

文章编号: 1001-3806(2006)02-0206-03

SOA 反射率对谐波锁模光纤激光器的影响

江光裕¹, 吴正茂¹, 杨 敏², 林晓东¹, 夏光琼^{1*}

(1. 西南大学 物理学院, 重庆 400715; 2. 涪陵师范学院 物理系, 涪陵 408000)

摘要: 基于半导体光放大器 (SOA) 的锁模光纤环行激光器因其能得到高质量、高重复率的光脉冲而受到人们的广泛关注。计及 SOA 端面剩余反射率, 建立了基于 SOA 的谐波锁模光纤环行激光器的理论模型。利用该模型研究了 SOA 的端面剩余反射率对输出脉冲的波形、峰值功率及其脉冲宽度的影响。结果表明, SOA 的端面剩余反射率对锁模脉冲影响较大; 随着端面剩余反射率的增大, 峰值功率逐渐增加, 脉冲宽度逐渐变宽。

关键词: 激光技术; 半导体光放大器 (SOA); 端面剩余反射率; 谐波锁模

中图分类号: TN248.3⁺5 文献标识码: A

The influence of residual facet reflectivity of SOA on the output pulse of harmonic mode-locked fiber ring laser

JIANG Guang-yu¹, WU Zheng-mao¹, Yang Min², LIN Xiao-dong¹, XIA Guang-qiong¹

(1. School of Physics, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Department of Physics, Fuling Teachers College, Fuling 408000, China)

Abstract Actively mode-locked fiber lasers based on the semiconductor optical amplifier (SOA), which are capable of generating ultrashort pulse train with high quality and high repetition rates have received considerable attention. After considering the facet reflectivity of the SOA, a theoretical model of the harmonic mode-locked fiber ring laser based on SOA is established. Based on this model, the influence of the facet residual reflectivity on the shape, peak power and pulse width of the pulse output from the harmonic mode-locked fiber ring laser is studied. The results show the residual facet reflectivity of the SOA affects seriously the shape of the mode-locked pulse. With the increase of the facet reflectivity of the SOA, the peak power of the mode-locked pulse will be increased and the mode-locked pulse will be broaden.

Key words laser technique; semiconductor optical amplification (SOA); facet residual reflectivity; harmonic mode-locked

引 言

SOA 具有增益谱宽、非线性系数高、功耗低和易于集成的优点, 将成为未来超高速、大容量全光网中的关键器件^[1]。目前, 基于 SOA 的锁模光纤环行激光器因其能得到高质量、高重复率的光脉冲而倍受人们的青睐, 人们对其工作特性进行了理论和实验研究^[2~4]。在描述基于 SOA 的锁模光纤环行激光器的理论模型中, 为了简化, 大多忽略了 SOA 的端面剩余反射率。而在实际应用中, 虽然人们采用在 SOA 的两端面镀制减反射膜以降低其端面反射率, 但总存在一定的剩余反射率。因此, 有必要研究端面的剩余反射率对基于 SOA 的谐波锁模光纤环行激光器的锁模脉冲的影响。作者在考虑了 SOA 端面剩余反射率的情况下, 建立了基于 SOA 的谐波锁模光纤环行激光器理论模型, 数值模拟了 SOA 端面剩余反射率对锁模光脉冲特性的影

响, 该研究结果对谐波锁模光纤环行激光器的设计具有一定的指导意义。

1 理论模型

基于 SOA 的谐波锁模光纤环行激光器的结构如图 1 所示^[5]。分布反馈激光二极管 (DFB-LD) 输出的调制光信号脉冲, 通过一个偏振控制器 (PC) 和一个耦合比为 50:50 的光纤耦合器 1 (OC₁) 进入调制 SOA 中, PC 是用来控制光场的偏振态。利用调制 SOA 中的交叉增益效应实现对信号的调制, 增益 SOA 提供增

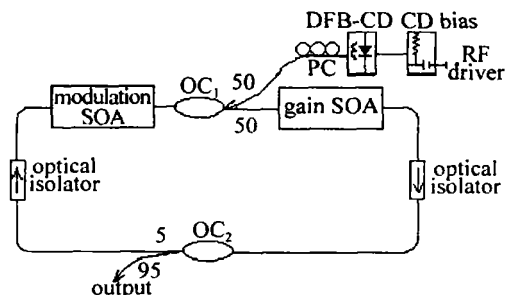


Fig 1 Schematic diagram of harmonic mode-locked fiber ring laser based on SOAs

作者简介: 江光裕 (1979-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光与光通信方面的研究。

* 通信联系人。E-mail: zmwu@swnu.edu.cn

收稿日期: 2005-01-10 收到修改稿日期: 2005-03-22

益以克服脉冲在腔内传输时的损耗, 环路中的光隔离器用以保证光单向传输, 锁模脉冲从光纤耦合器 2 (OC₂) (其耦合比为 5:95) 输出。调节 DFB-LD 产生的调制信号光脉冲的频率 f_1 , 当 $f_1 = Nf_0$ (f_0 为环形腔的基频, N 为整数) 时, 即满足激光器实现谐波锁模的条件, 最终从耦合器的输出端输出重复频率为 f_1 的稳定的谐波锁模光脉冲。

光脉冲的复振幅 A 可表示为: $A = \sqrt{P} \exp(i\varphi)$ (1) 式中, P , φ 分别为脉冲的光功率和相位。在 SOA 中沿着光传输的方向, 由于存在受激辐射, 因此载流子密度是不断变化的。为了更准确地模拟光脉冲在调制 SOA 中的传输特性, 采用分段模型进行处理。在调制 SOA 的不同位置, 载流子密度及光功率满足以下的微分方程^[5-6]: $\partial N_j(z, T) / \partial T = I/qV - N_j(z, T) / \tau_c -$

$$\left[\frac{\Gamma g_{m,j}(z, T) \bar{P}_{m,j}}{h\nu A_{\text{cross}}} + \frac{\Gamma g_{l,j}(z, T) \bar{P}_{l,j}}{h\nu A_{\text{cross}}} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial P_{m,j}(z, T)}{\partial z} = - [\Gamma g_{m,j}(z, T) - \alpha_{\text{int}}] P_{m,j}(z, T) \quad (3)$$

$$\frac{\partial P_{l,j}(z, T)}{\partial z} = [\Gamma g_{l,j}(z, T) - \alpha_{\text{int}}] P_{l,j}(z, T) \quad (4)$$

$$\partial \varphi_{l,j} / \partial z = - \beta_0 g_{l,j}(z, T) / 2 \quad (5)$$

$$\partial \varphi_{m,j} / \partial z = - \beta_0 g_{m,j}(z, T) / 2 \quad (6)$$

式中, 下标 j 表示 SOA 中的第 j 段, 下标 l 和 m 分别表征锁模和调制光脉冲, N 为载流子数密度, P 为光功率, $T (= t - z/v_g, v_g$ 为 SOA 中的群速度) 是在随脉冲运动的参照系中所测得的时间, I 是调制 SOA 的注入电流, V 为 SOA 有源区体积, e 是电子电量, $\tau_c = (AN + BN^2 + CN^3)^{-1}$ 为载流子寿命, A , B 和 C 分别表征非辐射复合、自发辐射、俄歇复合过程, β_0 为线宽增强因子, $h\nu$ 为光子能量, S 为有源区横截面积, α_{int} 为 SOA 的内部损耗, $\bar{P}_{l,j}$ 为第 j 段的平均光功率, 其表达式为:

$$\bar{P}_{m,j} = \frac{1}{-\Delta L} \int_{(j-1)\Delta L}^{j\Delta L} P_{m,j+1} \exp\{-[\Gamma g_{m,j}(N_j) - \alpha_{\text{int}}]z\} dz = \frac{\exp\{[\Gamma g_{m,j}(N_j) - \alpha_{\text{int}}]\Delta L\} - 1}{[\Gamma g_{m,j}(N_j) - \alpha_{\text{int}}]\Delta L} P_{m,j+1} \quad (7a)$$

$$\bar{P}_{l,j} = \frac{1}{\Delta L} \int_{(j-1)\Delta L}^{j\Delta L} P_{l,j-1} \exp\{[\Gamma g_{l,j}(N_j) - \alpha_{\text{int}}]z\} dz = \frac{\exp\{[\Gamma g_{l,j}(N_j) - \alpha_{\text{int}}]\Delta L\} - 1}{[\Gamma g_{l,j}(N_j) - \alpha_{\text{int}}]\Delta L} P_{l,j-1} \quad (7b)$$

式中, Γ 为模式限制因子, ΔL 是调制 SOA 的每一小段的长度, $P_{l,j-1}$ 是 SOA 中第 $j-1$ 段的输出的锁模脉冲光功率, $P_{m,j+1}$ 是 SOA 中第 $j+1$ 段的输出的调制脉冲光功率, $g_{m,j}$ 和 $g_{l,j}$ 分别代表调制和锁模脉冲所获得的增益系数, 可表示为^[6]:

$$g_{m,j} = \frac{a_1(N_j - N_0) - a_2(\lambda_m - \lambda_{w_j})^2 + a_3(\lambda_m - \lambda_{w_j})^3}{1 + \varepsilon(P_{m,j} + P_{l,j})} \quad (8a)$$

$$g_{l,j} = \frac{a_1(N_j - N_0) - a_2(\lambda_l - \lambda_{w_j})^2 + a_3(\lambda_l - \lambda_{w_j})^3}{1 + \varepsilon(P_{l,j} + P_{m,j})} \quad (8b)$$

式中, a_1 是微分增益系数, N_0 是透明载流子密度, a_2 和 a_3 分别用来表示增益带宽和增益的不对称性, ε 为增益压缩因子, λ_m 和 λ_l 分别为调制和锁模脉冲的中心波长, λ_{w_j} 是跟载流子密度有关的增益峰值波长, 可表示为^[6-7]:

$$\lambda_w = \lambda_0 - a_4(N_j - N_0) \quad (9)$$

式中, λ_0 为 SOA 透明时的增益峰值波长, a_4 用来表示增益峰值波长随腔内载流子密度的漂移。

考虑 SOA 端面剩余反射率, 光场 E 在 SOA 的端面处满足以下的边界条件^[8]:

$$\begin{cases} E^f(0, t) = \sqrt{1 - R_1} A_1^f(0, t) \exp(i\omega_1 t) + \sqrt{R_1} A_m^b(0, t) \exp(-i\omega_m t) \\ E^b(L, t) = \sqrt{R_2} A_l^b(L, t) \exp(i\omega_1 t) + \sqrt{1 - R_2} A_{m0} \exp(-i\omega_m t) \\ E_{\text{out}}(L, t) = \sqrt{1 - R_2} E^f(L, t) + \sqrt{R_2} A_{m0} \exp(i\omega_1 t) \end{cases} \quad (10)$$

式中, 上标 f 和 b 分别表示前向波和后向波, R_1, R_2 分别对应 SOA 的前、后端面剩余反射率, A_{m0} 为从 DFB-LD 输出的调制光脉冲的慢变场振幅, L 为 SOA 有源区长度, ω 为光脉冲的中心频率。

假定光脉冲通过耦合器时, 仅使脉冲的能量衰减。光脉冲在增益 SOA 中的传输与在调制 SOA 中的传输类似, 只需令与调制光脉冲相关的各项为 0 即可。而脉冲在光纤中的传输满足以下的非线性薛定谔方程^[9]: $\partial A / \partial z + (i/2) \beta_2 \partial^2 A / \partial T^2 = i\gamma |A|^2 A$ (11) 式中, A 是光脉冲的复振幅, β_2 为群速度色散 (GVD) 参量, γ 为非线性系数。

因此, 当已知 DFB-LD 所产生的调制信号光脉冲的形状 A_{m0} 以及两个 SOA 的各个参量, 假定一个初始的锁模脉冲形状, 采用四五阶变步长龙格-库塔法对 (1) 式 ~ (10) 式进行数值求解, 即可得到光脉冲通过两个 SOA 后的脉冲分布, 再根据 (11) 式, 利用快速傅里叶变换, 即可得到光脉冲在环形腔中传播 1 周后的脉冲形状。如果不能实现自再现, 把传输 1 周后的脉冲分布作为新的入射脉冲, 重新按上面的步骤进行计算, 直到脉冲能实现自再现, 则此时的输出光脉冲即为锁模光脉冲。

2 结果与讨论

2.1 端面剩余反射率对输出脉冲波形的影响

图 2 中给出了端面剩余反射率 $R (= R_1 = R_2)$ 取不同值时, 输出脉冲的波形。模拟过程中 SOA 被分成 10

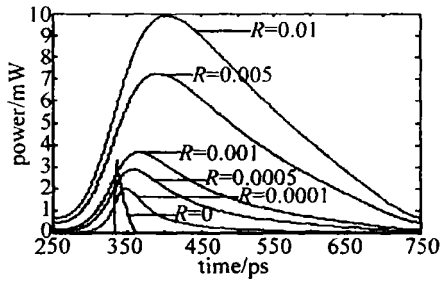


Fig 2 The mode-locked pulse shape for different R

等份,并忽略光纤对脉冲传输的影响,所用的其它数据为: $\Gamma = 0.3$, $\alpha_{int} = 20\text{cm}^{-1}$, $L = 500\mu\text{m}$, $S = 0.4\mu\text{m}^2$, $a_1 = 2.5 \times 10^{-20}\text{m}^2$, $a_2 = 7.4 \times 10^{18}\text{m}^{-3}$, $a_3 = 3.155 \times 10^{25}\text{m}^{-4}$, $a_4 = 3 \times 10^{-32}\text{m}^4$, $A = 2.5 \times 10^8\text{s}^{-1}$, $B = 1 \times 10^{-16}\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $C = 0.94 \times 10^{-40}\text{m}^6 \cdot \text{s}^{-1}$, $N_0 = 1.5 \times 10^{24}\text{m}^{-3}$, $e = 1.6 \times 10^{-19}\text{C}$, $c = 3 \times 10^8\text{m/s}$, $\lambda_0 = 1605\text{nm}$, $\epsilon = 0.2\text{W}^{-1}$, 调制 SOA 的电流 $I_1 = 76.5\text{mA}$, 增益 SOA 的电流 $I_2 = 185\text{mA}$, 由 DFB-LD 产生的光脉冲假定为 $P_{m0} = |A_{m0}|^2 = 8 \times 10^{-3} [1 + 0.9 \cos(2\pi f_1 t)]$ ($f_1 = 2\text{GHz}$)。由图可知,锁模脉冲前沿较陡峭,后沿较为平缓,脉冲的上升时间明显小于下降时间,这是由于 SOA 的增益饱和效应引起的^[5];另外, R 的大小对锁模脉冲的形状影响很大,在同样的情况下,考虑端面剩余反射率后得到的锁模脉冲宽度远大于把 SOA 理想化 ($R = 0$) 时的模拟结果。因此,即使 SOA 的反射率非常小 ($\approx 10^{-4}$),也不能不考虑端面剩余反射率的影响。

2.2 端面剩余反射率对脉冲输出功率、脉冲宽度的影响

图 3 中给出了脉冲的输出功率、脉冲宽度随端面

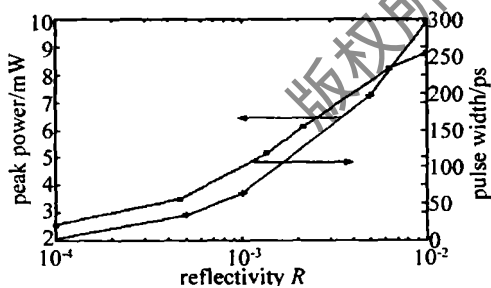


Fig 3 Dependence of the peak power and pulse width on the R

剩余反射率 $R (= R_1 = R_2)$ 的变化曲线。由图 3 可知:当 SOA 的端面剩余反射率逐渐增大时,锁模脉冲的峰值功率和脉冲宽度都将逐渐增大。这是因为随着 SOA 端面剩余反射率 R 增大,从 DFB-LD 输出的调制信号通过 SOA 的前端面反射直接进入光路中的能量就会增多,相当于降低了整个锁模光纤激光器的阈值;另一方面,随着 R 的增大,SOA 对脉冲的增益会下降^[10]。锁模脉冲的峰值功率和脉冲宽度随 R 的变化规律是两种因素共同作用的结果。在讨论的范围内 ($10^{-4} < R < 10^{-2}$),前一种因素的影响占主要,即随着

R 的增加,腔内环行 1 周的小信号增益将增加,这就直接导致脉冲的峰值功率的增加;而小信号增益的增加,同时还会导致脉冲在一个更大的时间范围内都能得到放大,即脉冲宽度的增加。

3 结束语

在考虑 SOA 的端面剩余反射率情况下,建立了基于 SOA 谐波锁模光纤环行激光器的理论模型,着重研究了 SOA 的端面剩余反射率对锁模脉冲的波形、峰值功率及其脉冲宽度等的影响。研究表明:SOA 的端面剩余反射率极大地影响锁模脉冲的形状,即便 SOA 的端面剩余反射率很小 ($\approx 10^{-4}$),所得结果也与理想的行波放大器 ($R = 0$) 相差很大。故为了正确模拟基于 SOA 谐波锁模光纤环行激光器的行为,必须考虑 SOA 端面剩余反射率的影响。另外随着 R 的增大,峰值功率逐渐增加,脉冲宽度逐渐变宽。因此,为了得到窄的锁模脉冲,应使 SOA 的偏置电流小于采用行波放大器模型所得的结果。需要指出的是,尽管所做工作只是一种理论探索,但所得结果就物理上而言是有其合理性的,相关的实验研究将是下一步的工作。

参考文献

- [1] HONG W, HUANG D X, SUN J Q *et al* Numerical simulation of picosecond gain and index nonlinearities in semiconductor optical amplifiers under repeated pulse injection [J]. *Acta Optica Sinica* 2003, 23 (4): 459~464 (in Chinese).
- [2] YANG S Q, LI Z H, ZHAO L C *et al* Pulse amplitude equalization in a rational harmonic mode-locked fiber ring laser by using modulator as both mode locker and equalizer [J]. *IEEE Photonics Technology Letters* 2003, 15(3): 389~391.
- [3] WU C, DUTTA N K. High-repetition rate optical pulse generation using a rational harmonic mode-locked fiber laser [J]. *IEEE J Q E*, 2002, 36(2): 145~149.
- [4] ZOIRO S K, STATHOPOULOS T, VIACHOS K *et al* Experimental and theoretical studies of a high repetition rate fiber laser mode-locked by external optical modulation [J]. *Opt Commun* 2000, 180: 301~315.
- [5] LIN G R, LIAO Y S, XIA G Q. Dynamics of optical backward-injection induced gain depletion modulation and mode locking in semiconductor optical amplifier fiber lasers [J]. *Optical Express* 2004, 12 (10): 2017~2026.
- [6] XIA G Q, WU Z M, LIN G R. Rising and falling time of amplified picosecond optical pulses by semiconductor optical amplifiers [J]. *Opt Commun*, 2003, 227: 165~170.
- [7] LIM, SUN J Q, LU D M *et al* Study on degradation of extinction ratio of wavelength converter based on XGM [J]. *Laser Technology* 2001, 25(1): 76~79 (in Chinese).
- [8] JIN T, ZHOU W, HUANG D X. Analysis of chirping characteristics of a semiconductor optical amplifier [J]. *Laser Technology*, 1998, 22 (3): 144~146 (in Chinese).
- [9] AGRAWAL G P. *Nonlinear fiber optics* [M]. 2nd ed, New York: Academic Press, 1995: 43~46.
- [10] AGRAWAL G P, DUTTA N K. *Semiconductor lasers* [M]. 2nd ed, New York: Van Nostrand Reinhold, 1993: 496~498.