

长光纤环高性能光电振荡器研究

陈吉欣 惠 洋 鄢 勃 陈少勇

(电子信息控制重点实验室, 四川 成都 610036)

摘要 提出了采用多个长光纤环实现高性能光电振荡器的方法,通过合理的长度设计,多个长光纤环能够降低光电振荡器的相位噪声,同时提高边模抑制比。理论分析了多个长光纤环实现高性能光电振荡器的可行性,并构建了实验系统。在实验中,利用 3 个大于 4 km 的长光纤环构建光电振荡器,实现了频率 10 GHz 的微波信号,其相位噪声在频偏 10 kHz 处达到了 -130 dBc/Hz,边模抑制比达到了 60 dBc。实验结果与理论分析一致,证明了该方法的正确性。

关键词 光纤光学;光电振荡器;光纤长度;相位噪声;边模抑制比

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0106002

Research on Long Fiber Loop Optoelectronic Oscillator of High Performance

Chen Jixin Hui Yang Yan Bo Chen Shaoyong

(Key Laboratory of Electronic Information Control, Chengdu, Sichuan 610036, China)

Abstract A novel optoelectronic oscillator with multiple long fiber loops is proposed. This oscillator can simultaneously have lower phase noise and higher side mode suppression ratio than current multiloop optoelectronic oscillators. A three-fiber-loop oscillator with more than 4 km fiber length is investigated in theory and experiment. The optoelectronic oscillator with frequency of 10 GHz, phase noise of -130 dBc/Hz at 10 kHz offset, and side mode suppression ratio of 60 dBc is demonstrated. The agreement of experimental results and theoretical analysis justifies this method.

Key words fiber optics; optoelectronic oscillator; fiber length; phase noise; side mode suppression ratio

OCIS codes 060.4080; 230.4910

1 引 言

微波振荡器是现代电子仪器设备的关键部分,用来提供参考信号和时钟信号,广泛用于各种电子系统中,如通信、雷达、导航和仪器测量等领域。

常见的微波介质振荡器在频率较高时信号质量较差。虽然原子钟的相位噪声在频偏为 10 kHz 时可以达到 -150 dBc/Hz,但输出频率在几十兆赫兹。通过倍频等频率变换方式得到高频信号输出,相位噪声将会严重恶化。一般来说,频率增加 10 dB,相位噪声恶化 20 dB。1994 年,美国喷气动力实验室研究出光电振荡器,能够产生高质量的微波信号^[1,2]。光电振荡器利用光电混合的方法,采

用光纤延迟线作为储能元件,可以实现在微波频段相位噪声与频率无关的特点^[3,4]。光电振荡器能够实现低相位噪声的微波信号输出,是因为利用长光纤的低损耗特性显著提高了环路的 Q 值($Q = 2\pi f\tau$, f 为信号频率, τ 为延时时间)^[3,4]。一般情况下,为了实现低相位噪声,都需要采用千米量级以上的长光纤^[5,6]。长光纤又会减小振荡模式的间隔,由于在微波波段无法构建带宽仅为几十千赫兹的滤波器,长光纤光电振荡器的输出边模功率很大。为了解决这个问题,提出了采用多环结构抑制边模的方法,但是,为了提高边模抑制比,往往需要增加一个短光纤环,这个短光纤环的长度为几米至几百米,而

收稿日期: 2012-08-01; 收到修改稿日期: 2012-09-19

基金项目: 国家十二五预研项目(51302050102)、电子科技集团探索项目(JJ0908)资助课题。

作者简介: 陈吉欣(1977—),男,博士,高级工程师,主要从事微波和光信号处理等方面的研究。E-mail: jixinc@163.com

且功率分配比很高^[7,8]。由于光电振荡器的相位噪声与光纤长度相关,增加了短光纤,等效于减小了延时时间,从而降低了相位噪声性能。

本文从光电振荡器的振荡理论出发,利用模式相互抑制的思想,研究一种多个长光纤环构建的光电振荡器,该振荡器具有低相位噪声、低边模水平等特点,能够克服现有长短光纤组合的多环光电振荡器无法同时兼顾低相位噪声和低边模水平的问题。通过构建长光纤环光电振荡器的实验,对该方法进行了验证。

2 理论模型及分析

三环光电振荡器的实现结构如图 1 所示。电光转换单元作为能量源,发出调制的光波。激光通过光纤延迟线和光电探测器(PD)转化为微波信号。微波信号经过放大器、滤波器,通过耦合器后一部分输出,另一部分反馈回电光调制器以调制光波。光电振荡器的输出信号频率由滤波器决定。在本文研究的光电振荡器中,采用了 3 个长光纤环构成组合光纤延迟线。

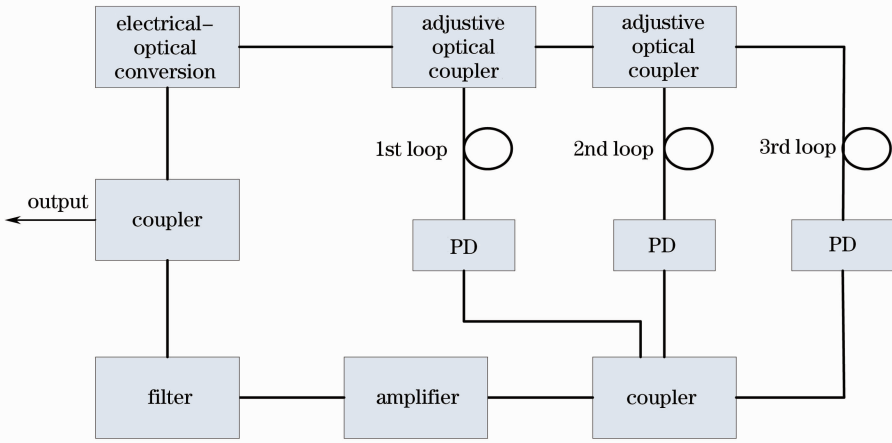


图 1 三环结构的光电振荡器

Fig. 1 Setup of three-fiber-loop optoelectronic oscillator

设 3 个光纤环的延迟时间分别为 τ_1 、 τ_2 、 τ_3 , 光电振荡器产生信号的频率 f_0 为

$$f_0 = \frac{m}{\tau_1} = \frac{n}{\tau_2} = \frac{l}{\tau_3}, \quad (1)$$

式中 m 、 n 、 l 为正整数。

从(1)式可以看出,由于光纤环长度不同,引起的振荡模式不同,每个模式的频率间隔分别为延迟时间的倒数。在三环振荡器中,产生信号的振荡频率由 3 个环共同决定,因此,振荡频率为 3 个环频率间隔整数倍。

对于多个光纤环的结构,由于信号是相干叠加,因此,该系统的传输函数可以表示为

$$T = \sum_{i=1}^k a_i \exp(-j2\pi f \tau_i), \quad (2)$$

式中 k 为光纤环数目, τ_i 为第 i 个光纤环的延时, a_i 为光纤环的相对光功率比,定义为

$$a_i = \frac{P_{\text{opt}_i}}{\sum_{q=1}^k P_{\text{opt}_q}}. \quad (3)$$

在光电振荡器中,采用三环结构,(2)式可写为

$$T = a_1 \exp(-j2\pi f \tau_1) + a_2 \exp(-j2\pi f \tau_2) + a_3 \exp(-j2\pi f \tau_3). \quad (4)$$

由于光电振荡器是一个闭环反馈系统,经过循环叠加的传输函数应为

$$T_c = \sum_{j=0}^{\infty} T^j = \frac{1}{1 - [a_1 \exp(-j2\pi f \tau_1) + a_2 \exp(-j2\pi f \tau_2) + a_3 \exp(-j2\pi f \tau_3)]}. \quad (5)$$

因此,归一化功率传输函数为

$$P_c = \frac{1}{1 + a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + 2a_1 a_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) + 2a_1 a_3 \cos(\phi_1 - \phi_3) + 2a_2 a_3 \cos(\phi_2 - \phi_3) - 2a_1 \cos \phi_1 - 2a_2 \cos \phi_2 - 2a_3 \cos \phi_3}. \quad (6)$$

式中 ϕ_i 为每个光纤环对应的相位,表示为

$$\phi_i = 2\pi f \tau_i. \quad (7)$$

光电振荡器的相位噪声为^[3]

$$S(f') = \frac{\delta}{(2 - \delta/\tau) - 2\sqrt{1 - \delta/\tau}\cos(2\pi f'\tau)}, \quad (8)$$

式中 f' 为振荡频率的偏移, τ 为环路延时, δ 为振荡器的噪声信号比, 表示为

$$\delta = \frac{[4k_B T(N) + 2eI_{ph}R + N_{RIN}I_{ph}^2R]G_A^2}{P_{osc}}, \quad (9)$$

式中 k_B 为玻尔兹曼常数, T 为温度, e 为电子电荷, N 为微波放大器的噪声系数, I_{ph} 为光电探测器光电流, N_{RIN} 为激光器的相对强度噪声, P_{osc} 为振荡器功率, G_A 为放大器增益。

对于多环结构的振荡器, 环路等效延时为^[9,10]

$$\tau = \sum_{i=1}^k a_i \tau_i. \quad (10)$$

光电振荡器的输出信号频率为 10 GHz, 最短的光纤长度为 4 km, 由(1)式得到振荡模式间隔为 50 kHz(4 km 延时为 20 μ s, 其倒数为 50 kHz)。当不同光纤环的振荡频率正好相等时, 这个频率就是振荡器的输出信号频率。考虑微波滤波器的带宽为 2 MHz, 那么第 1、2 个光纤环的振荡频率可以设计为 10 GHz、10 GHz \pm 1 MHz, 这样就能很好地保证单模振荡。在 1 MHz 带宽内, 4 km 光纤环共有 20 个振荡模式间隔。对于增加的长光纤, 其长度大于 4 km, 则产生的振荡频率间隔 Δf 应满足以下条件:

$$\Delta f < 50 \text{ kHz}, \quad (11)$$

$$(50 - \Delta f) \times 20 = 50. \quad (12)$$

由(12)式可以得出, 第 2 个光纤环的频率间隔 $\Delta f = 47.5$ kHz, 因此, 第 2 个光纤环的长度为 $L_2 = 4210$ m。为了进一步提高边模抑制比, 可以增加第 3 个光纤环, 第 3 个光纤环的长度在第 1、2 个光纤环之间, 考虑第 1、3 个光纤环的振荡频率在 10 GHz、10 GHz \pm 1.5 MHz, 与第 2 个光纤环长度计算方法相同, 第 3 个光纤环长度 $L_3 = 4167$ m。这种三环结构设计, 由于振荡频率重合点在滤波器振荡带宽内仅有 1 个, 极大地提高了边模抑制比。

在频率 10 GHz 附近, 3 个光纤环的相位关系如图 2 所示。可以看出, 在 10 GHz 频率点处, 3 个光纤环的相位都为 0° , 而在其他频率处, 3 个光纤环的相位都不能同时为 0° 。

利用(6)式, 可以计算出光电振荡器的相对功率传输特性。当仅有一个长度为 4 km 的长光纤环工作时, 输出功率谱如图 3 所示。可以看出, 在 10 GHz \pm 1 MHz 的频率范围内, 存在大量的振荡模式。对于这

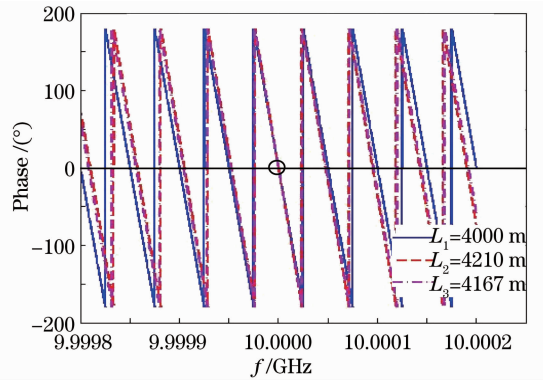


图 2 在 10 GHz 附近, 3 个光纤环的相位分布
Fig. 2 Phase distribution of three fiber loops near 10 GHz

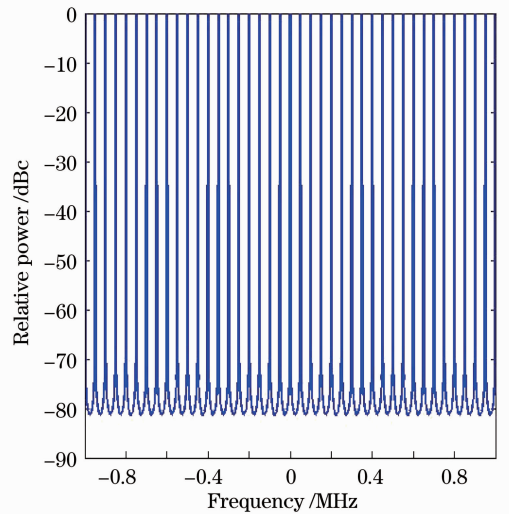


图 3 单个 4 km 光纤环的振荡模式

Fig. 3 Oscillating mode of a 4 km single loop

种多模振荡的情况, 由于存在模式竞争效应, 导致信号的频率和功率会很不稳定。当同时存在 3 个光纤环工作时, 在不同的功率分配比下, 输出功率谱如图 4 所示。可以看出, 采用 3 个长光纤环, 边模抑制比显著提高, 理论计算能够达到 60 dBc 左右; 改变 3 个光纤环的功率分配比, 振荡频率不变, 振荡边模的位置和功率略有变化, 这与图 2 中的相位关系变化一致。

根据(8)、(9)式, 能够计算出光电振荡器的相位噪声与光纤长度的关系, 如图 5 所示。在计算中, 放大器的噪声系数 $N = 3$ dB, 激光器的相对强度噪声 $N_{RIN} = -150$ dBc/Hz, 放大器增益 $G_A = 35$ dB, 振荡器输出功率 $P_{osc} = 10$ mW, 光电流 $I_{ph} = 4$ mA。从分析中可以看到, 光电振荡器的相位噪声与光纤环的长度相关, 光纤环越长, 相位噪声越低。当光纤长度为 4 km 时, 理论计算的相位噪声在频偏 1 kHz 和

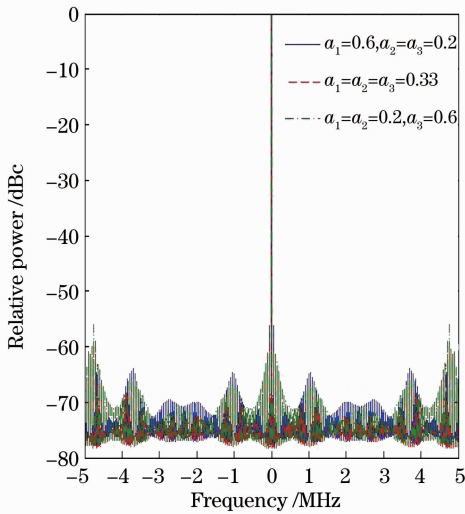


图 4 3 个光纤环的振荡模式

Fig. 4 Oscillating mode of three loops

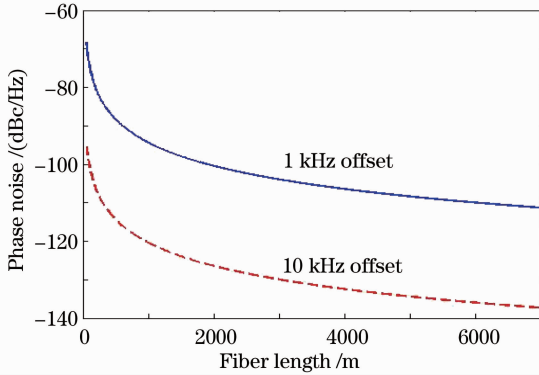


图 5 相位噪声与光纤长度的关系

Fig. 5 Relationship between phase noise and fiber length

10 kHz 处分别为 -105 dBc/Hz 和 -135 dBc/Hz。根据(10)式,在三环光电振荡器中,每个光纤环长度都大于 4 km,这样,无论功率分配比如何调整,等效光纤长度一定大于 4 km,保证了低相位噪声性能。

3 实验研究

根据上面的分析,搭建了 3 个光纤环的光电振荡器,光纤长度分别为 4000、4210、4167 m,受到光器件的尾纤及电缆的长度影响,实际光纤环长度都减少 10 m。电光转换采用直接调制半导体激光器(桂林激光通信研究所 GC1006S),其频率响应大于 12 GHz,输出功率为 6 mW。光电探测器(美国 EM4 公司 EM149)的响应率为 0.9 mA/mW,频率响应大于 15 GHz。可调光功率分配器(武汉光迅公司 MVOP12)采用 1×2 结构,调节范围为 10 dB,精度优于 0.01 dB。微波放大器的噪声系数为 3 dB,放大增

益为 35 dB,频率响应大于 12 GHz。微波滤波器的中心频率为 10 GHz,3 dB 带宽为 5 MHz。

首先调节光功率分配器,将光功率全部分配到 4000 m 光纤环中,为了降低微波损耗,光电探测器输出直接与微波放大器连接。在 Agilent 频谱分析仪(E4440A)上观察输出信号的频谱。由于光纤长度很长,频谱分布很宽,而且很不稳定,频率和功率不断跳动,如图 6 所示。

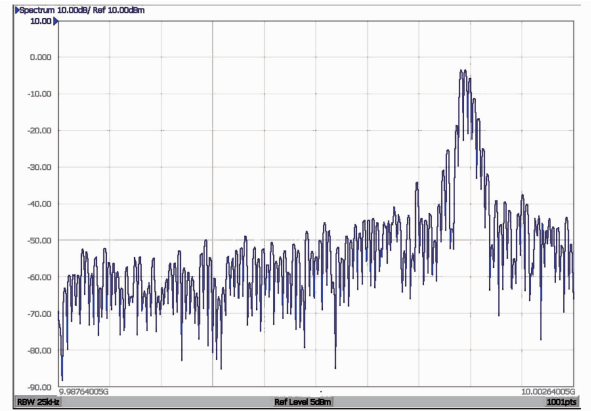


图 6 单个 4 km 光纤环光电振荡器的输出测量频谱

Fig. 6 Measured spectrum of oscillator with a 4 km fiber loop

依据图 1 的连接方式,将 3 个光电探测器与微波耦合器连接,微波耦合器的另一端与放大器相接,调节 2 个可调光功率分配器,观察频谱仪的输出信号频谱。在实验中,很容易调整到比较理想的状态,这时输出信号的频谱变得很干净,边模抑制比较高,而且信号非常稳定。输出信号频谱如图 7 所示,输出信号频率为 9.995 GHz,功率为 10.9 dBm,边模抑制比为 60 dB。输出信号频率与 10 GHz 略有差别,是由微波滤波器的中心频率偏差及幅频微小波动造成的。采用 Agilent 相位噪声分析仪(E5052A)测量输出信号的相位噪声分布,如图 8 所示。经测量,在频偏 1 kHz 和 10 kHz 处,相位噪声分别为 -100.9 dBc/Hz 和 -130.6 dBc/Hz,远远高于文献[6]中采用 900 m 和 5.5 km 光纤实现的相位噪声水平,而边模抑制比也略高于文献[6]中的结果。实验得到的相位噪声比理论计算的结果低 4~5 dB,主要是由于微波放大器的增益和噪声系数会随着频率变化有一定的波动,而且激光器的相对强度噪声也会随着频率增加出现一定的恶化。

在实验室中,对产生的微波信号的频率和功率进行了约 5 min 时间的观察,没有明显的变化,这说明长光纤环光电振荡器的短期稳定度较好。

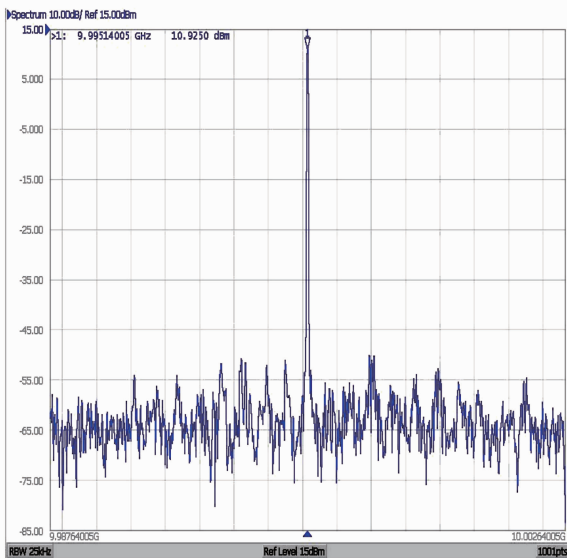


图7 3个长光纤环光电振荡器的测量频谱

Fig. 7 Measured spectrum of three-loop oscillator

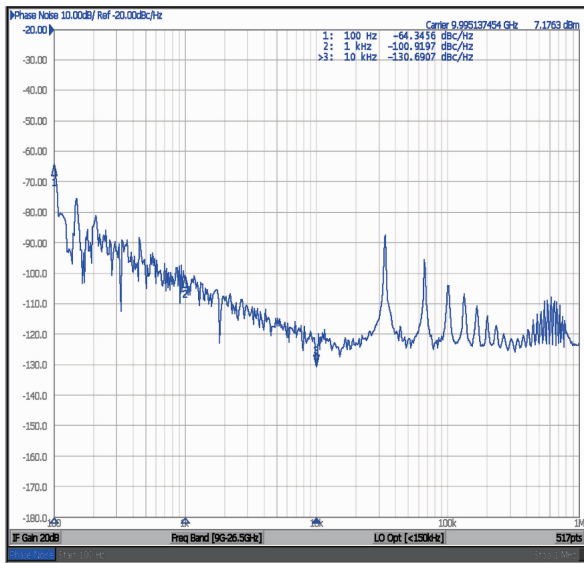


图8 3个长光纤环光电振荡器的相位噪声

Fig. 8 Measured phase noise of three-loop oscillator

4 结 论

研究了一种采用多个长光纤环实现低相位噪声、低边模水平的光电振荡器。通过理论和实验证明,该方法能够克服现有长短光纤组合的多环光电振荡器无法同时兼顾低相位噪声、低边模水平的困难,具有很大的实用价值。

根据本文的研究成果,设计长光纤环高性能光电振荡器的基本方法可以总结如下:1)根据相位噪声指标计算需要的最短光纤长度;2)根据滤波器的带宽,将第1、2个光纤环振荡模式的重合点设定在通带中间和两边,保证其他频率位置模式不相互重叠,从而确定第2个光纤环长度;3)为了提高边模抑制水平,可以增加第3个光纤环,设计准则是在滤波器带宽内,3个环的振荡模式仅有单个重合点。

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. S. Yao, L. Maleki. Converting light into spectrally pure microwave oscillation[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(18): 483~485
- 3 Jiang Yang, Yu Jinlong, Hu Lin *et al.*. Performance and applications of optoelectronic oscillator [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(10): 39~45
江 阳, 于晋龙, 胡 林 等. 光电振荡器的性能及应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(10): 39~45
- 4 Jiang Yang, Yu Jinlong, Zhang Litai *et al.*. Generation of multi-wavelength optical pulses and electrical clock signal utilizing optoelectronic oscillator with single light source[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2093~2098
江 阳, 于晋龙, 张立台 等. 利用单光源光电振荡器实现多波长光脉冲与电时钟信号产生[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2093~2098
- 5 X. S. Yao, L. Maleki. Optoelectronic microwave oscillator[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1996, **13**(8): 1725~1735
- 6 Hong Jun, Yang Chun, Chong Yuhua *et al.*. Optimization of phase noise of opto-electronic oscillator through low-biasing technology for modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0806002
洪 俊, 杨 春, 崇毓华 等. 调制器低偏置方案优化光电振荡器相位噪声[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0806002
- 7 D. Eliyahu, D. Seidel, L. Maleki. RF amplitude and phase-noise reduction of an optical link and an opto-electronic oscillator[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 2008, **56**(2): 449~456
- 8 Jiang Yang, Yu Jinlong, Wang Yaotian *et al.*. A novel scheme of dual-loop optoelectronic oscillator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 919~922
江 阳, 于晋龙, 王耀天 等. 一种新型双环光电振荡器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 919~922
- 9 X. S. Yao, L. Maleki. Multiloop optoelectronic oscillator[J]. *IEEE J. Quantum. Electron.*, 2000, **36**(1): 79~84
- 10 T. Bánky, B. Horváth, T. Berceli. Optimum configuration of multiloop optoelectronic oscillators[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(7): 1371~1380

栏目编辑: 王晓琪