

有源环形谐振腔辅助滤波的单模光电振荡器

李红霞 江阳 白光富 单媛媛 梁建惠 马闯 贾振蓉 訾月姣

Single mode optoelectronic oscillator assisted by active ring resonance cavity filtering

Li Hong-Xia Jiang Yang Bai Guang-Fu Shan Yuan-Yuan Liang Jian-Hui Ma Chuang Jia Zhen-Rong
Zi Yue-Jiao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 044202 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.044202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.044202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I4>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

MoS₂ 纳微薄膜激光非线性透射的调控研究

Research on the controllable nonlinear laser transmission properties of MoS₂ nano-micron film

物理学报.2015, 64(3): 034214 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034214>

LiNbO₃ 晶体界面非线性表面波的研究

Study on nonlinear surface waves along the boundary of LiNbO₃ crystals

物理学报.2015, 64(1): 014204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.014204>

色散条件下各向同性光纤中拉曼增益对光脉冲自陡峭的影响

Effect of Raman gain on the self-steepening characteristic in isotropic fibers

物理学报.2014, 63(21): 214207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.214207>

通信波长频率一致纠缠光源的频谱测量

Measurement of the spectral properties of the coincident-frequency entangled biphoton state at optical communication wavelength

物理学报.2014, 63(19): 194206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194206>

在远离光子晶体光纤零色散波长的正常色散区入射飞秒脉冲产生四波混频及孤子效应的实验研究

Experimental research of four-wave mixing and soliton effects in a photonic crystal fiber pumped femtosecond pulses at the wavelength located normal dispersion regime away from the zero dispersion point

物理学报.2014, 63(16): 164206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.164206>

有源环形谐振腔辅助滤波的单模光电振荡器*

李红霞¹⁾²⁾ 江阳^{2)†} 白光富²⁾ 单媛媛²⁾ 梁建惠²⁾
马闯²⁾ 贾振蓉²⁾ 訾月姣²⁾

1)(贵州大学大数据与信息工程学院通信系, 贵阳 550025)

2)(贵州大学理学院物理系, 贵阳 550025)

(2014年7月27日收到; 2014年8月27日收到修改稿)

提出并验证了一种有源环形谐振腔辅助滤波的光电振荡器. 它利用有源环形谐振腔提供的高 Q 光学梳状频率响应特性, 对振荡器中的光信号模式进行选择, 能有效地提高输出信号的边模抑制比, 获得光电振荡器的单模输出. 理论上, 对光电振荡器的起振模式以及有源腔的频率响应进行了分析, 仿真结果表明有源环形谐振腔的辅助滤波有利于光电振荡器的边模抑制和单模输出. 在实验上, 通过对比验证了理论的预期结果, 并最终得到中心频率为 20 GHz, 边模抑制比为 58.83 dB, 在频偏 10 kHz 处相位噪声为 -97 dBc/Hz 的单模信号输出. 该方案保留了已有光电振荡器边模抑制方法的优势, 实现方法上更加简便, 在工作带宽和可调谐性方面具备良好的灵活性.

关键词: 光纤通信, 光电振荡器, 有源谐振腔, 边模抑制

PACS: 42.65.-k, 42.81.-i

DOI: 10.7498/aps.64.044202

1 引言

微波光子学 (microwave photonics) 是利用光子技术所具有的低损耗、大带宽以及抗干扰性强等优势^[1] 来实现微波频段各种应用, 自 1993 年被首次提出以来^[2], 已成为一个研究热点. 由于理想的微波光子信号是一切微波光子系统的应用基础, 因此在微波光子学的众多研究内容中, 如何利用光子技术产生微波信号一直受到广泛关注. 微波光子信号的产生方法有很多种, 如电光调制法、外差法、谐波产生滤波法等. 其中电光调制法是利用电微波信号对光场进行调制获得微波光子信号, 这一方法比较直接, 但在高频信号产生方面会受到信号源自身的制约; 外差法是两个具有固定频差的激光在光电探测器 (photoelectric diode, PD) 上拍频产生微波光子信号, 由于两个独立的光源之间没有固定的相位关系, 使得产生的信号具有很大的相位噪声和频

率不稳定性; 谐波产生滤波法是利用超连续谱或者光纤中的非线性效应产生高次谐波, 通过滤波器直接滤出所需要的两个频率分量, 以获得微波光子信号, 但是这种方法对滤波器的要求很高, 特别是在信号基频频率较低时不易实现. 与上述方法相比, 光电振荡器^[3-8] (optoelectronic oscillator, OEO) 能产生高 Q 值、低相位噪声的光/电微波信号, 引起越来越多的研究者的关注与研究.

传统的 OEO 结构是一个包含光源、调制器、光纤、PD、电滤波器和电放大器的反馈回路, 当振荡条件满足时, 信号在腔内多次反馈并最终形成稳定的输出. 根据 OEO 的工作原理, 其 Q 值可表示为 $Q = 2\pi f\tau_d$ ^[9] (f 为起振频率, τ_d 为能量衰减时间). 因此, 环路中光纤越长, Q 值越高. 然而由于模式间的频率间隔 $\Delta f = c/(nL)$ (L 为腔长, n 为折射率, c 为光速), 因此环路中的长光纤将导致很小的模式间隔.

理论上, 要保证振荡环路高 Q 和单模输出需要

* 国家自然科学基金 (批准号: 61061004, 61465002) 和教育部新世纪优秀人才支持计划 (批准号: NCET-10-0099) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jiangyang415@163.com

使用带宽足够小的滤波器. 但目前的商用滤波器难以满足这一要求. 为了解决这一问题, 研究者提出了使用介质微盘高 Q 滤波器^[10] 或多环路结构实现边模抑制的方案. 介质微盘虽然具有良好的选模特性, 但由于它的滤波窗口为洛伦兹线型, 因此难以满足高边模抑制比的要求, 在同时要求高 Q 和频率大范围可调时不理想. 此外, 其稳定性容易受温度、应力的影响, 加工工艺要求也很高. 相对而言, 多环路结构实现边模抑制则较容易实现. 在这类结构中, 每个环路都决定了一套起振模式, 只有符合所有环路起振条件的公共模式才能稳定起振, 最终获得单模输出. 根据这一思想, 有多种多环路结构的 OEO 得到了实验验证^[11-14]. 如 2000 年, Yao 和 Maleki^[12] 提出了光电混合多环路结构的 OEO, 这种结构中每个环路都需要光电转换和电滤波器, 增加了系统的噪声, 同时也提高了成本、降低了实用性; 2005 年, Zhou 和 Blasche^[13] 提出了注入锁定的双光电振荡器的方案, 它是将主光电振荡器的输出注入到从光电振荡器中实现边模抑制, 但是这一方案的结构复杂, 且成本高; 2007 年, Jiang 等^[14] 提出另一种光域耦合的多环路结构的解决方案, 它利用环路中正交的两路光场构成两个环路以获得边模抑制的效果, 但这一方案对偏振敏感, 调节不方便.

为了充分利用已有方案的优势, 提高系统的灵活性, 本文提出了一种有源环形谐振腔 (active ring resonance cavity, ARRC) 辅助滤波的 OEO. 该方案在传统 OEO 系统中插入一个 ARRC, 它可以方便地实现一个高 Q 光学梳状滤波功能, 在滤波特性上比介质微盘方案更灵活; 同时, 相较于已有的多

环路结构, 它在带宽或调节的方便性上也具有优势, 提高了 OEO 的实用性.

2 实验原理分析

图 1 所示为 ARRC 辅助滤波的 OEO 的实验装置. 从图 1 可以看出, 这一结构在一个传统的 OEO 系统中内置了一个 ARRC. 系统工作时, 激光器发出的连续光经过马赫-曾德尔调制器 (Mach-Zehnder modulator) 后, 进入 ARRC 进行滤波, 其输出经过光电转换、再次滤波和放大后, 对马赫-曾德尔调制器进行反馈调制. 经过多次反馈循环, OEO 将形成稳定振荡, 其振荡频率由 OEO 环路、电滤波器和 ARRC 的滤波特性共同决定.

在工作原理上, 我们先考虑传统单环路 OEO 的频率响应, 可以表示为^[12]

$$\tilde{V}_{out}(\omega) = g\tilde{V}_{in}(\omega, t), \quad (1)$$

其中, $\tilde{V}_{in}(\omega, t)$, $\tilde{V}_{out}(\omega)$ 分别为输入电压和输出电压的复数形式; g 为 OEO 环路的复增益. 若输入噪声的表达式为

$$\tilde{V}_{in}(\omega, t) = \tilde{V}_{in}(\omega) \exp(i\omega t), \quad (2)$$

其中, $\tilde{V}_{in}(\omega)$ 为包含频率成分的复振幅, ω 为角频率, 由 (1) 式可知, 第 M 次循环的输出电压 $\tilde{V}_M(\omega, t)$ 与第 $M + 1$ 次循环的输出电压 $\tilde{V}_{M+1}(\omega, t)$ 的传递关系:

$$\begin{aligned} \tilde{V}_{M+1}(\omega, t) &= g\tilde{V}_M(\omega, t - \tau') \\ &= g \exp(-i\omega\tau')\tilde{V}_M(\omega, t), \end{aligned} \quad (3)$$

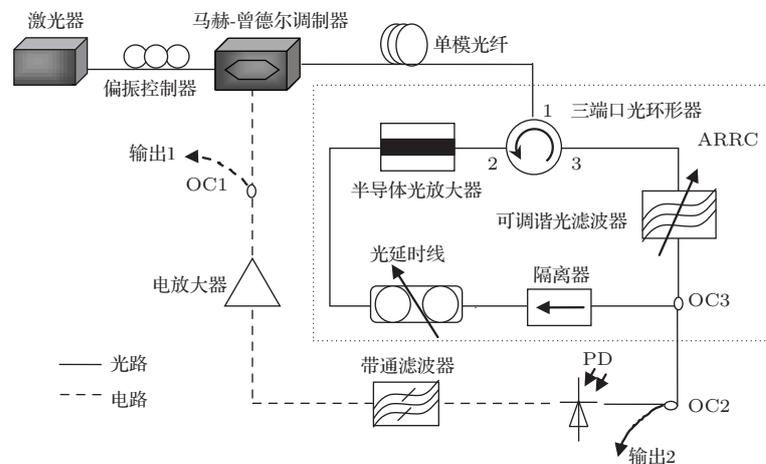


图 1 ARRC 辅助滤波的 OEO 的实验装置

其中, τ' 为 OEO 环路的延时时间, M 为循环的次数, $\tilde{V}_{M=0}(\omega, t) = \tilde{V}_{in}(\omega, t)$. 当 (2) 式所描述的噪声进入 OEO, 在开环增益 g 小于 1 时的输出电压为

$$\begin{aligned}\tilde{V}(\omega, t) &= \sum_{M=0}^{\infty} g \tilde{V}_M(\omega, t - \tau') \\ &= \frac{\tilde{V}_{in}(\omega) \exp(i\omega t)}{1 - g \exp(-i\omega \tau')},\end{aligned}\quad (4)$$

则相应的射频输出功率为 $P(\omega) = |\tilde{V}(\omega, t)|^2 / (2R)$. 因此 (4) 式对应的输出功率为

$$P(\omega) = \frac{|\tilde{V}_{in}(\omega)|^2 / (2R)}{1 + |g|^2 - 2|g| \cos(\varphi)},\quad (5)$$

其中, OEO 环路中的相位 $\varphi = \omega \tau' = \frac{\omega}{c} nL = \frac{2\pi}{\lambda} nL$, n 为单模光纤的折射率, c 为光速, L 为 OEO 环路的长度. 工作时, OEO 的起振频率条件由下式决定:

$$\varphi = \omega \tau' = 2k\pi \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots).\quad (6)$$

当开环增益 g 增大时, 每个满足条件的起振频率都会变强, 进而形成 OEO 可能的振荡模式. 在 OEO 环路中, 当开环增益 $g > 1$ 时, 符合振荡频率条件的噪声会被迅速放大, 产生振荡. 通过电滤波器的频率选择, 其带宽范围内的模式将最终形成振荡 [15].

图 2 为根据 (5) 式计算所得的 OEO 频率响应, 此时 $|g| = 0.8$, $|\tilde{V}_{in}(\omega)|^2 / (2R) = 1$, $L = 0.93$ km, $\tau' = 4.65$ μ s. 从图 2 可以看到, OEO 具有一系列可能的起振模式, 其频率间隔 $\Delta f = 215.05$ kHz.

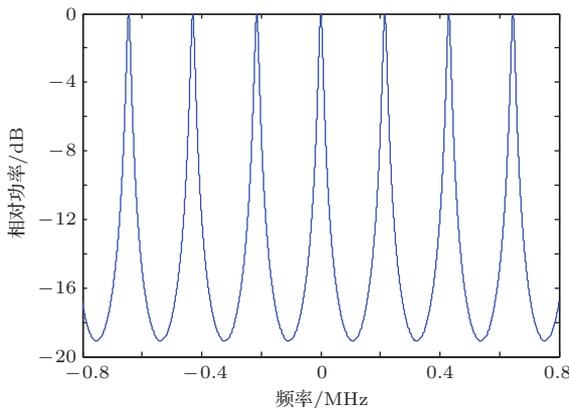


图 2 传统 OEO 的频率响应

若将 ARRC 置于 OEO 环路, 激光器发出的连续光 λ_0 经过调制器后从三端口光环形器端口 1 进

入 ARRC. ARRC 中的半导体光放大器 (semiconductor optical amplifier) 为谐振腔提供增益, 同时通过半导体光放大器的交叉增益或交叉相位调制作用 [16–19], 谐振腔中由可调谐光滤波器 (tunable optical filter) 决定的波长为 λ_1 的光场得到调制并在谐振腔内循环. 腔内的隔离器保证了波长为 λ_0 的光场不能在 ARRC 中形成循环. 若 ARRC 中耦合器 3 (OC3) 的耦合比为 $a : b$ (a, b 都代表百分比, 其中, a 为耦合器的直通臂耦合系数, b 为耦合臂耦合系数), 并假设三端口光环形器端口 1 的输入光信号的功率为 P_1 , 则 ARRC 内 λ_1 的光场首次从 OC3 输出的功率 P_1 为

$$P_1 = bP_i,\quad (7)$$

波长为 λ_1 的光场在 ARRC 内绕环一圈后从 OC3 输出的功率 P_2 为

$$P_2 = abGP_i e^{-j2\pi fT},\quad (8)$$

这里, G 为在 ARRC 内绕环一圈的增益, T 为绕环一圈的延时时间. 以此类推可得到绕环 $N - 1$ 次后从 OC3 输出的功率 P_N 为

$$P_N = a^{N-1} b G^{N-1} P_i e^{-j2\pi fT(N-1)}.\quad (9)$$

理想情况下, 光场可以在 ARRC 中循环无限次, 但若考虑损耗则循环次数有限. 考虑从 OC3 输出的总功率 P_{out} , 它可表示为

$$\begin{aligned}P_{out} &= bP_i + abGP_i e^{-j2\pi fT} + a^2 b G^2 P_i e^{-j2\pi f2T} \\ &\quad + \dots + a^{N-1} b G^{N-1} P_i e^{-j2\pi f(N-1)T},\end{aligned}\quad (10)$$

其所对应的 ARRC 频率响应为

$$\begin{aligned}H(f) &= \frac{P_{out}}{P_i} = b + abG e^{-j2\pi fT} + a^2 b G^2 e^{-j2\pi f2T} \\ &\quad + \dots + a^{N-1} b G^{N-1} e^{-j2\pi f(N-1)T} \\ &= b \frac{1 - (aG e^{-j2\pi fT})^N}{1 - aG e^{-j2\pi fT}}.\end{aligned}\quad (11)$$

由 (11) 式可知, ARRC 的滤波窗口特性可以通过调节光延时线 (optical delay line)、增益 G 或者改变 OC3 的耦合系数 $a : b$ 实现. 通过改变 (11) 式中的变量增益 G 以及耦合比 $a : b$, 可以计算得到 ARRC 的频率响应, 如图 3(a), (b) 所示. 这里 ARRC 的环路长度取为 16 m, 环路延时 $T = 0.08$ μ s, 所对应的梳状谱间隔 $f = 12.5$ MHz. 图 3(a) 为 $a = 0.99$, $T = 0.05$ ns, 环路增益 G 分别

取0.1, 0.6和0.9时所得结果. 显然, 随着 G 逐渐增大, 滤波特性越来越好, Q 值也越来越高. 图3(b)为仅考虑耦合系数变化时的结果. $G = 0.99$, $T = 0.05$ ns 时, 随着 a 分别取0.1, 0.6和0.9, 有源腔的滤波特性趋于理想, Q 值也逐渐增高. 由图3可以看出, ARRC实现了光学梳状滤波器功能, 实验中只要适当调节ARRC中的光器件参数, 就可以形成高 Q 光学梳状频率响应对振荡信号进行直接滤波, 进一步提高高边模抑制比.

将ARRC的滤波效果等效到电域并结合前面

OEO的频率响应特性, 图4给出了振荡条件下的模式选择情况. 这里设定电滤波器的频率响应为矩形窗口, 带宽为20 MHz. 如图4(a)所示, 短划线为ARRC的频率响应, 实线为OEO的振荡频率, 点线为电滤波器的滤波窗口, 经过ARRC滤波后只有公共部分的模式得以存在, 其他的模式将被滤掉. 图4(b)中, 实线为经过ARRC和电滤波器滤波后系统的频率响应, 电滤波器的带宽小于相邻两公共模式的频率间隔的两倍, 此时只有电滤波器带宽范围内的振荡频率可以通过.

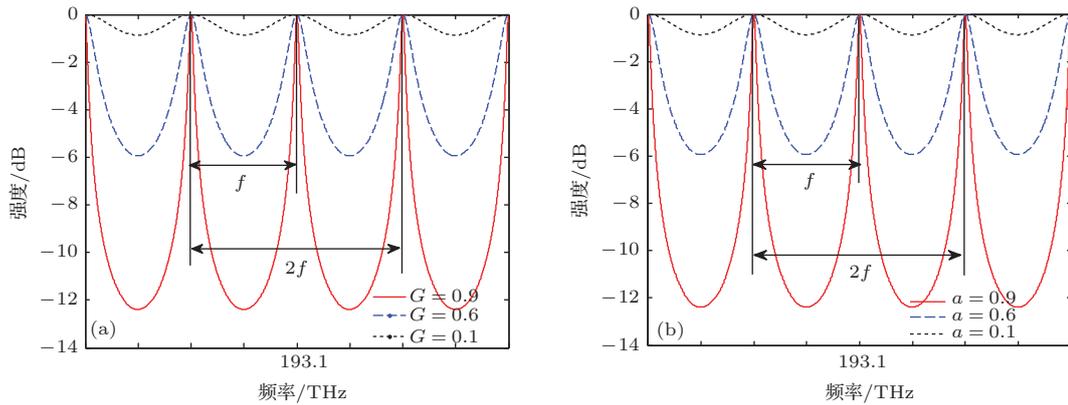


图3 (网刊彩色) ARRC的频率响应 (a) 只改变环路增益 G ; (b) 只改变OC3耦合系数 $a : b$

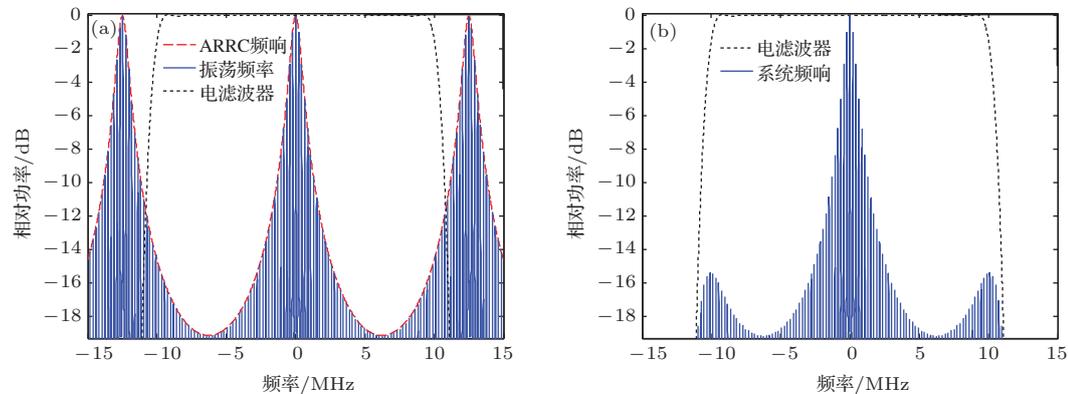


图4 (网刊彩色) 滤波效果仿真 (a) 经过ARRC的滤波效果; (b) 经过ARRC和电滤波器的滤波效果

需要指出的是, ARRC辅助滤波的OEO形成稳定振荡时, 其振荡频率取决于OEO环路、电滤波器和ARRC的滤波特性的共同作用, 图4(b)实线所示即为三者共同决定的系统的频率响应. 由图4(b)可看出, 最后形成的系统的频率响应仍然包含多个振荡频率, 但是在OEO环路的多次反馈调制中, 这些振荡模式中只有满足阈值条件才可以形成振荡, 其他不满足阈值条件的则在多次反馈循环中被损耗, 不能形成稳定振荡. 因此在系统的频

率响应和阈值条件的共同约束下, 有望形成单模振荡输出.

为了进一步说明ARRC的辅助滤波可以配合OEO系统中的电滤波器获得单模输出, 我们计算了不同ARRC环长条件下的系统响应. 图5所示为改变ARRC环长和电滤波器带宽时的系统频率响应, 这里单环OEO的频率响应间隔 $\Delta f = 215.05$ kHz, ARRC中 $G = 0.89$, $a = 0.9$, $b = 0.1$. 图5(a)中ARRC的环长为10 m, 此时所

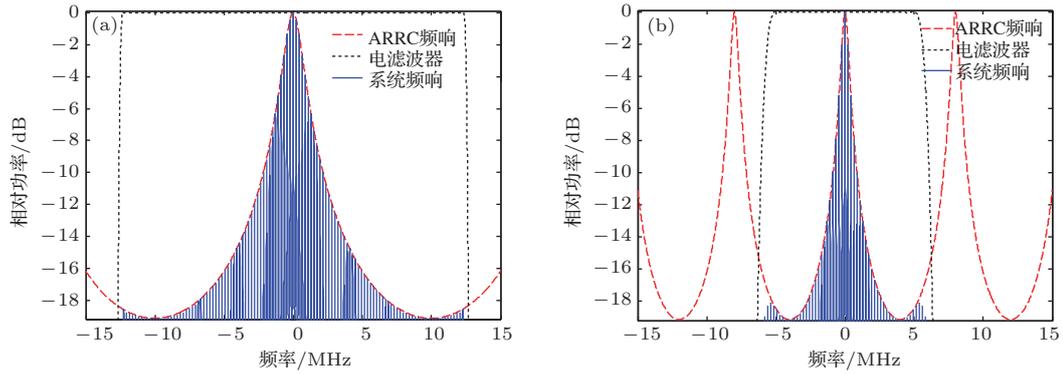


图5 (网刊彩色) 系统频响 (a) ARRC 环长为 10 m, 电滤波器带宽为 25 MHz; (b) ARRC 环长为 25 m, 电滤波器带宽为 11 MHz

对应的梳状谱间隔 $f = 20$ MHz, 电滤波器带宽为 25 MHz. 图 5(b) 中 ARRC 的环长为 25 m, 所对应的梳状谱间隔 $f = 8$ MHz, 电滤波器带宽为 11 MHz. 由图 5 可以看出, 对于不同带宽的电滤波器, 通过调节 ARRC 环长改变梳状谱间隔, 能够很容易地实现单模响应, 表现出了 ARRC 辅助滤波调节的灵活性.

3 实验结果与讨论

为了验证理论分析结果, 我们进行了实验测试. 实验中, 激光器发出波长为 1550 nm 的连续光 λ_0 , 光场经过偏振控制器 (polarization controller) 调整其偏振态后进入马赫-曾德尔型铌酸锂调制器, 以获得最佳调制效果. 经过一段长度为 0.93 km 的单模光纤后, 由三端口光环行器端口 1 进入环长为 16 m 的 ARRC, 此时入射功率为 1 dBm. 当入射光进入半导体光放大器后, 由于半导体光放大器的增益和非线性效应, ARRC 内由可调谐光滤波

器决定的波长为 $\lambda_1 = 1545$ nm 的光场受到调制作用, 并在环路中构成循环, 其信号通过 3 dB OC3 输出. 输出的光场在 PD 中将光信号转化为电信号, 再经过电滤波、电放大后作为调制信号进入马赫-曾德尔型铌酸锂调制器对连续光进行反馈调制, 经过多次循环反馈后, 环路达到稳定状态, 最终形成稳定振荡. 实验中, 所使用的电滤波器中心频率为 20 GHz, 带宽为 20 MHz. 为了验证 ARRC 辅助滤波的效果, 实验中分别在插入 ARRC 和不插入 ARRC 两种情况下进行了测试, 并对其结果进行分析比较.

图 6(a) 为传统单环路 OEO 产生的微波信号的电谱图, 此时频谱仪设置频宽为 1 MHz, 分辨率带宽 (resolution bandwidth, RBW) 为 10 kHz. 从图 6(a) 可以看出, 此时 OEO 产生了振荡频率为 20 GHz 并具有大量边模的微波信号, 其模式间隔为 215 kHz, 对应着 0.93 km 的腔长. 所测得的边模抑制比为 42.1 dB. 为了了解 ARRC 的频率响应情况, 我们将 ARRC 独立出来, 并通过 PD 检测其自

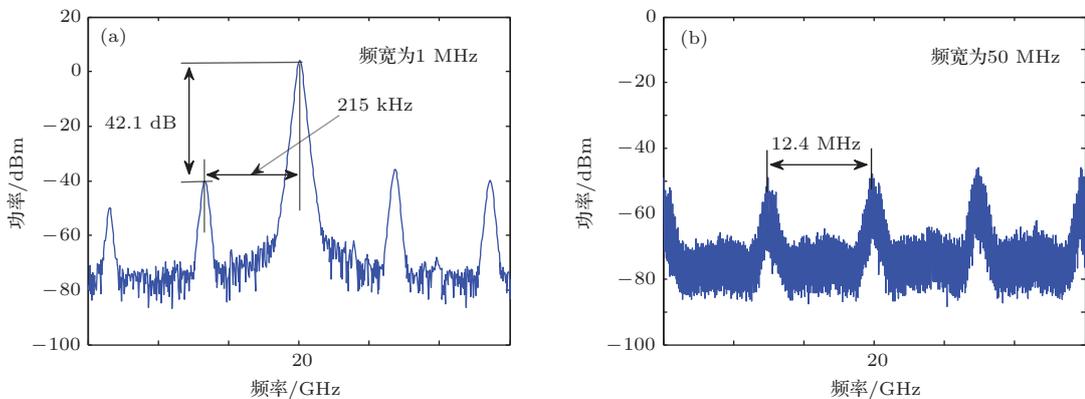


图6 (a) 传统单环路 OEO 的电谱; (b) 自由运转时 ARRC 的频率响应

由运转时的模式拍频信号, 其结果如图 6(b) 所示. 这里, 可调谐光滤波器带宽为 0.5 nm, 半导体光放大器注入电流为 250 mA, 频谱仪设置频宽为 50 MHz, RBW 为 300 kHz. 从图 6(b) 可以看出, ARRC 的频率响应具有梳状滤波特性, 它的模式间隔为 12.4 MHz, 对应着 ARRC 的腔长为 16 m. 由于自由运转时, ARRC 所产生的模式数量很大, 且相位彼此独立, 因此模式拍频后所得的频率响应特征表现为一组频率包络.

将此 ARRC 插入 OEO 系统后, 所得信号电谱如图 7(a) 所示. 显然, 通过 ARRC 的辅助滤波后, OEO 所产生信号的边模得到了极大的抑制, 所测得的边模抑制比可达到 58.83 dB. 这一结果符合前面的理论分析. 图 7(b) 是频宽为 20 MHz, RBW 为 300 kHz 的 OEO 的电谱图. 从图 7(b) 可以看出, 在电滤波器 20 MHz 带宽范围内输出质量良好的 20 GHz 微波信号, 且没有边模. 这是由于经过 ARRC 的辅助滤波后, 只有 OEO 的振荡模式与 ARRC 的频率响应的公共模式可以通过, 而相邻两共同模式频率间隔的两倍已大于电滤波器的带宽,

因此 OEO 实现单模输出.

为了进一步分析所得信号的质量, 图 8 给出了信号频谱细节和相位噪声测试曲线. 图 8(a) 为利用 ARRC 辅助滤波后, 在频宽为 20 kHz, RBW 为 300 Hz 条件下的电谱细节. 根据电谱可以看出, 在 OEO 中插入 ARRC 后, OEO 仍然具有质量良好的输出信号. 图 8(b) 为插入 ARRC 前后信号相位噪声的比较. 由图 8(b) 仍可以看出, 插入 ARRC 后边模强度受到明显抑制. 在不插入 ARRC 时测得的相位噪声为 -107 dBc/Hz@10 kHz, 而插入 ARRC 后相位噪声为 -97 dBc/Hz@10 kHz. 这里相位噪声表现出一定的恶化是因为 ARRC 虽然可以辅助滤波, 但是其中的有源器件会引入一定的噪声; 同时在实验室条件下, ARRC 自身的环路结构会带来一定的不稳定性, 使得滤波所得到的振荡模式存在相位上的扰动, 进而使相位噪声恶化. 尽管如此, 此实验结果仍表现出良好的效果, 特别是 OEO 产生单模输出, 有利于 OEO 的实际应用. 通过选择高性能的有源器件并配合一定的辅助稳定机理, 本文所提出的 OEO 系统性能将得到进一步的改善.

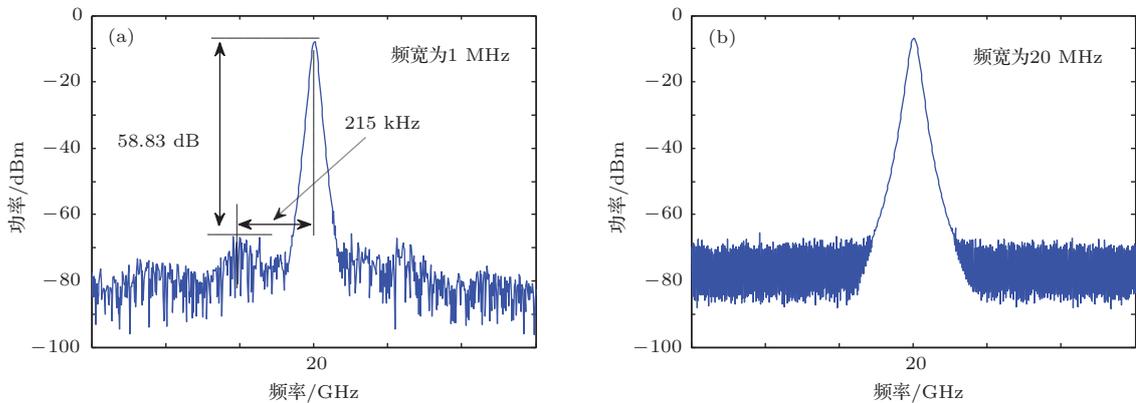


图 7 插入 ARRC 后 OEO 的电谱 (a) 频宽为 1 MHz; (b) 频宽为 20 MHz

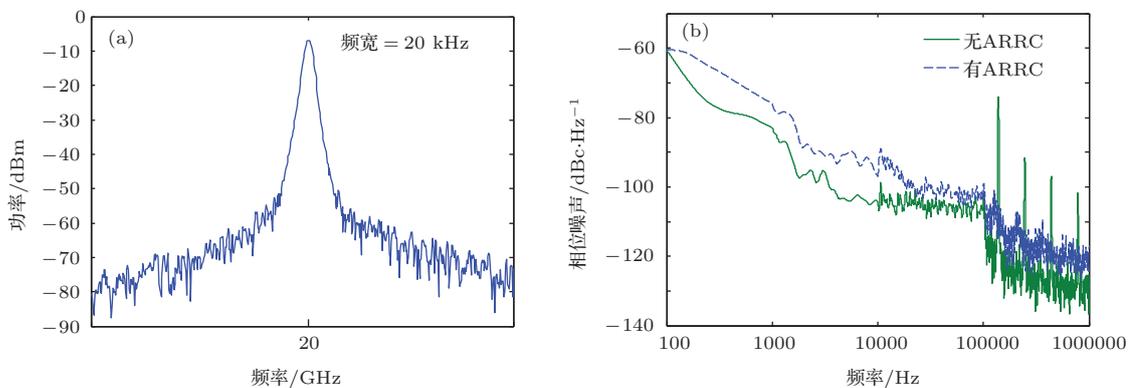


图 8 (网刊彩色) 电谱和相位噪声 (a) 电谱; (b) 相位噪声比较

4 结 论

本文提出了一种 ARRC 辅助滤波的 OEO 新结构, 理论上分析了 OEO 可能的起振模式和 ARRC 形成的光学梳状频率响应的滤波原理及其性能, 并在实验上给予了验证. 通过利用 ARRC 形成的高 Q 光学梳状频率响应, 在光域中对振荡信号直接进行滤波, 实现了相位噪声为 -97 dBc/Hz@10 kHz、中心频率为 20 GHz 的单模微波信号产生. 所提出的方案可通过改变 ARRC 的腔长, 得到不同的频率响应, 使其滤波特性具有可调谐性, 方便 OEO 产生不同频率的质量良好的微波信号. 而调节 ARRC 中的可调谐光滤波器可以使输出的光子微波信号波长可调, 有利于光载无线通信系统的应用. 该设计方案为实现大工作带宽、调节性灵活的 OEO 系统提供了有益的参考, 并具有良好的实用意义.

参考文献

- [1] Yao J P 2009 *J. Lightwave Technol.* **27** 314
- [2] Smith S D, Neale R F 1993 *Optical Information Technology* (Edinburgh: Springer) p328
- [3] Sun B, Yu J L, Wang J, Miao W, Meng T H, Wang W R, Yang E Z 2012 *Chin. J. Lasers.* **39** 0305010 (in Chinese) [孙斌, 于晋龙, 王菊, 苗旺, 孟天晖, 王文睿, 杨恩泽 2012 中国激光 **39** 0305010]
- [4] Yao X S, Maleki L 1996 *J. Opt. Soc. Am. B* **13** 1725
- [5] Yao X S, Maleki L 1994 *Electron. Lett.* **30** 1525
- [6] Yao X S, Maleki L 1996 *Opt. Lett.* **21** 483
- [7] Li K, Wang A B, Zhao T, Wang Y C 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 144207 (in Chinese) [李凯, 王安帮, 赵彤, 王云才 2013 物理学报 **62** 144207]
- [8] Jiang Y, Bai G F, Li H W, Zhou Z Y, Xu J, Wang S Y 2013 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **25** 382
- [9] Jiang Y, Yu J L, Hu L, Zhang L 2008 *Laser Optoelectron. Prog.* **10** 39 (in Chinese) [江阳, 于晋龙, 胡林, 张莉 2008 激光与光电子学进展 **10** 39]
- [10] Djordjev K, Choi S J, Choi S J, Dapkus P D 2002 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14** 828
- [11] Chen J X, Chen S Y, Shi Y, Yan B, Xu J X 2013 *Acta Opt. Sin.* **33** 0706016 (in Chinese) [陈吉欣, 陈少勇, 师勇, 鄢勃, 徐嘉鑫 2013 光学学报 **33** 0706016]
- [12] Yao X S, Maleki L 2000 *J. Quant. Electron.* **36** 79
- [13] Zhou W M, Blasche G 2005 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **53** 929
- [14] Jiang Y, Yu J L, Wang Y T, Zhang L T, Yang E Z 2007 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **19** 807
- [15] Eliyahu D, Sariri K, Taylor J, Maleki L 2003 *Proceedings of SPIE San Jose, USA, January 25, 2003* p139
- [16] Liu M T, Yang A Y, Sun Y N 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 980 (in Chinese) [刘茂桐, 杨爱英, 孙雨南 2009 物理学报 **58** 980]
- [17] Zhang X L, Sun J Q, Liu D M, Huang D X 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 741 (in Chinese) [张新亮, 孙军强, 刘德明, 黄德修 2000 物理学报 **49** 741]
- [18] Dong J J, Luo B W, Huang D X, Zhang X L 2012 *Chin. Phys. B* **21** 043201
- [19] Ma L, Zhu H L, Liang S, Zhao L J, Chen M H 2013 *Chin. Phys. B* **22** 054211

Single mode optoelectronic oscillator assisted by active ring resonance cavity filtering*

Li Hong-Xia¹⁾²⁾ Jiang Yang^{2)†} Bai Guang-Fu²⁾ Shan Yuan-Yuan²⁾ Liang Jian-Hui²⁾
Ma Chuang²⁾ Jia Zhen-Rong²⁾ Zi Yue-Jiao²⁾

1) (*Department of Communications, College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China*)

2) (*Department of Physics, College of Science, Guizhou University, Guiyang 550025, China*)

(Received 27 July 2014; revised manuscript received 27 August 2014)

Abstract

In this paper, a single mode optoelectronic oscillator assisted by active ring resonance cavity filtering is presented and verified. Using the high Q optical comb frequency response to select the oscillation mode of an optoelectronic oscillator, the system can effectively suppress the side-mode and generate single mode signal. Theoretically, the optoelectronic oscillator oscillation mode and the frequency response of the active cavity are analyzed. The simulation results show that the active ring resonance cavity filtering is of benefit to the side-mode suppression and single mode output in an optoelectronic oscillator system. By comparing with experimental result, the theoretical prediction is verified. The output of a 20 GHz single-mode signal with a side-mode suppression ratio of 58.83 dB and a phase noise of -97 dBc/Hz at 10 kHz from carrier is also obtained. This scheme has the advantages of the existing optoelectronic oscillator side-mode suppression methods. In addition, it has more convenient manipulation, and good flexibility and tunability.

Keywords: optical fiber communication, optoelectronic oscillator, active resonance cavity, side-mode suppressing

PACS: 42.65.-k, 42.81.-i

DOI: [10.7498/aps.64.044202](https://doi.org/10.7498/aps.64.044202)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61061004, 61465002) and the Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (Grant No. NCET-10-0099).

† Corresponding author. E-mail: jiangyang415@163.com