

文章编号: 0253-2239(2010)03-0833-06

有源光纤环形腔内相位调制产生多波长激光

胡宗福 王 浩

(同济大学电子与信息工程学院信息与通信工程系, 上海 201804)

摘要 多波长窄线宽激光光源可以大幅降低高密度波分复用器(DWDM)光网络节点设备的光源成本。用有源光纤环形腔内相位调制方法来产生多波长光源,避免了激光阈值特性引起的模式竞争导致的输出功率稳定性差的缺点,通过腔长控制与射频调制频率调节可以实现数百个波长窄线宽激光稳定输出,导出了该方法产生多波长光源光波表达式。数值计算结果表明:相对总输出和单波长相对输出与组成光纤环形腔的输入/输出耦合器的耦合系数和相位调制器的相位调制深度有关,耦合器的耦合系数在 0.9 以下,同时相位调制深度在 2.0 rad 以上有利于输出功率稳定,总输出和单波长输出功率分别达到几百毫瓦和毫瓦级。对任意边带激光线宽的理论分析和计算显示:在腔内环行时间不是远大于输入光的相干时间时,任一波长激光的线宽与输入激光的线宽相当。

关键词 激光技术;多波长激光;有源光纤环形腔;相位调制

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103003.0833

Multi-Wavelength Laser Generated by an Active Fiber Ring Resonator Incorporating an Optical Phase Modulator

Hu Zongfu Wang Hao

(Department of Information and Communication, School of Electronics and Information, Tongji University, Shanghai, 201804, China)

Abstract Multi-wavelength narrow linewidth lasers can greatly reduce the cost for light sources used in dense wavelength division multi-plexing (DWDM) optical network node equipment. A way to achieve it by an active fiber ring resonator incorporating an optical phase modulator is proposed. Its output power is stable because there is no mode competition in it. Hundreds of laser wavelengths can be achieved when the frequencies of input laser and radio frequency modulation signal coincide with the frequency of the resonator's longitudinal mode. The expression of the multi-wavelength laser is derived. Computed results show that the relative total output and the single-wavelength relative output are related to modulation depth of phase modulator and coupling coefficient of the input/output coupler. The coupling coefficient below 0.9 and the phase modulation depth above 2.0 rad benefit stability of output power. Total output and single-wavelength output power can reach several hundreds milliwatt and milliwatt levels. Theoretical analysis and calculations show the linewidth of any laser wavelength in the multi-wavelength laser is about equal to that of input laser when the circulating time inside the resonator is not much larger than coherent time of input laser.

Key words laser technique; multi-wavelength laser; active fiber ring resonator; phase modulation

1 引 言

随着高速率大容量光纤通信系统的发展,密集波分复用(DWDM)光纤通信网络节点的波长信道数越来越多,每个波长信道需用一个频率符合国际电信联盟远程通信标准化组(ITU)标准的窄线宽激

光,多波长光源是最佳选择。所以结构紧凑,功率与波长稳定的多波长光源已成为一个重点研究与开发方向。由于激光增益介质的均匀加宽特性和激光的阈值特性,在均匀加宽范围内的多波长激光之间有强烈的模式竞争,结果导致多波长激光器工作时的

收稿日期: 2009-05-18; 收到修改稿日期: 2009-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(60972002)资助课题。

作者简介: 胡宗福(1959—),男,博士,副教授,主要从事光纤通信技术,光纤无线通信等方面的研究。

E-mail: huzongfu@tongji.edu.cn

任一波长输出功率和频率不稳定,难以满足 DWDM 光纤通信对光源的要求。目前关于多波长激光的研究和实现方法主要是利用激光的阈值条件,在谐振腔内插入滤波器来抑制模式竞争,获得多波长激光输出。例如:在用半导体光放大器的光纤环形腔内插入马赫-曾德尔光纤干涉仪滤波器^[1],利用非线性偏振旋转效应由一段保偏光纤与偏振相关隔离器构成等效 Lyot 双折射光纤周期性滤波器^[2],利用两段 Lyot-Sagnac 滤波器组成的可调滤波器^[3],利用磁光基的差分群延时可调谐滤波器^[4]和利用光纤环形腔作为腔内滤波器^[5]。同时采用减小均匀加宽和腔内滤波的方法已有 48 波长输出的报道^[6],采用声光调制移频加光放大来实现的多频激光器^[7],基于串接 InP 微盘结构的半导体多波长激光器^[8],利用受激布里渊散射来实现的多波长激光器^[9]。本文提出用有源光纤环形腔内相位调制来产生多波长光源,有源光纤环形腔的环程净损耗大于 0,工作在阈值以下,不能产生激光震荡,避免了阈值特性引起的模式竞争,多波长激光来自于被相位调制的输入窄线宽种子激光产生的边带,环形腔可以使在腔内循环的种子光的相位调制深度达到几百弧度从而获得数百个边带波长的窄线宽激光输出,有源环形腔同时也是边带光放大器,由于没有激光阈值特性引起的模式竞争,各波长激光输出功率稳定。

2 有源光纤环形腔内相位调制产生多波长激光的结构与原理

有源光纤环形腔内相位调制方法产生多波长光源的结构如图 1 所示,输入种子激光是单频窄线宽

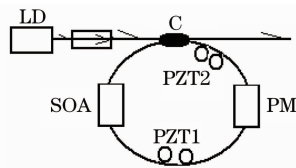


图 1 多波长光源结构示意图

Fig. 1 Schematic of multiwavelength laser source

位于 C 波段连续激光,保偏尾纤输出,C 是保偏输入/输出耦合器,光相位调制器 (PM) 的输入/输出均为保偏尾纤,半导体光放大器 (SOA) 的输入/输出也是保偏尾纤。输入种子激光的偏振态与波导相位调制器和半导体光放大器的偏振态相同,由于相位调制器和半导体光放大器本身就是偏振器,所以环形腔工作在单一线偏振态。设环形腔的保偏输入/输出耦合器对环形腔的工作偏振态的耦合系数为 K ,插入损耗 δ ;光相位调制器及腔内保偏光纤熔接头引起的插入损耗为 γ ;腔内半导体光放大器的功率增益为 G 。假设输入激光可表示为

$$E_1(t) = E_0 \cos[\omega_0 t + \varphi_0(t)], \quad (1)$$

式中 E_0 和 ω_0 是输入种子光的幅值和角频率, $\varphi_0(t)$ 是与激光线宽相关的随机初相位。设加在相位调制器上射频调制电压为 $V_{mo}(t) = V_0 \cos \omega_e t$,它在相位调制器上产生的相位调制为

$$\psi_{mo}(t) = \pi \frac{V_0}{V_\pi} \cos \omega_e t = \beta \cos \omega_e t, \quad (2)$$

式中 $\beta = \pi V_0 / V_\pi$ 就是相位调制深度。进入谐振腔内的窄线宽单频激光在光纤环形腔内环行多次通过相位调制器和光放大器,每次环行通过保偏耦合器后一部分输出,另一部分继续环行经过相位调制器和光放大器,在腔内经过不同环行次数同时输出的归一化光波幅值^[10]为

$$\begin{aligned} E_3(t)/E_0 = & \sqrt{(1-\delta)(1-K)} \exp[i\omega_0 t + i\varphi_0(t)] + \\ & [i \sqrt{K(1-\delta)}]^2 \sqrt{G(1-\gamma)} \exp[i\omega_0(t-\tau) + i\varphi_0(t-\tau) + i\beta \cos \omega_e(t-\tau_1)] + \\ & [i \sqrt{K(1-\delta)}]^2 \sqrt{G(1-\gamma)} R \exp[i\omega_0(t-2\tau) + i\varphi_0(t-2\tau) + i\beta \cos \omega_e(t-\tau_1) + i\beta \cos \omega_e(t-\tau_1-\tau)] + \\ & [i \sqrt{K(1-\delta)}]^2 \sqrt{G(1-\gamma)} R^2 \exp[i\omega_0(t-3\tau) + i\varphi_0(t-3\tau) + i\beta \cos \omega_e(t-\tau_1) + i\beta \cos \omega_e(t-\tau_1-\tau) + \\ & i\beta \cos \omega_e(t-\tau_1-2\tau)] + \dots, \end{aligned} \quad (3)$$

式中 τ 是光纤环形腔的环程时延, τ_1 是从光相位调制器沿顺时针达到输出端的时延, $R = \sqrt{(1-K)(1-\delta)G(1-\gamma)}$,环程净损耗为 $(1-R^2) > 0$ 。(3)式第一项是输入种子光经过耦合器的直通输出,第二项输入光耦合进入腔内并被一次相位调制和光放大后由耦合器产生的输出,第三项是输入光耦合进入腔内并被两次相位调制和光放大后由耦合器产生的输出,以此类推。

设有源光纤环形腔的纵模频率: $\nu = m \Delta\nu_F$, $\Delta\nu_F = 1/\tau$ 是环形腔的纵模间隔,利用 PZT1 调节腔长使得输入激光与腔一纵模重合时,即有 $\omega_0 \tau = 2\pi\nu_0 \tau = 2\pi\nu\tau = 2\pi m \Delta\nu_F \tau = 2\pi m \frac{1}{\tau} \tau = 2\pi m$,有 $\omega_0(t-n\tau) = \omega_0 t -$

$2\pi m$, 所以 $\exp[i\omega_0(t - n\tau)] = \exp(-i\omega_0 t)$ 。类似地, 调节射频调制频率 ω_e , 使得射频调制频率等于腔纵模间隔的整数倍 $\nu_e = i\Delta\nu_F$, 有 $\omega_e(t - n\tau) = 2\pi\nu_e t - 2\pi\nu_e n\tau = 2\pi\nu_e t - 2\pi \frac{i}{\tau} n\tau = 2\pi\nu_e t - 2\pi \cdot in$, 所以 $\cos \omega_e(t - n\tau) = \cos \omega_e t$, 调节 PZT2 和 PZT1, 使 $\omega_e \tau_1$ 也等于 2π 的整数倍, 有 $\cos \omega_e(t - \tau_1) = \cos \omega_e t$ 。当输入激光的线宽足够窄, 相干长度足够长, 可以不计它在腔内环行延时的影响, 即 $\varphi_0(t - n\tau) \approx \varphi_0 t$, 同时不计光纤环形腔色散的影响, 由(3)式可化简得相对输出

$$E_3(t)/E_0 = \sqrt{(1-\delta)(1-K)} \exp[i\omega_0 t] - K(1-\delta) \sqrt{G(1-\gamma)} \sum_{n=1}^{\infty} R^{n-1} \exp[i(\omega_0 t + n\beta \cos \omega_e t)], \quad (4)$$

式中 n 是输入光在腔内的环行次数。(4) 式说明基于有源光纤环形腔内相位调制产生的多波长激光是种子激光在腔内经过不同次环行后幅值为 $R^{n-1} K(1-\delta) \sqrt{G(1-\gamma)}$, 调制深度为 $n\beta$ 的各边带激光的叠加。即采用有源光纤环形腔结构, 利用种子光在腔内环行实现相位调制深度随环行次数成正比增加, 相位深度可达到几百弧度, 这是目前几十兆赫兹射频调制器件不可能达到的。将(4)式取实部有

$$E_3(t)/E_0 = \sqrt{(1-\delta)(1-K)} \cos \omega_0 t - K(1-\delta) \sqrt{G(1-\gamma)} \sum_{n=1}^{\infty} R^{n-1} \cos(\omega_0 t + n\beta \cos \omega_e t), \quad (5)$$

另一方面, 利用欧拉公式可以证明

$$\begin{aligned} \cos(\omega_0 t + n\beta \cos \omega_e t) &= \sum_{k=-\infty}^{+\infty} J_k(n\beta) \cos[(\omega_0 - k\omega_e)t] = \\ &= \sum_j \sum_k \cdots \sum_p J_j(\beta) J_k(\beta) \cdots J_p(\beta) \cos[\omega_0 - (j+k+\cdots+p)\omega_e]t, \end{aligned} \quad (6)$$

式中 j, k, \dots, p 一共为 n 个, (6) 式左边是相位调制深度为 $n\beta$ 的相位调制产生的边带表达式, 右边就是 n 次相位调制深度为 β 的相位调制产生的边带表达式, 所以用有源光纤环形腔内相位调制获得的相位调制深度等效于用环行次数个相位调制器串接, 可以产生相位调制深度达到几百弧度。根据贝塞尔函数特性, 大的相位调制深度使高阶边带幅值增大, 同时低阶边带幅值减小, 从而获得幅值相近的多边带激光输出。将(5)式利用贝塞尔函数展开可得

$$\begin{aligned} E_3(t)/E_0 &= \sqrt{(1-\delta)(1-K)} \cos \omega_0 t - K(1-\delta) \sqrt{G(1-\gamma)} \sum_{n=1}^{\infty} R^{n-1} J_0(n\beta) \cos \omega_0 t - \\ &= K(1-\delta) \sqrt{G(1-\gamma)} \sum_{n=1}^{\infty} R^{n-1} \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m J_{2m}(n\beta) [\cos(\omega_0 + 2m\omega_e)t + \cos(\omega_0 - 2m\omega_e)t] + \\ &= K(1-\delta) \sqrt{G(1-\gamma)} \sum_{n=1}^{\infty} R^{n-1} \sum_{m=0}^{\infty} (-1)^m J_{2m+1}(n\beta) \{ \sin[\omega_0 + (2m+1)\omega_e]t + \sin[\omega_0 - (2m+1)\omega_e]t \}, \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $J_l(n\beta)$ 是 l 阶贝塞尔函数。上式表明: $+l$ 和 $-l$ 阶边带的幅值相等, 任一边带光的幅值是输入光在光纤环形腔内环行不同次数光所产生的相同边带的叠加; 根据贝塞尔函数性质, $l > n\beta + 5$ 时, $J_l(n\beta) \approx 0$, 所以高阶边带光功率主要来自在腔内环行次数多(相位调制深度大)的光束的贡献; 适当选择输入/输出耦合器的耦合系数 K 可以使基带与高阶边带幅值相近。由(7)式可得到输出基波, 偶次边带, 奇次边带波长激光的归一化幅值

$$\text{基波 } \omega_0: \sqrt{(1-\delta)(1-K)} - K(1-\delta) \sqrt{G(1-\gamma)} \sum_{n=1}^{\infty} R^{n-1} J_0(n\beta), \quad (8)$$

$$\text{偶次边带 } \omega_0 \pm 2m\omega_e: -K(1-\delta) \sqrt{G(1-\gamma)} \sum_{n=1}^{\infty} R^{n-1} \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m J_{2m}(n\beta), \quad (9)$$

$$\text{奇次边带 } \omega_0 \pm (2m+1)\omega_e: +K(1-\delta) \sqrt{G(1-\gamma)} \sum_{n=1}^{\infty} R^{n-1} \sum_{m=0}^{\infty} (-1)^m J_{2m+1}(n\beta). \quad (10)$$

当环形腔耦合器的耦合系数和插入损耗分别是 $k = 0.80$ 和 $\delta = 0.1$, 且 $R = 0.998$, 相位调制器的相位调制深度 $\beta = 2.5$ rad 时, 有源光纤环形腔内相位

调制产生的多波长激光的相对输出功率分布如图 2 所示。由于下边带与对应的上边带功率相等, 图 2 仅给出上边带的分布, 相对输出大于 0.3 的正边带数

达到 150 个,即总的输出激光波长数达到 300 个,但由于贝塞尔函数的周期特性,边带激光输出功率随着边带数波动,多波长激光间的幅度不均匀约达到 20%。由于该多波长激光是不同相位调制深度的相同边带光的相干叠加,有源光纤环形腔的净环程损耗 $1 - R^2 > 0$,没有多波长激光器中的模式竞争问题,所以任一输出波长激光的功率是稳定的。任一波长激光输出功率稳定对 DWDM 通信是必要的,不同波长激光的功率不均衡可以采用均衡滤波器来解决。由于光纤环形腔的响应时间很长,光放大器的增益的快速波动对多波长激光的稳定性影响很小,目前高稳定驱动的半导体光放大器增益的慢波动可以 0.01 dB。

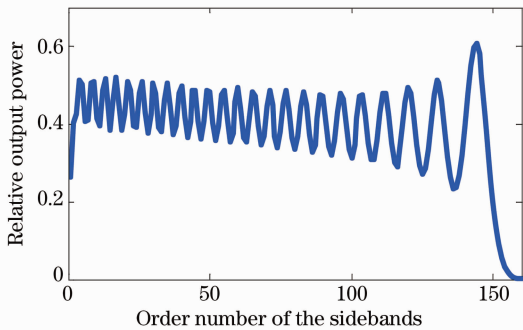


图 2 0~160 阶边带激光的相对输出功率分布
Fig. 2 Relative output power distribution of 0~160th order sideband laser

假设光放大器的增益可以维持 $R = 0.998$ 时,由输出多波长激光中的第 100 阶边带激光的相对输出功率 $|E_{100}(t)/E_0|^2$ 与输入/输出耦合器的耦合系数 K 之间的关系如图 3 所示,相对功率随着输入/输出耦合器的耦合系数 K 的增大而增大,根据图 1 的结构,即输入种子光进入腔内光功率越大,输出光功率越大, $|E_{100}(t)/E_0|^2$ 与耦合系数 K 接近指数关系,这是因为在 $R = \sqrt{(1-K)(1-\delta)G(1-\gamma)} = 0.998$ 为常数时,实际增益 G 与耦合系数 K 有关。在耦合系数大于 0.9 时, $|E_{100}(t)/E_0|^2$ 对耦合系数的变化非常灵敏。所以在采用有源光纤环形腔内相位调制产生多波长光源时,输入/输出耦合系数应小于 0.9。单波长激光相对功率还与相位调制器的相位调制深度 β 有关,对相同的耦合系数 K , β 越大, $|E_{100}(t)/E_0|^2$ 越小,这是因为贝塞尔函数的大小随着宗量 ($n\beta$ 总的调制深度) 的增加而减小。第 100 个边带波长激光的输出光信噪比 (OSNR) 与输入单稳频激光的 OSNR 和有源光纤环形腔的噪声指数决定。由于光放大器用以补偿腔内损耗实现 $R=0.998$,它的工作增益在 20 dB 以

下,它的噪声指数应在 5 dB 左右。另一方面,环形腔本身就是梳状滤波器,所以有源光纤环形腔的噪声指数应小于 5 dB。

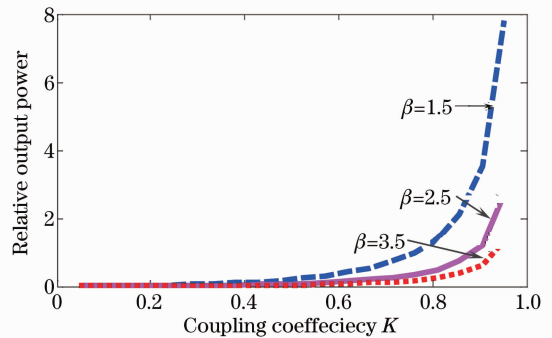


图 3 第 100 阶边带激光的相对输出功率与耦合器的耦合系数的关系

Fig. 3 Relative output power of 100th order sideband laser versus the coupling coefficient of the coupler

虽然边带数随着总的调制深度 $n\beta$ 的增加而增加,但总相对输出功率仍然因相位调制深度 β 的增加而减小,且在 β 较小时对 β 的变化更灵敏,如图 4 所示,同时也随着耦合系数 K 的增加而增大。所以,在基于有源光纤环形腔内相位调制产生多波长激光光源的设计时应避免工作在灵敏区,使单次相位调制深度大于 2.0 rad 来设计调制电压,以提高稳定性。输入/输出光纤耦合器的耦合系数 K 有很好的稳定性,相位调制器的半波电压也是一个稳定的参数,加载的射频调制电压可以达到很高的稳定度,所以基于有源光纤环形腔内相位调制产生的多波长激光具有很高的输出功率稳定性。

3 多波长激光中任一波长激光的线宽

单稳频激光的线宽是由随机初相位 $\varphi_0(t)$ 决定的,(3) 式表示的多波长光源中任一边带波长激光

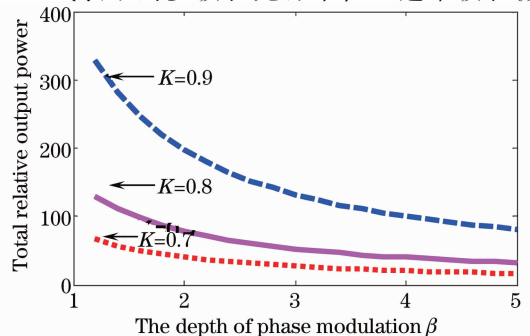


图 4 总相对输出功率与相位调制器的相位调制深度之间的关系

Fig. 4 Total relative output power versus phase modulation depth of the modulator

的线宽同样是由随机初相位决定的。设 $\omega_0\tau$ 和 $\omega_e\tau_1$ 的影响, 考虑随机初相位影响时的输出的基波, 偶次边带与 $\omega_e\tau$ 都等于 2π 的整数倍, 也不计光纤环形腔色散边带, 奇次边带波长激光的归一化光波表达式

基带 ω_0 :

$$\begin{aligned} & \sqrt{(1-\delta)(1-K)} \exp[i\omega_0 t + i\varphi_0(t)] - K(1-\delta) \cdot \\ & \sqrt{G(1-\gamma)} \sum_{n=1}^{\infty} R^{n-1} J_0(\eta\beta) \exp[i\omega_0(t) + i\varphi_0(t - n\tau)], \end{aligned} \quad (11)$$

偶次边带 $\omega_0 \pm 2m\omega_e$:

$$\begin{aligned} & -K(1-\delta) \sqrt{G(1-\gamma)} \{ \exp[i(\omega_0 + 2m\omega_e)t] + \exp[i(\omega_0 - 2m\omega_e)t] \} \cdot \\ & \sum_{n=1}^{\infty} R^{n-1} \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m J_{2m}(\eta\beta) \exp[i\varphi_0(t - n\tau)], \end{aligned} \quad (12)$$

奇次边带 $\omega_0 \pm (2m+1)\omega_e$:

$$\begin{aligned} & K(1-\delta) \sqrt{G(1-\gamma)} \{ \exp[i\omega_0 + (2m+1)\omega_e t] + \exp[i\omega_0 - (2m+1)\omega_e t] \} \cdot \\ & \sum_{n=1}^{\infty} R^{n-1} \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m J_{2m+1}(\eta\beta) \exp[i\varphi_0(t - n\tau)], \end{aligned} \quad (13)$$

将输出多波长激光中频率为 $\nu_m = (\nu_0 - 2m\nu_e)$ 的激光用 $E_{sm}(t)$ 表示

$$E_{sm}(t) = -K(1-\delta) \sqrt{G(1-\gamma)} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^m R^{n-1} J_{2m}(\eta\beta) \exp[i\omega_m t + i\varphi_0(t - n\tau)], \quad (14)$$

对于单稳频输入种子激光, 假设其功率谱为洛仑兹分布, 则它的自相关函数^[10]即为 $C_i(\Delta) = I_0 \exp[-i\omega_0\Delta - \pi(\Delta\nu_0)|\Delta|]$, $I_0 = |E_0|^2$, $\Delta\nu_0$ 是入射光的线宽。所以 $E_{sm}(t)$ 的自相关函数

$$C_{sm}(\Delta) = \langle E_{sm}(t) E_{sm}^*(t - \Delta) \rangle = I_s \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} R^{n+l-2} J_{2m}(\eta\beta) J_{2m}(\eta\beta) \exp[-i\omega_m\Delta - \pi(\Delta\nu_0)|(\Delta - n)\tau + \Delta|], \quad (15)$$

式中 $I_{s0} = [K(1-\delta) \sqrt{G(1-\gamma)}]^2 \cdot C_{sm}(\Delta)$ 的傅里叶变换即得到 $E_{sm}(t)$ 的功率谱分布

$$\begin{aligned} I_s(\nu) &= \mathcal{F}\{C_{sm}(\Delta)\} = I_{s0} \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} R^{n+l-2} J_{2m}(\eta\beta) J_{2m}(\eta\beta) \mathcal{F}\{\exp[-i\omega_m\Delta - \pi(\Delta\nu_0)|(\Delta - n)\tau + \Delta|]\} = \\ & I_{s0} \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} R^{n+l-2} J_{2m}(\eta\beta) J_{2m}(\eta\beta) \exp[i(l-n)\tau(\omega - \omega_m)] \frac{\Delta\nu_0/2\pi}{(\Delta\nu_0/2)^2 + (\nu - \nu_m)^2}, \end{aligned} \quad (16)$$

式中 $\mathcal{F}\{\cdot\}$ 表示傅里叶变换, n 和 l 是输入光在光纤环形腔内的环行次数。由于 n 和 l 的求和范围是相同的, 那么求和的复指数项中一定会有 $l-n = \pm p$, 所以上式可化简为

$$I_s(\nu) = I_{s0} \frac{\Delta\nu_0/2\pi}{(\Delta\nu_0/2)^2 + (\nu - \nu_m)^2} \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} R^{n+l-2} J_{2m}(\eta\beta) J_{2m}(\eta\beta) \cos[(l-n)(\omega - \omega_m)\tau], \quad (17)$$

(17)式说明中心频率为 $\omega_m = \omega_0 - 2m\omega_e$ 的激光的线宽与输入种子激光的线宽基本相同。设输入激光为线宽为 1 MHz 的洛仑兹分布, 环形腔的环程时间 $\tau = 2 \times 10^{-8}$ s (相当于光纤环形腔腔长约 4 m), $R = 0.998$, 图 5 给出了 100 阶边带激光的光谱分布 $I_s(\nu)$ 与频率差 $(\nu - \nu_{100})$ 的关系曲线, 种子光在腔内最大环行次数分别为 $n = 50, 100$ 和 150。图 5 表明: $n = 50, 100$ 的谱分布与种子光的洛仑兹谱分布几乎一样, 线宽也几乎相等, 只有最大值不同 (即总功率不等)。 $n = 150$ 的谱分布明显偏离洛仑兹分布, 再最大值处出现平顶, 半宽度略大于输入信号光, 这

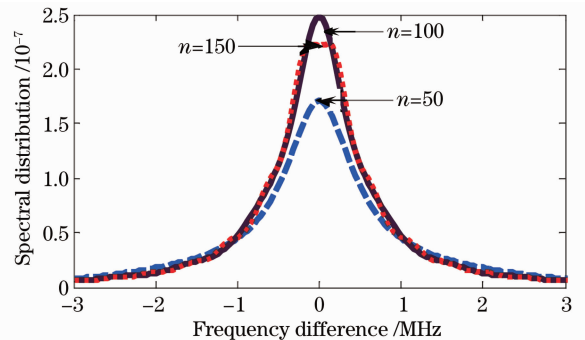


图 5 第 100 阶边带激光的谱分布

Fig. 5 Spectral distribution of 100th order sideband laser

是因为线宽为 1 MHz 的洛仑兹分布对应的相干时间为 3.18×10^{-7} s, 而 150 次腔内环行时间为 3.00×10^{-6} s, 远大于 3.18×10^{-7} s。所以输入激光线宽, 环形腔腔长和最大环行次数的设计应保证在腔内的最大环行时间与输入激光的相干时间相近。这样就可以保证多波长激光中任一波长激光的线宽近似等于输入激光线宽。

4 结 论

利用有源光纤环形腔内置相位调制器可以产生多波长激光, 环形腔结构使输入到腔内的种子光多次通过相位调制器实现相位调制深度的累加, 同时腔内光放大器补偿输入光在腔内的循环损耗, 通过光纤环形腔的腔长控制和射频调制频率调节使得输入种子激光频率和射频调制频率都与环形腔的某一纵模频率重合, 就能实现腔内环行光的相位调制深度与环行次数成正比, 通过有源光纤环形腔程净损耗控制来控制腔内光子寿命从而实现腔内环行光的最大有效环行次数控制, 这样就可以达到要求的总相位调制深度和相应的输出边带激光数。采用有源光纤环形腔内置相位调制器产生的上下边带阶数相同的激光幅值相等, 数值计算结果表明: 在相位调制深度 $\beta = 2.5$ rad, 输入光在腔内的有效环行次数达到 60 时, 就可以获得 300 个波长的多波长激光输出, 这是已有的多波长激光器不可能达到的。由于该多波长激光之间没有多波长激光器中的模式竞争, 所以任一波长激光的输出功率稳定。总输出功率和单波长功率输出随着相位调制器的相位调制深度的增大而减小, 但随着输入/输出耦合器的耦合系数的增大而增加, 且在耦合系数大于 0.9 和相位调制深度小于 2.0 rad 时变化灵敏, 所以选取耦合系数小于 0.9 和相位调制深度大于 2.0 rad 有助于提高光源的功率稳定性; 对多波长光源中任一波长激光的线宽的仿真计算结果表明: 当种子激光在腔内的环行时间不远大于它的相干时间时, 任一边带波长激光的线宽与输入种子光的线宽近似相等, 这样在输入激光为窄线宽激光时, 采用有源光纤环形腔

内相位调制能同时获得数百个波长的窄线宽激光。当输入激光频率满足 ITU 的 DWDM 频率标准时, 控制环形腔的纵模间隔和射频调制频率就可以使多波长激光中的每一个激光频率都满足 ITU 的 DWDM 频率标准, 用一个有源光纤环形腔内相位调制的多波长光源就可以替代数百个单波长半导体激光器, 满足光网络节点的光源要求。

参 考 文 献

- 1 Wang Hua, Yao Minyu, Zhang Hongming *et al.*. Multiwavelength fiber ring laser with semiconductor optical amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1502~1506
王 华, 姚敏玉, 张洪明 等. 采用半导体光放大器的多波长光纤环形激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1502~1506
- 2 Zhang Zuxing, Sang Minghuang, Ye Zhiqing *et al.*. Multiwavelength fiber laser based on nonlinear polarization rotation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 648~652
张祖兴, 桑明煌, 叶志清 等. 基于非线性偏振旋转效应的多波长光纤激光器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 648~652
- 3 Li Shule, Shao Jiafeng, Shen Qishun *et al.*. Multiwavelength fiber ring laser with selectable grid spacing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1802~1806
李抒乐, 邵加峰, 沈启舜 等. 间隔可调多波长光纤激光器的实验研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1802~1806
- 4 T. Luo, L. S. Yan, Y. Q. Shi *et al.*. Tunable wavelength spacing multi-wavelength ring laser using programmable DGD module as intra-cavity filter[J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(25): 1578~1579
- 5 Kwanil Lee, Sang Bae Lee, Ju Han Lee *et al.*. Side-mode suppressed multiwavelength fiber laser and broadcast transmission[C]. *OFC/NFOEC*, 2008. 1~3
- 6 Li Jiafang, Feng Ming, Li Yigang *et al.*. 48 line linear cavity multiwavelength Er-doped fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 485~488
李家方, 冯 鸣, 李乙钢 等. 48 波长线形腔多波长掺铒光纤激光器[J]. *光子学报*, 2005, **34**(4): 485~488
- 7 Jan Lamperski. Active fiber comb source with single and double frequency shifters for UDWDM applications[C]. *ICTON*, 2008, **1**: 282~285
- 8 Joris Van Campenhout, Liu Liu, Pedro Rojo Romeo *et al.*. A compact oI-Integrated multiwavelength laser source based on cascaded InP microdisks[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(16): 1345~1346
- 9 M. N. Mohd Nasir, Z. Yusoff, M. H. Al-Mansoori *et al.*. Ring cavity multi-wavelength brillouin-erbium fiber laser utilizing a fiber bragg grating filter[C]. *ICSE*, 2008. 323~325
- 10 Hu Zongfu, Qian Jingren, Shen Huiming. Light source effects on effective fineness of a fiber-optic ring resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(5): 609~613
胡宗福, 钱景仁, 沈会明. 光源的特性对光纤环形腔有效精细度的影响[J]. *光学学报*, 1997, **17**(5): 609~613