

光电振荡器的性能及应用

Performance and Applications of Optoelectronic Oscillator

江 阳^{1,2} 于晋龙² 胡 林¹ 张 莉¹

¹ 贵州大学 理学院 贵州省光电子技术与应用重点实验室, 贵州 贵阳 550025

² 天津大学 电子信息工程学院光纤通信实验室 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072

Jiang Yang^{1,2} Yu Jinlong² Hu Lin¹ Zhang Li¹

¹ *Guizhou Provincial Key Laboratory for Photoelectronic Technology and Application, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China*

² *Laboratory of Optical Fiber Communication, Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science, Ministry of Education, School of Electronic Information, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

摘 要 在对光电振荡器(OEO)的工作原理和特性进行阐述和分析的基础上,总结回顾了边模抑制、降低相位噪声、提高频率稳定性等改善光电振荡器性能的各种技术手段和方案,评述了基于光电振荡器的光脉冲产生、时钟提取等应用,讨论了制约光电振荡器实用化的因素,提出了可能的发展方向和改进措施。

关键词 光通信; 光电振荡器; 相位噪声; 边模抑制; 频率稳定性; 时钟提取; 光脉冲

Abstract Though explicating and analyzing the mechanism and character of optoelectronic oscillator (OEO), the techniques and schemes for improving OEO's performance are reviewed, such as suppressing side-mode, decreasing phase noise and improving frequency stability. Some applications based on OEO, such as optical pulse generation and clock recovery, are also presented. Finally, the restrictions and possible solutions for OEO's development are discussed.

Key words optical communication; optoelectronic oscillator; phase noise; side-mode suppressing; frequency stability; clock extracting; optical pulse

中图分类号: TN929.1.1 doi: 10.3788/LOP20084510.0039

1 引言

高质量的微波信号在民用通信、电子测量、电子对抗、雷达等方面都有广泛的应用。在传统的微波信号产生方法中,介质振荡器在低噪声、高谱纯度或可调谐的条件下,表现往往不尽如人意。石英虽然可以获得品质因素(Q值)很高的稳定晶振,却不能直接得到高频信号。与之相比,光电振荡器(OEO)作为一种新型的微波信号发生器能产生频率从几个到上百吉赫兹, Q值高达 10^{10} ,低相位噪声(工作频率为10 GHz时,低于 -140 dBc/Hz@10 kHz)的高品质信号并具有可调谐性和光、电两种输出,是一种非常理想的信号发生装置^[1,2]。

2 光电振荡器的工作原理及特性

光电振荡器一般是由光源、强度调制器、滤波器、光电探测器(PD)构成的一个正反馈环路。它利用调制器以及光纤低损耗的特性将连续光变为稳定的、频谱干净的射频/微波信号,其结构如图1所示。激光器发出的连续光经电光调制器后通过光纤传输进入光电探测器,光电探测器把光转变为电信号后进入选频、放大和反馈调制器件。在此过程中有源器件会产生不同频率的噪声扰动,这些扰动在输出端被滤波器滤出希望起振的频率,并用来反馈控制电光调制器。环路中的放大器提供了增益,信号经过多次循环后,就能建立起稳定的振荡,其振荡频率主要由滤波器的通带

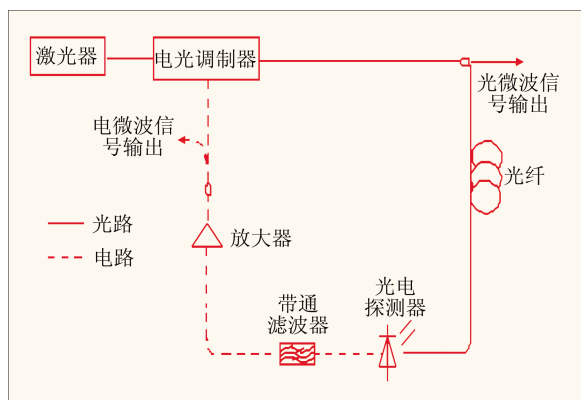


图1 光电振荡器原理示意图

特性决定。经过理论分析和实验,环路中能量的衰减时间(介质的储能能力)决定了振荡器的 Q 值。这里 $Q=2\pi f\tau_a$,其中 f 为振荡频率, τ_a 为能量衰减时间。因此只要环路中的光纤具有足够的长度,光电振荡器就可以产生比传统振荡器更高品质的信号输出^[2]。此外,研究还指出光电振荡器的相位噪声随其频偏量 f' 呈二次方下降,而对于固定的 f' ,相位噪声随环路延时呈二次方下降,并且与振荡器的工作频率无关。尽管相位噪声不会随环路延时的增加而无限减小[信噪比最终受制于激光器的相对强度噪声(RIN)]^[2],但是使用长光纤的仍是一个必然的趋势。

光电振荡器的性能虽然突出,但是它的系统构成也决定了它的一些不足。首先,为了得到高 Q 值的信号输出,一般需要在腔内使用长光纤,而此时腔长长度还决定了起振模式之间的间隔,腔越长,模式间隔就越小。理论上可以用一个足够窄的滤波器滤除不需要的模式,但在器件的获得上有相当的困难;其次,在信号的相位噪声方面,光源的相对强度噪声、光电探测器以及电放大器都会对最终所产生微波信号的相位噪声造成影响。滤波器、放大器带宽过大也会使通带范围内的信噪比降低,影响起振频率的品质;最后,由于环路主要由光纤构成,其腔长容易受到环境温度、应力等的影响发生变化,造成起振基频的变化使输出频率发生漂移或跳频;另外,长光纤占有比较大的体积,对整个光电振荡器系统的小型化、集成化造成了障碍。解决以上这些问题是光电振荡器最终实用化的一些关键工作。

3 光电振荡器的性能研究进展

3.1 单模起振与边模抑制

根据光电振荡器的工作原理,起振模式的间隔 Δf 由环路对信号的延时决定,可表示为 $\Delta f=1/\tau$,这里 τ

为延时量^[3]。当环路中使用光纤长度达到 1 km 时,则模式间隔约为 200 kHz。目前的商用电滤波器难以提供足够窄的带宽实现单一模式的选择。为了解决这一困难,研究者分别提出了高 Q 光子滤波器代替长光纤储能和采用多环路结构抑制边模的光电振荡器方案。

采用高 Q 值的滤波器实现单一模式起振的想法是很容易理解的。在众多光子微波滤波器中,回音廊模式谐振器 [whispering-gallery mode (WGM) resonators] 是一个典型代表并被成功地用于光电振荡器的选频滤波^[4,5]。它由电介质材料加工成亚毫米结构的盘(圆柱)型谐振腔,通过波导输入,输出光信号。光信号在谐振腔中反复振荡,完成选频输出。以微盘结构为例,其剖视图如图 2 所示^[6]。这种 WGM 谐振器的选频特性与法布里-珀罗(F-P)滤波器类似,不像长光纤腔那样具有很多小间隔边模,可通过控制电压、应力或温度变化实现调谐功能,其 Q 值在 10 GHz 的工作频率下可达到 10^6 ,效果等效于数千米的光纤环路,具有很好的选模特性,为光电振荡器小型化奠定了良好的基础^[5,7]。但是这种 WGM 谐振腔也并非没有缺点:首先,这种滤波器具有洛伦兹线性的滤波窗口,为了满足对边模抑制要求比较高的场合的需要,有时必须多个级联使用;其次,在同时要求高 Q 值和大范围可调谐方面还不理想;最后,这种结构的滤波器工作稳定性易受环境温度、应力的影响,因此需要一些辅助的外围温控;另外,它的耦合损耗也是一个不容忽视的影响。

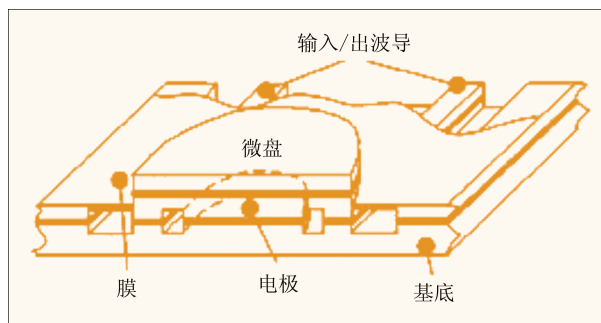


图2 微盘结构微谐振腔滤波器剖视图

多环路结构是另一类抑制边模的有效方法,如图 3 所示。假设一个光电振荡器结构中包含两个环路,则每一个环长都决定了一套起振的模式,当两个环路共同作用时,由于两套模式之间的增益竞争,只有同时满足两套模式的频率成分才能稳定起振,加上滤波器的频率选择作用,最终可以得到比较理想的单模输出。此时输出信号的边模间隔由短环决定,而 Q 值和

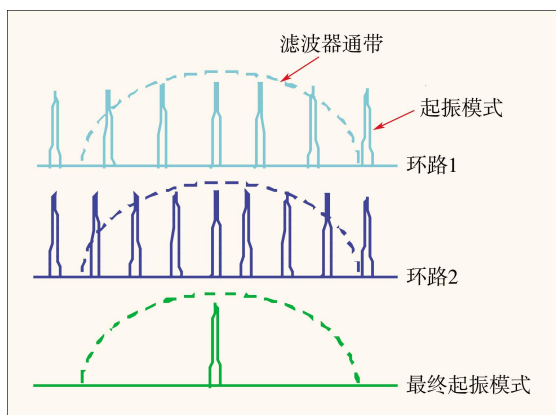


图3 多环路抑制边模原理示意图

相位噪声性能由两路环长的平均值决定^[3,8]。环路路数越多,对于单模选择效果越好。在已报道的具体实施方案上,一般有四种做法。

X. Steve Yao 等^[3]在2000年最早提出了光电混合多环路方案。在该方案中,调制器输出的光信号被耦合器分为两路并各自通过独立的光电转换步骤后在电域进行耦合用于反馈调制,形成双环路。它的一个显著优势在于反馈调制的微波信号在电域耦合形成。这种耦合不会引入噪声,因此可以保证整个系统的性能不恶化。虽然这是一种成功的方案,但是它的不足之处也很明显。由于每个环路都需要一套独立的光电探测、滤波、放大等器件,使得系统结构比较复杂,成本较高,有源器件的数量增加也增添了引入噪声的可能。

基于最初方案,2007年,Kwang-Hyun Lee 等^[9]提出了具有一路独立电环路的双环路结构。它包括一个由电放大器和滤波器组成的短腔电振荡环以产生电微波信号,其部分输出耦合进入一个长腔光电振荡器的电域部分进行光电混合振荡。这种方案通过长光纤的储能效力极大地降低了注入信号的相位噪声,并且获得了双环路抑制边模的效果。实验结果显示,这种结构最终输出信号的相位噪声性能与电环路的注入功率有关,在较大注入功率条件下,输出信号的相位噪声较小。此外光电振荡器环路中光纤的长度越长,噪声性能越好。在30 GHz工作频率下,电环注入功率接近饱和时,所得信号的边模得到了50 dB的抑制,注入信号的相位噪声减少了18 dB@10 kHz,最终为-118.5 dBc/Hz@10 kHz。可以看出这种方案虽然只需要一个光电探测器件,但是电放大、电滤波器仍需两套,系统成本较高,并且电环路部分一般会有较大的连接损耗和噪声引入,和最早的方案相比没有

明显优势。

另一类双环路结构由双振荡器构成。Weimin Zhou 等^[10]提出了采用两个光电振荡器的注入锁定方案,改进了双环路结构在抑制边模的同时不能有效利用长腔降低相位噪声的缺陷。方案中先利用长光纤的光电振荡器作为主振荡器产生一路具有高Q值低噪声并具有许多小间隔边模的信号后,注入一个短腔长的第二级光电振荡器。在第二级光电振荡器中,信号的Q值和相位噪声性能得到保持而边模受到短腔与滤波器的再次选模得到消除,最终输出高品质的微波信号。这种方案的实验演示显示出了极好的效果,在10 GHz工作频率下,相位噪声可达-100 dBc/Hz@ (10~100 Hz),边模被抑制到了-140 dBc/Hz以下。但是该方案的系统结构比较复杂,成本为普通光电振荡器的两倍,系统体积也大。

2007年,作者提出了全光域分、合路的双环光电振荡器结构^[11]。系统中,双环路由偏振分束器(PBS)把连续光能量分成偏振方向相互垂直的两部分,在进入光电探测器前,再用偏振合束器(PBC)合为一路。采用PBS和PBC来形成双环结构的优点在于:首先,分出两臂中的光偏振方向相互垂直,这就保证了在合束时两路光不会因为随机的干涉作用造成振荡频率的随机跳变和拍噪声的产生;其次,采用这种结构不需要在普通单环路光电振荡器的基础上增加有源器件,避免由此带来的电噪声,同时获得双环路结构对边模的抑制效果。在12 GHz工作频率下,显示出良好的性能^[12]。

3.2 抑制相位噪声

相位噪声是评价微波信号质量的一个关键指标。在光电振荡器系统中,其输出信号的相位噪声主要来源于光电探测器、放大器以及激光器等有源器件的热噪声、散射噪声、相对强度噪声。前面已经提到,使用长光纤可以有效地降低相位噪声,但不会无限减小。因此,一个直接降低相位噪声的方法是采用高性能的器件以减少噪声的引入,如使用高Q值滤波器可以降低带内的噪声;优质的放大器、光源也可以提高光电振荡器噪声性能。在-143 dBc/Hz超低相位噪声信号产生的实验中,就使用了具有很低相对强度噪声的Nd:YAG激光器^[13]。此外,在特定器件条件下,研究者也提出了一些通过优化光子微波链路和改变器件工作方式的方法以降低光电振荡器相位噪声。

Danny Eliyahu 等^[14]通过研究激光器相对强度噪声与微波信号噪声之间的转换关系指出,利用有源器

件的饱和工作状态可以抑制相对强度噪声,提高光电振荡器的性能。理论和实验表明,在光电振荡器环路中插入一个半导体光放大器(SOA)并使其工作在饱和状态[利用其自增益调制(SGM)效应],可以对相对强度噪声产生约 10 dB 的抑制。此外,若使光电探测器工作在饱和状态,也可以大幅提高输出的微波信号质量。对于系统中电放大器引入的 $1/f$ 噪声,可以利用多个光电探测器接收光信号并采用载波抑制技术进行抑制^[14,15]。载波抑制技术与多环路结构相配合,也可以在抑制相位噪声的同时构成一个锁相结构以提高光电振荡器输出的频率稳定性。

3.3 频率稳定性

影响光电振荡器输出频率的稳定性因素有两个方面:一是腔长受环境的影响发生变化,使得起振模式发生改变造成输出频率的不稳定;二是由于光电振荡器系统中使用的滤波器通常具有比较大的通带范围,所以在环路的增益带宽内会出现很多边模。这些边模中的一个可能会在腔长的变化过程中获得足够增益而代替原有的起振频率,造成起振频率的不稳定。针对这些起因,有下面几种改善措施。

为了消除环境温度变化的影响,可以采用对温度不敏感的特殊光纤(如实芯光子晶体光纤:SC-PCF)代替普通单模光纤(SSMF)构成系统链路,对频率稳定起到良好的效果^[16]。然而,SC-PCF 的使用在获得系统对温度变化具有更大容忍性的同时却失去了 SSMF 的一些优势。由于现有光子器件的尾纤大多为 SSMF,因此在与 SC-PCF 连接时会有比较大的连接损耗;同时 SC-PCF 自身结构的缺陷也会造成很大的传输损耗,在利用光纤作为储能介质的光电振荡器系统中,这对于输出信号的 Q 值和相位噪声性能都非常不利。

将系统与环境隔离或者温度控制的方法降低环

境变化对系统的影响,也是一种提高输出信号稳定的方法。在 X.Steve Yao 等^[9]的实验中,这种实验系统被放置于一个填充泡沫的盒子里以隔绝振动带来的影响。而 D.Eliyahu 等^[13]所做的实验经过温度控制的光电振荡器系统频率稳定性从 $-8.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 提高到 $-0.1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,短期稳定性达到 0.02×10^{-6} ,由腔长变化引起的跳频等现象被消除。

另一个提高频率稳定性的方法是在系统中使用高 Q 值的滤波器,严格选定一个模式起振,强烈抑制边模,则光电振荡器的输出频率稳定性可以得到极大的提高。D.Strekalov 等^[14]对高 Q 值滤波器的稳频作用进行了详细的分析,并演示了高 Q 值介质滤波器和利用铷原子蒸气室中的电磁诱导透明效应,锁定起振频率的实验。F.Quinlan 等^[17]对利用高精度的 F-P 滤波器用作高 Q 值滤波器的情况也进行了讨论。

锁相环是一种用以提高系统频率稳定性的常用方案,它同样有利于实现光电振荡器的频率稳定输出。重点介绍的是在多环路结构中通过载波抑制技术实现的锁相方案,该方案整体上同时实现了对光电振荡器输出信号的边模抑制、降低相位噪声和频率稳定,其锁相部分原理如图 4 所示^[9]。振荡器的一路光输出经由长光纤传输延时后作为参考信号被光电探测器转换为电信号,然后与一路振荡器输出的电信号耦合。仔细调节电信号的强度和相位使得两路耦合输出的一路为载波抑制输出(耦合时两信号相位差 π),一路为载波增强(耦合时两信号同相)。载波抑制输出端的载波可受到约 40 dB 的抑制,载噪比增大,该过程可以使频率(相位)的抖动转化为幅度的变化,而该信号进入放大器放大时,放大器不会饱和。被放大的信号再与一路振荡器的电输出信号(本振)进行混频,其

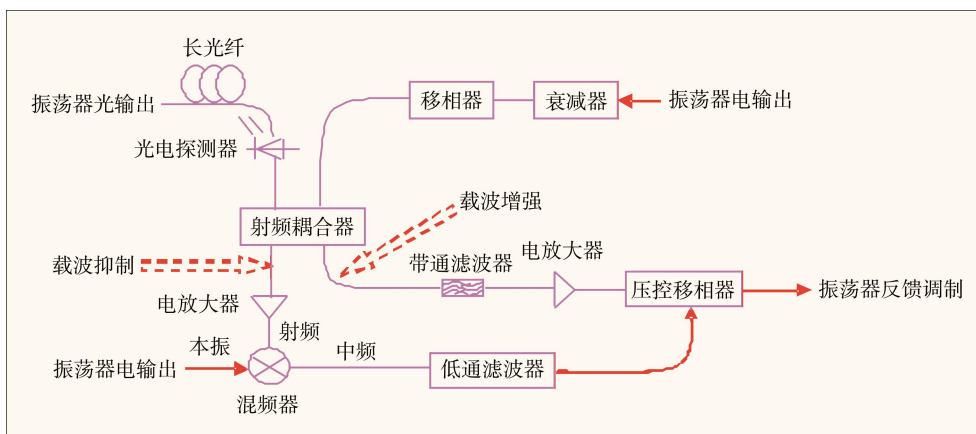


图 4 载波抑制技术实现锁相、降噪方案示意图

中频输出作用于压控移相器以调节载波增强一路的相位,然后进行反馈调制。在这样一个结构中,满足最佳载波抑制条件时,振荡环路中可以实现最大增益,因此,该方案可以保证振荡器的输出能跟踪腔长的变化,保持数小时的稳定运转。同时由于频率抖动的消除,相位噪声性能也得到了提高,而多环路对边模的抑制特性也得到了发挥,实验结果显示,在离载波 10 Hz 处的相位噪声得到了约 20 dB 的抑制。

通过注入锁定一个低频信号的高次谐波,也可以视为得到稳定高频输出的一类方法。利用一个低频稳定信号的调制非线性或其他光纤中的非线性效应产生高次谐波后注入光电振荡器,在光电振荡器中选用合适的滤波器锁定一个高频谐波信号进行反馈增强,就可以产生一个高品质的高频信号输出,并具有很好的频率稳定性,Hidemi Tsuchida 等^[18]研究演示了这类实验方案。

4 光电振荡器的应用

光电振荡器的基本功能是产生高品质的光、电微波信号,但是经过发展,也衍生出了一些新的应用方式。在这些应用中,光电振荡器的电输出部分基本保持微波信号输出,但是光输出部分出现了一些变化。

4.1 光脉冲输出

在 1997 年和 2000 年,X. Steve Yao 等^[19,20]先后分析演示了由 SOA 提供增益的光学谐振腔与光电振荡器环路混合的结构(COEO)用以产生电微波信号与光脉冲。这个方案类似于再生锁模激光器,主要区别在于 COEO 的光电环路部分需要起振,而最终输出模式受到两个环路的选模特性约束。在 2007 年,Ertan Salik^[21]演示了基于掺铒光纤放大(EDFA)提供光路增益的 COEO 结构,得到了具有 -150 dBc/Hz(在频偏 10~100 kHz 处)超低相位噪声的 9.4 GHz 微波信号输出和只有 2 fs 抖动的光脉冲输出。这种结构的光脉冲输出机理是基于光纤锁模激光器,因此为了得到高性能的输出,对光学腔的腔长稳定、色散控制和偏振保持设计有很高的要求。

另一类可行的方案是通过改变光电振荡器环路中的光电调制特性产生光脉冲。在 2003 年,Jacob Lasri 等^[22]利用电吸收调制器(EAM)替代传统方案中的马赫-曾德尔强度调制器(MZM),通过对 EAM 的偏压控制,形成较窄的调制传输窗口得到了 10 GHz 的电微波信号和光脉冲输出。若在光源部分采用多波长光源,这种结构也可以方便地产生多波长光脉冲^[23]。

这种方案的结构比较简单,但是 EAM 一般具有较大的插入损耗,所得到的脉冲宽度也较宽。此外,使用工作在增益开关条件下或采用大信号直调的半导体激光器作为光电振荡器的光源,可以不需要额外的调制器得到电微波信号和光脉冲输出,文献[24,25]分别给出了这类的实验报道。

4.2 时钟提取

由于光电振荡器结构具有选频和放大反馈的功能,因此,无论是将光信号或者电信号注入光电振荡器,其时钟信号(或分频时钟)只要落入滤波器通带之内都可以被锁定再生后输出,可恢复的最大时钟频率由环路中的滤波器中心频率与调制器和光电探测器的带宽决定,X.Steve Yao 等^[26]最先提出演示了光电振荡器的时钟提取功能。其后 Caiyu Loun 等^[27]在 2002 年分析了基于光电振荡器的分频时钟的提取方案,通过利用光电振荡器的输出电信号作为触发信号在示波器上观察注入的光信号,就可以判定此时的电输出是否为注入信号的分频时钟,并在 10 Gb/s 注入信号情况下实验验证了分频时钟提取。2005 年,Hidemi Tsuchida 等^[28]演示了注入信号速率为 40 Gb/s, 160 Gb/s 情况下的分频时钟提取实验。

应当指出,这种方法也为非归零(NRZ)信号的时钟提取提供了一个新思路,理论上,NRZ 信号没有明显的时钟分量可供提取,但是只要仔细调节光电振荡器滤波器的选频窗口就可以找到并产生所注入 NRZ 码信号的时钟信号,Li Huo 等^[29]提出了注入的 10 Gb/s NRZ 码信号的时钟,并在光电振荡器的光输出部分同时得到转换后的归零(RZ)码信号。

基于 EAM 的光电振荡器也可以完成 RZ 码信号的时钟恢复工作,在 Jaacob Lasri 等^[30]演示的实验中,为了同时获得光时钟脉冲信号,增加了一路与注入信号光波长不同的直流光。由于注入信号光的功率变化会在 EAM 上形成周期性的开关窗口而把时钟信息转移到同时注入的直流光上,因此通过光滤波器选出这路直流光的波长完成在光电振荡器中的振荡可以产生电时钟信号并同时在该波长上得到光时钟脉冲。

应该说,光电振荡器除了作为光、电微波源,脉冲源和时钟提取系统外,还有其他的一些应用,如产生双频信号^[31],插入编码器形成多功能信号发生器等^[32]。但是各种应用都基于光电振荡器结构可以自发产生稳定、低相位噪声微波信号这个特点,因此只要着眼于各种需要使用高品质微波信号的领域,还能开发出很多新的应用。

5 总结与展望

可以看出,光电振荡器作为一种高品质的光、电微波信号发生器具有极大的优越性和广泛的适用前景,各种各具特色的应用手段也为光电振荡器的多功能化打下了良好的基础。但是不可否认的是目前的光电振荡器还主要处于实验室研究阶段,要想使它在国民经济建设和国防科技发展中得到实际应用还有一段过程。其主要制约因素集中在如何把光电振荡器系统做成一个小型化、集成化、便于频率控制的紧凑体系,这些要求的实现都取决于新的光子微波器件和相应源器件的开发和制作工艺的进一步完善。尽管没有直接针对光电振荡器,我们仍然在近期的文献报道中发现了一些契机,例如光电探测方面的 UTC-PD (Uni-Traveling-Carrier Photodiode) 可以接收很强的光功率并有大功率的电信号输出可以减少或避免光

电振荡器中电放大器的使用^[33];集成半导体激光器与调制器工艺的发展对光电振荡器光源与反馈调制提供了小型化的可能;半导体结构的微环高 Q 值光子滤波器^[34]有利于实现光电振荡器的系统集成及可调谐性。相信随着这些技术的逐步成熟,光电振荡器必将得到实际应用,发挥出应有的贡献。

收稿日期:2008-05-05;收到修改稿日期:2008-06-09

基金项目:国家(863)计划(2007AA01Z272),国家自然科学基金(60572013)和贵州省国际科技合作重点项目计划(黔科合外G字(2007)400112号)资助课题。

作者简介:江阳(1975-),男,贵州人,副教授,博士研究生。主要从事光微波、光纤通信方面的研究。

E-mail: jiangyang415@163.com

导师简介:于晋龙(1969-),男,山西人,教授,博士生导师,主要从事高速光纤通信系统以及全光信息处理方面的研究。

E-mail: yujinlong@tju.edu.cn

— 参考文献 —

- 1 X. S. Yao, L. Maleki. High frequency optical subcarrier generator [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(18): 1525-1526
- 2 X. Steve Yao, Lute Maleki. Optoelectronic microwave oscillator [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1996, **13**(8): 1725-1735
- 3 X. Steve Yao, Lute Maleki. Multiloop optoelectronic oscillator [J]. *J. Quant. Electron.*, 2000, **36**(1): 79-84
- 4 D. Strelakov, D. Aveline, N. Yu *et al.*. Stabilizing an optoelectronic microwave oscillator with photonic filters [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(12): 3052-3061
- 5 Vladimir S. Ilchenko, Andrey B. Matsko. Optical resonators with whispering-gallery modes—part II: applications [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2006, **12**(1): 15-32
- 6 Kostadin Djordjev, Seung-June Choi, Sang-Jun Choi *et al.*. Microdisk tunable resonant filters and switches [J]. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 2002, **14**(6): 828-830
- 7 A. A. Savchenkov, A. B. Matsko, D. Strelakov *et al.*. Mode filtering in optical whispering gallery resonators [J]. *Electron. Lett.*, 2005, **41**(8): 495-497
- 8 D. Eliyahu, L. Maleki. Low phase noise and spurious level in multi-loop opto-electronic oscillators [J]. *Proc. IEEE Int. Frequency Control Symp.*, 2003, 405-410
- 9 Kwang-Hyun Lee, Jae-Young Kim, Woo-Young Choi. A 30-GHz self-injection-locked oscillator having a long optical delay line for phase-noise reduction [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(24): 1982-1984
- 10 Weimin Zhou, Gregory Blasche. Injection-locked dual opto-electronic oscillator with ultra-low phase noise and ultra-low spurious level [J]. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 2005, **53**(3): 929-933
- 11 Jiang Yang, Yu Jin-Long, Wang Yao-Tian *et al.*. An optical domain combined dual-loop optoelectronic oscillator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(11): 807-809
- 12 江阳, 于晋龙, 王耀天等. 一种新型双环路光电振荡器 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 919-922
- 13 D. Eliyahu, K. Sariri, J. Taylor *et al.*. Opto-electronic oscillator with improved phase noise and frequency stability [C]. *SPIE*, 2003, **4998**: 139-147
- 14 Danny Eliyahu, David Seidel, Lute Maleki. RF amplitude and phase-noise reduction of an optical link and an opto-electronic oscillator [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, 2008, **56**(2): 449-456
- 15 W. Shieh, X. S. Yao, L. Maleki *et al.*. Phase-noise characterization of optoelectronic components by carrier suppression techniques [C]. *OFC*, 1998, 263-264
- 16 M. Kaba, H-W. Li, A. S. Daryoush *et al.*. Improving thermal stability of opto-electronic oscillators [J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2006, **7**(4): 38-47

- 17 F. Quinlan, S. Gee, S. Ozharar *et al.*. Optical frequency self stabilization in a coupled optoelectronic oscillator [C]. *Frequency Control Symposium, 2007 Joint with the 21st European Frequency and Time Forum. IEEE International*, 2007, 1023~1027
- 18 E. Shumakher, B. Sheinman, G. Eisenstein *et al.*. Noise properties of harmonically injection locked electronic and optoelectronic oscillators [C]. *International Topical Meeting on Microwave Photonics*, 2003, 201~204
- 19 X. Steve Yao, Lute Maleki. Dual microwave and optical oscillator [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(24): 1867~1869
- 20 X. Steve Yao, Larry Davis, Lute Maleki. Coupled optoelectronic oscillators for generating both RF signal and optical pulses [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(1): 73~78
- 21 Ertan Salik, Nan Yu, Lute Maleki. An ultralow phase noise coupled optoelectronic oscillator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(6): 444~446
- 22 Jacob Lasri, Preetpaul Devgan, Renyong Tang *et al.*. Self-starting optoelectronic oscillator for generating ultra-low-jitter high-rate (10 GHz or higher) optical pulses [J]. *Opt. Exp.*, 2003, **11**(12): 1430~1435
- 23 P. Devgan, J. Lasri, R. Tang *et al.*. Ultra-low-jitter multiwavelength synchronised optical pulse source for C-, L- and U-bands [J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(18): 473~474
- 24 Preetpaul Devgan, Darwin Serkland, Gordon Keeler. An optoelectronic oscillator using an 850-nm VCSEL for generating low jitter optical pulses [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(5): 685~687
- 25 Yang Jiang, Jin-long Yu, Hao Hu *et al.*. Phase-modulator-based optoelectronic oscillator for generating short optical pulse and microwave signal [J]. *Opt. Eng.*, 2007, **46**(9): 050902
- 26 X. Steve Yao, George Lutes. A high-speed photonic clock and carrier recovery device [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(5): 688~690
- 27 Caiyun Lou, Li Huo, Guoqing Chang *et al.*. Experimental study of clock division using the optoelectronic oscillator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(8): 1178~1180
- 28 Hidemi Tsuchida, Maoki Suzuki. 40-Gb/s optical clock recovery using an injection-locked optoelectronic oscillator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(1): 211~213
- 29 Li Huo, Yi Dong, Caiyun Lou *et al.*. Clock extraction using an optoelectronic oscillator from high-speed NRZ signal and NRZ-to-RZ Format transformation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(7): 981~983
- 30 Jacob Lasri, Preetpaul Devgan, Renyong Tang *et al.*. Ultralow timing jitter 40-Gb/s clock recovery using a self-starting optoelectronic oscillator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(1): 263~265
- 31 Takahide Sakamoto, Tetsuya Kawanishi, Masayuki Izutsu. Optoelectronic oscillator using push-pull Mach-Zehnder modulator biased at null point for optical two-tone signal generation [C]. *2005 Conference on Lasers & Electro-Optics (CLEO)*, 2005, 877~879
- 32 江 阳, 于晋龙, 胡 浩 等. 自启动的非归零/归零码和光电时钟信号发生器及码型转换 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1397~1400
- 33 Y.-S. Wu, J.-W. Shi, P.-H. Chiu *et al.*. High-performance dual-step evanescently coupled uni-traveling-carrier photodiodes [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(20): 1682~1684
- 34 V. Van, T. A. Ibrahim, P. P. Absil *et al.*. Optical signal processing using nonlinear semiconductor microring resonators [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2002, **8**(3): 705~713