里渊散射放大效应的基本原理,提出了获得多波长布里渊激光器的方法,利用该多波长激光器,实验分析获得了高频微波信号产生的方法;从理论上分析了布里渊散射效应在通信系统中的信号传输速度的控制性能,提出了高频通信系统速度控制系统的方法,并分析了其性能。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

光纤中的布里渊散射效应在通信技术中的应用/王如刚,周锋著. —北京:清华大学出版社,2017
(电子信息前沿技术丛书)
ISBN 978-7-302-45678-0

I. ①光… II. ①王… ②周… III. ①布里渊散射—应用—光纤通信—研究 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 283983 号

责任编辑:文 怡

封面设计:李召霞

责任校对:梁 毅

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:11.25 字 数:171 千字

版 次:2017 年 2 月第 1 版 印 次:2017 年 2 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:49.00 元

产品编号:072231-01

前言

FOREWORD

随着互联网业务和网络电视等多媒体业务的迅速发展,无线通信技术已经发展到了新的阶段,但随着用户数量的增多以及对带宽需求的增加,无线通信系统又面临频谱资源受限的挑战。为了解决此问题,无线通信技术必须拓宽频率范围,将通信频段提高至微波信号频段,因此,光载无线技术应运而生。光载无线技术结合光纤通信技术和无线通信技术,充分利用了光纤低损耗、高容量以及抗电磁干扰等优点,能够实现低成本、大容量的超宽带无线接入和有线传输,为下一代融合接入网提供了技术支撑。同时,光载无线技术既能满足信号带宽的需求,又能克服未来的光无线接入网中的频率拥堵等问题。在光载无线技术中,微波信号的光学产生是实现低成本高性能光载无线传输系统的关键,而使用电子器件产生微波信号的传统方法受限于电子器件的瓶颈,对产生高频微波信号具有一定的挑战性。目前,使用光学方法产生微波信号是最有前途的解决方案,在过去的几年里,国内外对光生微波技术开展了大量的研究。从这些研究可以看出,布里渊散射效应是光纤中常见的一种散射,其散射光相对入射光具有一定的频移,且频移量与外界环境的温度和应力呈线性关系。利用光纤中的布里渊散射特性可以实现微波信号的产生、交换及获取等,这些方面都是实现光载无线技术的核心。因此,系统地研究光纤中的布里渊散射效应在光载无线通信技术中的应用,不仅具有学术价值,而且具有十分重要的社会意义。

本书首先讨论光纤中泵浦光场、斯托克斯光场和声波场之间相互作用

而产生自发和受激布里渊散射的机理,分析光纤中布里渊散射的性能,设计单纵模布里渊激光器;其次,利用获得的单纵模布里渊激光器,提出基于单纵模激光器融合布里渊散射移频单元的多带宽微波信号产生的方法,并分析产生的微波信号性能;在此基础上,提出并实验验证多环结构的布里渊散射效应的微波信号产生方法;从理论上分析受激布里渊散射放大效应的基本原理,利用受激布里渊放大效应结合获得的单纵模布里渊激光器,提出多波长布里渊激光器的方法,利用该多波长布里渊激光器设计高频微波信号产生的方案;分析布里渊散射光电振荡器微波信号产生的基本原理,提出利用光注入DFB激光器结合液芯单模光纤布里渊散射效应的光电振荡器微波信号产生的技术;最后,分析多布里渊增益线的纵模间隔对信号延迟和增益控制性能的影响,获得优化的纵模间隔,针对目前的高速通信系统,提出基于半导体激光器的高频通信速度控制系统,通过实验分析可调谐和多通道宽带控制系统的性能。

希望以上的研究方法和观点能够对我国微波信号光学产生技术的研究与实现提供一些技术上的支持,对关注光纤通信和光纤传感技术发展的学者以后的进一步研究提供一些借鉴,为光电子技术企业经营者的理性决策提供一些参考。

本书得到了盐城工学院学术专著出版基金、江苏省六大人才高峰项目(DZXX-028)、中国博士后科学基金资助项目(2015M571637)、江苏省产学研前瞻性项目(BY2015057-39,BY2016065-03)、江苏省高校自然科学基金项目(14KJB510034)和盐城工学院人才引进(KJC2013014)项目的资助。

由于作者水平有限,时间仓促,不足和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2016年8月

第 1 章 绪论	1
1.1 研究意义	1
1.2 高频微波信号光学产生方法的国内外研究现状	2
1.2.1 外部调制方法	2
1.2.2 光注入半导体激光器方法	4
1.2.3 光电振荡器微波信号产生方法	6
1.3 研究内容分析	12
1.4 研究思路与框架结构	13
1.4.1 研究思路	13
1.4.2 研究框架结构	14
参考文献	15
第 2 章 光纤中的布里渊散射效应及其激光器设计	21
2.1 光纤中的布里渊散射	22
2.1.1 自发布里渊散射	22
2.1.2 受激布里渊散射	25
2.2 光纤中布里渊散射特性	30
2.2.1 布里渊散射谱特性	30
2.2.2 布里渊频移与温度和应力的关系	33
2.3 光纤中布里渊散射阈值分析	36

2.4 基于布里渊散射的单纵模激光器设计	42
2.4.1 布里渊激光器理论分析	42
2.4.2 实验系统	46
2.4.3 实验结果与分析	47
2.5 本章小结	50
参考文献	50
第3章 基于单环结构的布里渊散射效应的宽带微波信号产生技术 ...	53
3.1 差频结合平衡检测基本原理	54
3.2 基于布里渊散射的可调微波信号产生的实验系统	57
3.2.1 温度控制系统设计	59
3.2.2 性能分析	64
3.3 可调谐微波信号产生的实验结果与分析	66
3.4 本章小结	72
参考文献	73
第4章 基于双环结构的布里渊散射效应的宽带微波信号产生技术 ...	76
4.1 光外差法产生微波信号原理	76
4.2 基于布里渊散射的可调微波信号产生机理	79
4.3 基于布里渊激光器的可调谐微波信号产生方法	81
4.3.1 实验系统	81
4.3.2 实验结果与分析	82
4.4 本章小结	86
参考文献	87
第5章 基于多波长布里渊激光器的可调谐微波信号产生技术	89
5.1 受激布里渊散射放大效应理论分析	90
5.2 基于布里渊散射放大效应的多波长激光器研究	94
5.2.1 实验结构	94
5.2.2 实验结果与分析	95
5.3 基于多波长布里渊激光器的微波信号产生研究	98

5.3.1 实验装置	98
5.3.2 结果与分析	100
5.4 本章小结	105
参考文献	105
第 6 章 基于布里渊散射光电振荡器的高频微波信号产生技术	108
6.1 光电振荡器基本原理	109
6.2 基于布里渊散射光电振荡器的微波信号产生技术的 阶段性研究成果	111
6.3 基于布里渊散射光电振荡器微波信号产生方法的 研究计划	118
6.3.1 研究的主要内容	120
6.3.2 拟采取的研究方法和技术路线	122
6.4 本章小结	126
参考文献	126
第 7 章 光纤中的布里渊散射效应在通信信号速度控制系统中的应用 ...	128
7.1 基于布里渊散射效应的通信信号传输速度控制理论分析	128
7.2 基于布里渊散射效应的单通道通信信号速度控制 系统实验研究	141
7.2.1 半导体光放大器性能分析	141
7.2.2 实验装置	149
7.2.3 实验结果与分析	150
7.3 基于布里渊散射效应的多通道通信信号速度控制 系统实验研究	159
7.3.1 实验装置	159
7.3.2 实验结果与分析	160
7.4 本章小结	166
参考文献	167

绪 论

1.1 研究意义

随着信息技术的迅速发展,信息的交换及传输量飞速增加,对带宽的需求随之增加,此外,系统的灵活性也是不可缺少的要素,因此,无线与宽带技术将成为通信和信息系统需要重点关注的技术。目前,电子技术的发展速度已经远远赶不上信息容量的急速增长,出现了带宽的限制和交换系统的电子瓶颈等问题,因此,提出了建立全光信息系统的要求。目前,全光通信系统中单信道传输速率已突破 100Gb/s,全光信息系统信息传输容量也已突破 10Tb/s,且正向更智能、更高速率的目标发展。在高速无线通信系统中,高质量的可调微波源起着至关重要的作用,光学技术在可调谐微波信号源的实现方面显示出电子技术无法比拟的优势,充分利用光学技术的带宽优势实现高频可调谐微波信号的产生和处理就显得非常重要。目前,报道的微波信号光学产生的方法,主要集中在利用强度或者相位调制器的外部调制方法^[1]、注入锁定^[2-5]和光电振荡器(OEO)^[6-8]等方法。通过这些方法的研究,使得光生微波信号源的质量有了一定的提高。外调制和

光注入的方法实现原理相对简单,但所产生的微波信号相位噪声比较高,差频光的转换效率较低;光电振荡器的方法主要是采用融合光信号和电信号的复合谐振腔原理产生低相位噪声的微波信号,可以有效地降低相位噪声,获得较高质量的微波信号,但在实现宽带调谐方面就显得相对复杂和困难。从这些报道中可以看出,光生微波信号产生方法是获得高频微波信号的有效手段,受到国内外研究人员的高度关注,但基于光生技术的高稳定、低相位噪声和大调谐范围的高性能微波信号的产生,仍然是有待进一步解决的技术难题。

1.2 高频微波信号光学产生方法的国内外研究现状

1.2.1 外部调制方法

由于具有良好的可调谐性和较低的相位噪声等优点,利用外部调制产生微波信号的方法成为最重要的方法之一,在该方法中,低频微波信号被调制到载波上产生高阶边频信号,再通过滤波器选取所需的边频信号获得微波信号。

1992年,J. J. Oreilly 等首次利用马赫-曾德(M-Z)干涉仪的外部调制方法获得了微波信号,通过调节调制器的偏置电压,有效抑制高阶边带信号,获得了36GHz的倍频信号^[9]。随后,国内外研究人员做了大量工作,并取得了可喜的进展^[10-15]。例如,2013年,L. Gao 等提出了相位编码的微波信号产生方法,该方法使用两个串联的极化调制器,误码分析仪发出的信号驱动第一个调制器,用来控制偏振光的偏振方向,微波信号源驱动第二个调制器,同时给误码分析仪提供一个参考信号,确保两个调制器的偏振方向相同,利用偏振控制器结合偏光器构成马赫-曾德干涉仪调制器,获得了10GHz、20GHz、30GHz和40GHz的可调谐微波信号,其系统结构如图1-1所示^[14]。

2015年,Hao Chen 等提出并实验验证了一种可调谐微波信号产生的

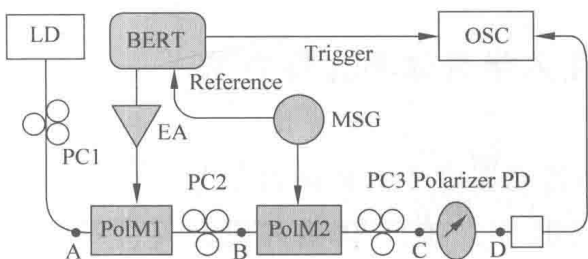


图 1-1 相位编码的微波信号产生系统的结构示意图

方法,设计了基于马赫-曾德干涉仪和色散介质的双通道微波光子滤波器,利用该滤波器选取外部调制器的高阶边带信号,调节马赫-曾德干涉仪中的可变光纤延迟线长度,实现了输出微波信号的可调谐性,获得了高频可调谐微波信号的输出,其系统结构如图 1-2 所示^[15]。

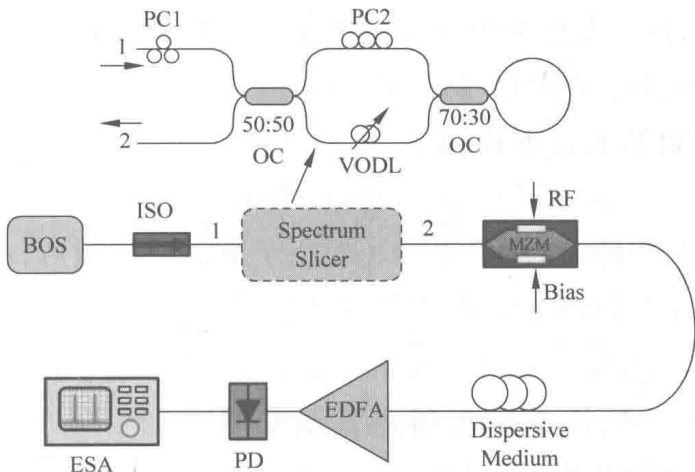


图 1-2 外部调制的可调谐微波信号产生系统的结构示意图

经过近年来的发展,利用外部调制的方法获得微波信号取得了一定的进展,已经成为一种高效的微波产生方法,但是在这类方法中,必须首先使用高速调制器和微波信号源驱动调制器产生移频信号,再通过光学滤波器选择合适的边带成分光,获得所需的微波信号。通过微波信号直接调制半导体激光器具有控制方法简单和较高稳定性的优点,但是,由于半导体激光器自身内部的特点,使得输出的微波信号频率和调制深度受到一定的限制,同时,由于外部调制器的插入损耗较高以及需要高功率激光器,这些都将限制该方法的实用性。

1.2.2 光注入半导体激光器方法

光注入半导体激光器产生高频微波信号的技术在 20 世纪 80 年代由 Goldberg 等首先提出^[16]。随后,国内外研究人员对注入锁定激光器光生微波/毫米波方法进行了深入广泛的研究^[17-23]。2013 年,Junping Zhuang 等研究了单周期振荡的光注入双环结构的微波信号产生方法,利用单周期振荡特性,光注入半导体激光器可直接产生具有调频特性的单边带信号,有效抑制了光纤色散及非线性效应,获得了 45.424GHz 的微波信号,其线宽小于 50kHz^[20]。2013 年,Garett J. Schneider 等提出了基于边带注入锁定激光器的微波信号产生系统,利用低频微波信号源驱动非线性电光器件产生宽带光束,该光束作为种子光注入从激光器中,当微波信号源的驱动信号从 0.5~4GHz 变化时,获得了 0.5~110GHz 的微波信号,若使用高性能的相位调制器和光电检测器,可以获得大于 300GHz 的微波信号输出,其结构如图 1-3 所示^[21]。2014 年,Li Fan 等研究了单周期振荡的光注入非线性动力学特性,通过采样 1/3 和 1/4 次谐波调制后,产生的微波信号线宽出现了显著的降低情况,分析了不同功率和频率的次谐波对线宽变窄效应的影响,其结构如图 1-4 所示^[22]。2015 年,Yang Jiang 等在分布反馈半导体激光二极管中注入锁定正弦信号,获得了 9GHz、10GHz 和 12GHz 的三角谐波信号^[23]。同年,Yu-Han Hung 等研究了基于光学调制边带注入锁定的单周期非线性动态微波信号产生技术,携带高相关调制边带梳的信号同时注入锁定再生光载波和较低的振荡边带中,建立两个频谱分量之间的相位锁定,获得了 40GHz 的微波信号,其结构如图 1-5 所示^[24]。

从目前报道的研究成果看,相对于调制技术和差频技术,光注入产生微波信号的方法具有很大的优势,但是,利用该方法获得的微波信号线宽较宽,为了减小信号的线宽,研究人员做了大量的工作,获得了一定的成效,目前,微波信号的线宽可以降低到 1kHz。虽然这些方法可以有效地获得高频可调谐微波信号,但是也存在一些需要解决的问题。一方面,这些方法需要高频微波源做驱动信号才能获得所需的信号输出,这样增加了系

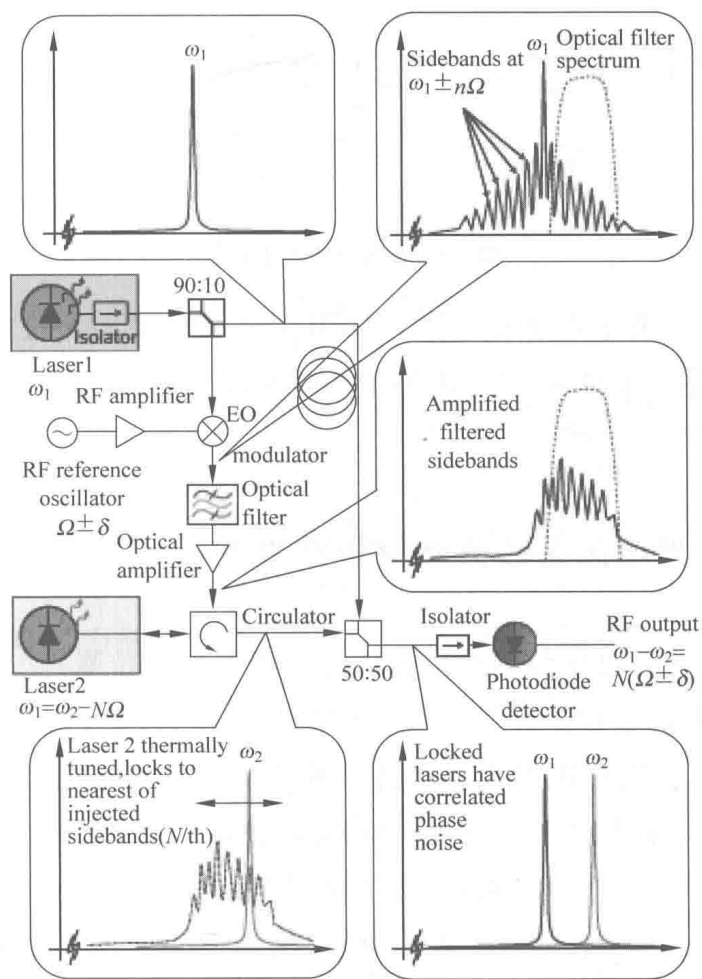


图 1-3 基于光注入锁模激光器的微波信号产生装置

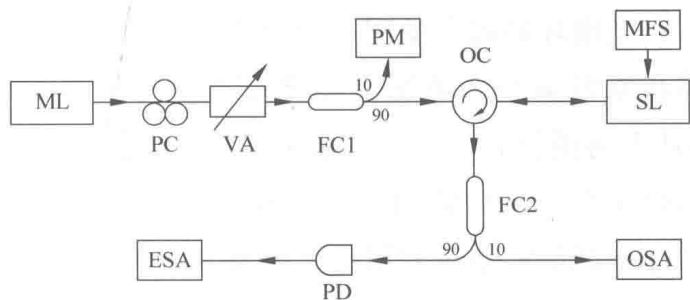


图 1-4 光注入和双环结构的微波信号产生装置

统的成本；另一方面，由于电子器件带宽的限制，使得高频信号很难注入半导体激光器中。同时，目前光注入锁定产生微波信号的研究大多基于光注入条件下的 FP 半导体激光器可以对注入信号的特定波长或模式进行增益

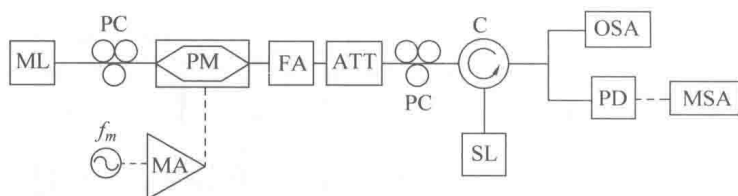


图 1-5 微波信号产生装置

放大实现,然而,关于光注入条件下 DFB 激光器的增益特性等方面研究并不多见,激光注入条件下产生微波信号的频率调谐范围及相位噪声性能还有待进一步提高。

1.2.3 光电振荡器微波信号产生方法

微波信号的光电振荡器产生方法具有极低的相位噪声、宽带连续可调谐等优点,该方法是目前高性能微波信号产生的热门方法之一。1995 年, Yao 和 Maleki 首次利用电光振荡器(OEO)获得了微波信号,该方法是在光电反馈环路中使用电光调制器(EOM)、光纤延迟线、光电检测器、电放大器和滤波器等,获得了 75GHz 的微波信号,在截止频率为 10kHz 时,相位噪声达到了 -140dBc/Hz ^[25,26]。之后,国内外研究者提出的基于半导体光放大器、改变光纤延迟线、利用不同调制器的结构等方法获得了显著的成果^[27-35]。例如,2014 年,Z. Tang 等提出了一种利用双驱动 M-Z 调制器的光电振荡器,在光电环形腔中使用了两个光电检测器、电带通滤波器,电放大器、移相器和双驱动 M-Z 调制器,分析了偏置电压对输出信号的影响,获得了 10.66GHz 的微波信号,系统结构如图 1-6 所示^[35]。在这些结构中,必须使用高频电放大器和驱动器等去获得反馈信号,由于光电调制器的带宽及转换效率的限制,使得利用电光调制器的常规光电振荡器输出信号自由谱宽较小。

为了抑制相位噪声及增加自由谱宽等,研究人员提出了两个环形腔结构的光电振荡器。2014 年,P. Zhou 等提出了利用电吸收调制激光器的双环光电振荡器,该结构由一个电环和一个光环构成,在电环中包括电环形器、电放大器、扰偏器和电耦合器,在光环中包括环形器、掺铒光纤放大器

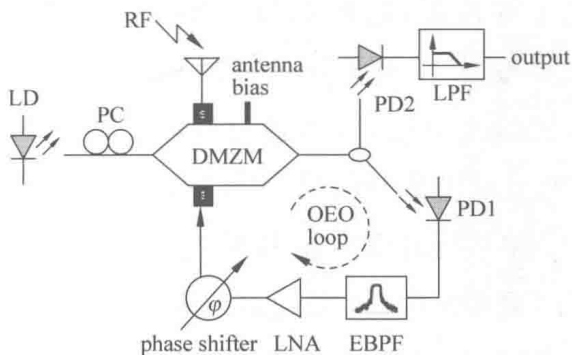


图 1-6 基于双驱动马赫-曾德调制器的微波信号产生系统

和 3km 的普通单模光纤, 获得了 9.945GHz 的微波信号^[36]。同年, Wang 等人提出了在赛格耐克环中使用偏振调制器双环结构的光电振荡器, 在光电环中包括极化调制器、光电检测器、电滤波器、电放大器和 240m 的普通单模光纤作为储能元件, 获得了 39.74GHz 的微波信号, 系统结构如图 1-7 所示^[37]。

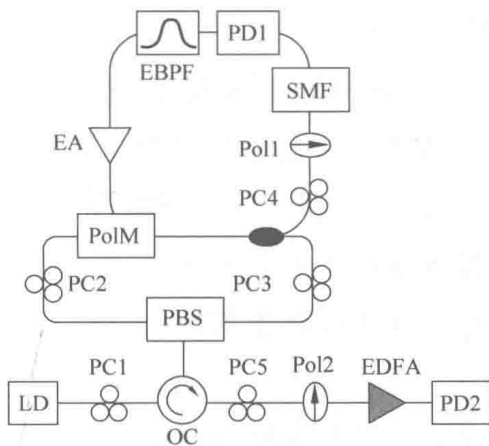


图 1-7 基于赛格耐克环的单一极化调制器的光电振荡器系统结构

从这些研究可以看出, 为了获得低相位噪声, 必须利用较长的光纤环去提高振荡环的品质因子。然而, 较长的光纤环引起具有较小模式间隔的振荡模, 同时必须使用具有高品质的电滤波器来获取最终的振荡模。目前, 由于电带通滤波器不具有较大的频率调谐范围, 限制了产生微波信号的调谐范围。随着微波光子滤波器的发展, 光电振荡器的调谐范围有了一定的增加。2012 年, Wangzhe Li 等提出了利用移相光纤光栅和两个相位

调制器形成带通光子滤波器,通过调节激光器的波长,获得了 3~28GHz 的可调谐微波信号^[38]。2013 年,Xiaopeng Xie 等提出了相位调制器和可调谐光纤滤波器构成的光电振荡器,通过调阶带通滤波器的带宽,获得了 4.74~38.38GHz 的可调谐微波信号^[39]。2014 年,他们通过增加相位调制器和放大器的带宽,将可调谐微波信号展宽到 57.5GHz^[40]。同年,Jiejun Zhang 等提出了利用宽带光源、可变延迟线和色散元件构成的带通微波光子滤波器的光电振荡器,通过调节可调延迟线的长度获得了 1~12GHz 的可调微波信号^[41]。2015 年,Changlei Guo 等提出了利用布里渊微腔激光器获得了双带宽的可调谐微波信号,中心频率为 11GHz 和 22GHz,调谐范围分别为 40MHz 和 20MHz^[42],其结构如图 1-8 所示。为了进一步扩展振荡器的频率范围,倍频和四倍频等技术被应用到光电振荡器中。2012 年,Wangzhe Li 等利用偏振控制器、强度调制器和移相光纤光栅等构成光电振荡器,通过倍频技术获得了 16~28GHz 的微波信号,利用四倍频技术获得了 30~42GHz 的可调谐微波信号^[43]。2013 年,Huanfa Peng 等利用陷波滤波器抑制载波信号,通过倍频技术获得了 40.78~57.12GHz 的微波信号^[44]。2015 年,Wei Li 等提出了利用两台激光器耦合注入由偏振调制器、滤波器、680m 的单模光纤和光电检测器等构成的光电振荡器中,通过调节滤波器的带宽和倍频技术获得了 8.8~37.6GHz 的可调谐微波信号,这些倍频和四倍频信号的相位噪声远高于基频信号的相位噪声,其实验结构如图 1-9 所示^[45]。

受激布里渊散射是入射光与光纤介质中声子之间的相互作用,受激布里渊散射效应被广泛地应用于光纤无线电系统和微波信号的光子处理中,利用其窄带放大效应实现单边带调制,结合相位调制器实现单通带微波光子滤波器等。基于受激布里渊散射放大的带宽为几十兆赫兹,通过直接调节受激布里渊散射的泵浦波长可以将放大的中心频率进行展宽,同时,由于其具有较低的相位噪声和无须微波源等而受到研究人员的广泛关注^[46-51]。1997 年,X. S. Yao 首次利用布里渊散射效应提高光电环形腔的增益,获得了 12.8GHz 的微波信号^[46]。2013 年,王如刚等利用光纤中的瑞利散射和布里渊散射的特性,通过改变注入光纤的泵谱功率,产生瑞利

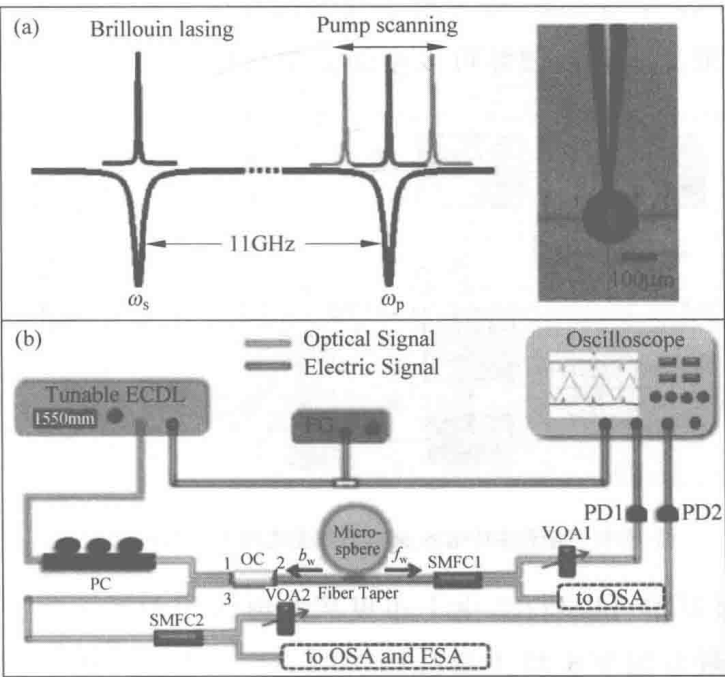


图 1-8 基于布里渊微腔激光器的微波信号产生结构示意图

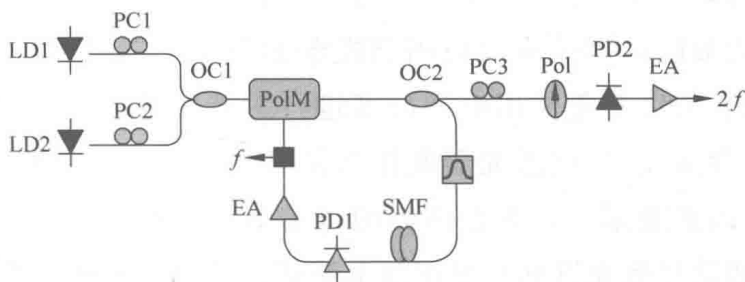


图 1-9 倍频光电振荡器系统结构

散射和布里渊散射,获得单纵模布里渊激光器,通过控制激光器中增益光纤的温度进行频率调谐,获得了双带宽的高频可调谐微波信号,信号的调谐范围为 10.77~11.098GHz 和 21.525~22.114GHz,微波信号的波动小于 0.3MHz,具有较高的频率稳定性^[50]。2013 年, *Nature Communications* 报道了 J. Li 等首次提出基于芯片结构的布里渊散射介质作为储能元件的光电振荡器,利用布里渊散射效应的储能芯片与光电环形腔结构的微波产生结构,该环形腔结构中包含声光调制器、环形器、光电检测器、滤波器和分束器等器件,获得了 21.7GHz 的微波信号,实验装置如图 1-10 所示^[51],同时,他们又利用硅基楔形盘谐振器获得了 1064nm 的低噪声布里渊激光