

自调Q掺铒光纤环形激光器的研究*

黄志坚 孙军强 黄德修

(华中理工大学光电子工程系, 武汉 430074)

提要 对一种结构新颖的自调Q掺铒光纤环形激光器的工作机理进行了研究。结果表明,该激光器中由光纤耦合器和半导体激光器芯片组成的反馈光路,依据光纤环中相向传输激光场相差的不同,对进入掺铒光纤的激光场进行选择反馈,在光纤环中激发幅度不断增强的光脉冲,引起掺铒光纤的瞬态增益饱和,实现激光器的自调Q。理论分析能较好地解释实验中观察到的现象。

关键词 自调Q,选择反馈,瞬态增益饱和

1 引言

掺铒光纤放大器能提供与偏振无关的增益,插入损耗低,具有良好的噪声特性,已成为光纤通信系统中的关键部件越来越受到人们的重视。与此同时,使用半导体激光器泵浦的掺铒光纤激光器,其激射波长在1.5 μm 附近,与光纤通信的第三传输窗口相匹配,并且结构简单,与传输光纤易于耦合,因此掺铒光纤激光器作为可靠的信号光源,在光纤通信系统中具有十分广阔的应用前景。掺铒光纤激光器除能以连续方式工作外,采用调Q和锁模技术,它又能以脉冲方式工作,输出高峰值功率的激光脉冲。最初,使用声光调Q技术,在掺铒光纤激光器中实现了调Q脉冲输出^[1]。利用在4.2 K温度下掺铒光纤的吸收漂白特性,M. Nakazama等在环形掺铒光纤激光器中观察到自调Q脉冲^[2]。使用半导体介质或半导体薄膜作为饱和吸收体在掺铒光纤激光器中亦可实现自调Q脉冲输出^[3]。

本文中给出了一种结构新颖的掺铒光纤环形激光器。在实验研究中,该结构的激光器实现了自调Q光脉冲输出。本文对该激光器的自调Q工作机理进行了分析,理论分析能较好地解释实验中观察到的现象。

2 实验装置和实验结果

实验中所采用的激光器结构如图1所示。掺铒光纤用1470 nm的半导体激光器(LD₁)泵浦,泵浦光由1470/1530 nm的波分复用器(WDM)耦合进掺铒光纤,激光场通过1530 nm光纤耦合器输出。光纤耦合器的一个端口和半导体激光器芯片(LD₂)相耦合。波分复用器、光纤耦合器、掺铒光纤和单模光纤组成光纤环形腔,由于该结构的激光器中没有采用光隔离器,降低了

* 国家自然科学基金、国家教委博士点基金资助项目。

收稿日期: 1995年9月18日; 收到修改稿日期: 1995年11月27日

激光器的腔内损耗,从而降低了激光器的工作阈值,使得掺铒光纤的泵浦功率下降。实验中所

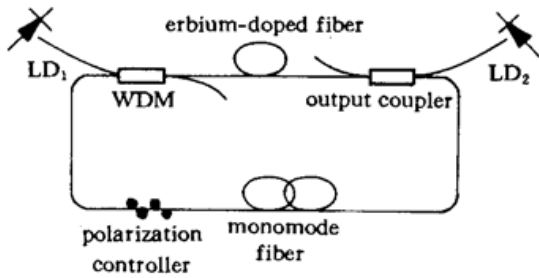


Fig. 1 Schematic diagram of a self-*Q*-switched erbium-doped fiber ring laser

90%,对 1530 nm 受激辐射光场从端口 2 到端口 4 的耦合效率大于 85%。光纤耦合器对 1530 nm 激光场的耦合系数为 0.8。

用的掺铒光纤长度为 13 m,数值孔径 $NA = 0.18$,芯径为 $2.5 \mu\text{m}$ 。作为泵浦源用的半导体激光器 (LD_1)最大允许输出功率为 50 mW。用作反射镜的 LD_2 芯片亦可作为泵浦源,其受激发射波长为 1465 nm,工作阈值电流为 71 mA,在实验中该芯片工作在阈值以下,不产生受激发射。并且 LD_2 芯片对 1530 nm 激光场透明^[4],仅产生微弱的线性吸收损耗。波分复用器对泵浦波长 1470 nm 光场从端口 1 到端口 4 的耦合效率大于

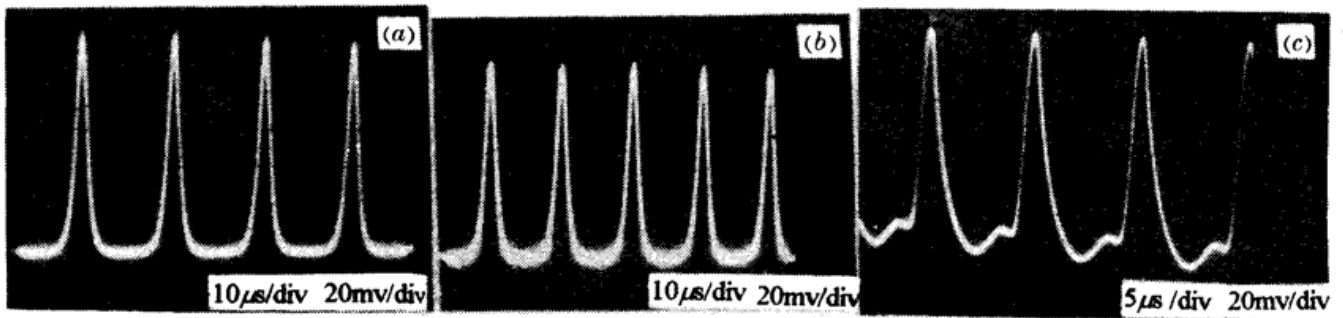


Fig. 2 Self-*Q*-switching pulse train displayed on an oscilloscope with the bias current being $LD_2 I_{\text{bias}} = 5 \text{ mA}$. The parameters are (a) $P = 16 \text{ mW}$, $l = 2 \text{ m}$; (b) $P = 20 \text{ mW}$, $l = 2 \text{ m}$; (c) $P = 20 \text{ mW}$, $l = 1.133 \text{ km}$

当光纤环中单模光纤的长度为 2 m,泵浦功率为 16 mW, LD_2 芯片的偏置电流为 5 mA 时,激光器的输出波形如图 2 (a) 所示,脉冲的宽度为 $6 \mu\text{s}$,脉冲序列的周期为 $20 \mu\text{s}$,重复率为 50 kHz。改变 LD_2 芯片的偏置电流,在几个特定的电流值下,激光器的输出不变。但当把 LD_2 偏置在零电流,或移开 LD_2 时,激光器脉冲输出消失,激光器转为 CW 工作。根据以上现象,可以认为在掺铒光纤环形激光器实现了自调 *Q* 工作。增大泵浦功率至 20 mW,脉冲的宽度有轻微变化但脉冲序列的重复率增至 56 kHz [图 2(b)]。保持泵浦功率为 20 mW,加长光纤环中单模光纤的长度至 1.133 km,脉冲序列的重复率增大为 67 kHz,脉宽缩小为 $2 \mu\text{s}$ [图 2(c)]。

3 工作机理

在图 1 所示的光纤环形腔中,当掺铒光纤受激发射时,在光纤环中必定存在两相向传输的激光场。为简单起见,假设光纤环中掺铒光纤激射的顺时针和逆时针传输的激光场具有相同的振幅 E ,同时设顺时针和逆时针传输激光场的初始相位分别为 δ_+ 和 δ_- 。那么,由光纤耦合器和半导体激光器芯片 (LD_2) 形成的反馈光路,必定对其中一个方向传输的激光场形成反射(如图 3 所示)。假设光纤耦合器的损耗忽略不计,其功率耦合系数与偏振无关,则其传输矩阵可写为:

$$M = \begin{bmatrix} k^{1/2} & i(1-k)^{1/2} \\ i(1-k)^{1/2} & k^{1/2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

上式中 k 为光纤耦合器的功率耦合系数, 则顺时针传输入射到 LD₂ 芯片的激光场为

$$E_1 = i(1 - k)^{1/2} E \cdot e^{i\phi} \quad (2)$$

激光场 E_1 经 LD₂ 芯片反射回的激光场 E'_1 为

$$E'_1 = E_1 \cdot \tau_{LD} \quad (3)$$

式中 τ_{LD} 是 LD₂ 芯片的复振幅反射系数, 将 LD₂ 芯片看成 F-P 标准具, 忽略 LD₂ 芯片的微弱光吸收损耗, 可以推出 τ_{LD} 为

$$\tau_{LD} = \frac{-\sqrt{R_F} + \sqrt{R_B} \cdot e^{i\phi}}{1 - \sqrt{R_F} \cdot R_B \cdot e^{i\phi}} \quad (4)$$

式中的 R_F , R_B 分别为 LD₂ 芯片的前后反射腔镜的功率反射系数。由于 LD₂ 芯片以其天然解理面作为反射腔镜, 则有 $R_F = R_B = R$, 一般 R 的值约为 0.31^[4], 那么(4)式可以简化成

$$\tau_{LD} = \frac{(e^{i\phi} - 1) \sqrt{R}}{1 - R \cdot e^{i\phi}} \quad (5)$$

(4) 和(5)式中的 ϕ 为激光场在 LD₂ 芯片中的往返相移, 且

$$\phi = 4\pi nd/\lambda \quad (6)$$

n 为 LD₂ 芯片的折射率, d 为芯片的长度。

掺铒光纤中逆时针方向激射的激光场经单模光纤传输后, 入射到光纤耦合器的激光场为 E_2 , 且

$$E_2 = E \cdot e^{i(\delta_0 - \Delta\delta)} \quad (7)$$

式中 $\Delta\delta$ 为逆时针方向激射的激光场经单模光纤传输后产生的相位延迟。 E'_1 和 E_2 经光纤耦合器相迭加后进入掺铒光纤的激光场为 E' , 且

$$E' = [k^{1/2} - (1 - k) \cdot \tau_{LD} \cdot e^{i\phi}] \cdot E \cdot e^{i(\delta_0 - \Delta\delta)} \quad (8)$$

式中的 $\delta = \delta_0 - \delta_0 + \Delta\delta$, 定义复振幅反馈系数 r 为

$$r = k^{1/2} - (1 - k) \cdot \tau_{LD} \cdot e^{i\phi} \quad (9)$$

那么, E' 的光场强度为

$$|E'|^2 = |r|^2 \cdot |E|^2 \quad (10)$$

由(5)和(9)式, 可以看出在给定 LD₂ 芯片, 即给定 R 时, 反馈系数 r 是激光场在 LD₂ 芯片中的相移 ϕ , 光纤环中相向传输激光场之间的相差 δ 和光纤耦合器功率耦合系数 k 的函数。由下面的数值分析可知, 在给定 R 值下, 通过适当地选择 ϕ 和 k 值, 对于不同的相差 δ 存在一个正反馈相位条件, 当 δ 满足该正反馈条件时, 反馈进入掺铒光纤的激光场将得到增强, 即由 LD₂ 芯片和光纤耦合器组成的反馈光路为光纤环形腔提供了正反馈, 功率反馈系数 $|r|^2 > 1$ 。若相向传输激光场的相差 δ 不满足该正反馈条件, 反馈进入掺铒光纤的激光场将产生衰减, 衰减的程度随 δ 的不同而不同。

图 4 为给定 R 和 k 时, 在不同的 ϕ 相移条件下, 功率反馈系数 $|r|^2$ 随相向传输激光场相差 δ 变化的曲线。由图 4 可以看出, 在确定的 ϕ 值下, δ 在一定的范围内, 有 $|r|^2 > 1$, 此时反馈进入掺铒光纤的激光场将获得增强。并且对于不同的 ϕ 值, $|r|^2$ 都将在 $\delta = 2n\pi$ (n 为整数) 附近达到最大值, 在 $\delta = (2n + 1)\pi$ 附近衰减到接近于零。图 5 为 R 和 k 一定时, 在不同的相差 δ 下, 功率反馈系数 $|r|^2$ 随反射相移 ϕ 变化的曲线。很明显, 对于一定的 δ 值, 只有 ϕ 值在一定范围内, 才

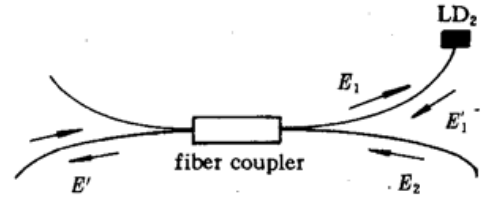


Fig. 3 Configuration of an optical feedback circuit consisting of a fiber coupler and LD₂

有 $|r|^2 > 1$, 而且在同一 ϕ 值下, 对于不同的 δ 值, $|r|^2$ 有十分明显的变化。图 6 为 $\delta = 0$, 当 k 取不同的值时, $|r|^2$ 随 ϕ 变化的曲线。由图 6 可看出对于不同的 k 值, 功率反馈系数 $|r|^2$ 都是在 ϕ 值等于 π 时达到最大值。综合以上分析可知, 有必要通过调节相移 ϕ 来获得最大的反馈。由文献[4]可知, 当半导体激光器泵浦在阈值以下时, 通过调节泵浦注入电流的大小, 改变半导体激光器的注入载流子浓度, 可引起激光器有源区的折射率变化大约在 $-0.03 \sim -0.10$ 范围, 折射率的变化使得激光场在激光器的往返相移发生变化。因此, 将 LD₂ 芯片泵浦在阈值以下, 改变注入电流的大小, 可以调节往返相移 ϕ , 使其满足周期相位条件 $\phi = (2m + 1)\pi$ (m 为整数), 保证反馈光场获得最大的增强。由 $\phi = 4\pi nd/\lambda$, 可得 $m = \text{Int}[(4nd/\lambda - 1)/2]$, 在 n 变化范围中可以得到若干个 m 值, 亦即在不同的注入电流下, 反馈光场同样可获得最大的增强。从而改变 LD 芯片的偏置电流, 在几个不同的电流值下, 反馈光场不变, 保证激光器可获得相同的自调 Q 脉冲输出不变。这一点在实验中得到了证实。

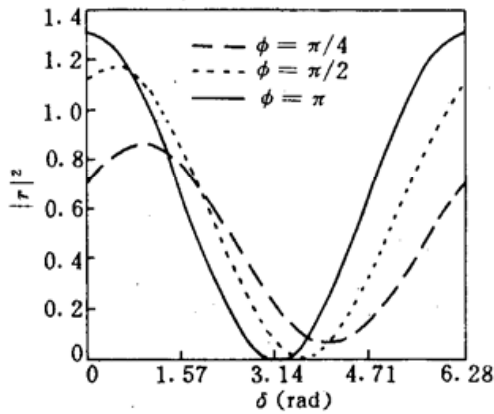


Fig. 4 Plots of $|r|^2$ as a function of δ for different ϕ , with $R = 0.31$ and $k = 0.346$

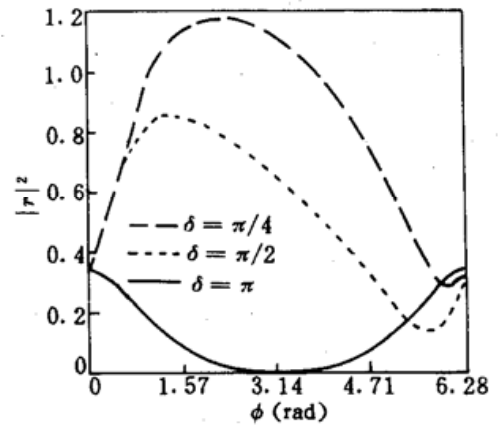


Fig. 5 Plots of $|r|^2$ as a function of ϕ for different δ , with $R = 0.31$ and $k = 0.346$

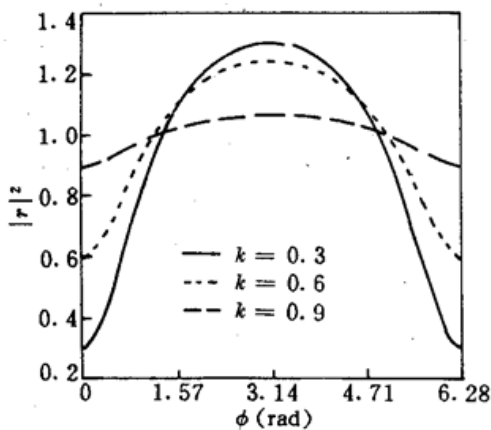


Fig. 6 Plots of $|r|^2$ as a function of ϕ for different k , with $R = 0.31$ and $\delta = 0.0$

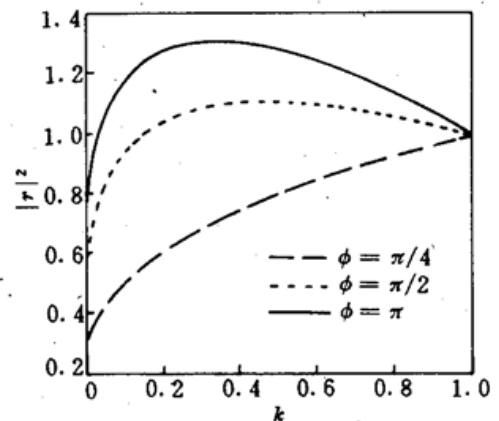


Fig. 7 Plots of $|r|^2$ as a function of k for different ϕ , with $R = 0.31$ and $\delta = 0.0$

图 7 所示为在给定 R 值, 相位延迟 δ 为零时, 在不同的 ϕ 相移条件下, 功率反馈系数 $|r|^2$ 随光纤耦合器功率耦合系数 k 变化的曲线。由图 7 可以看出, 在给定 ϕ 值下, 随着 k 值的增大, 功率反馈系数 $|r|^2$ 对应于某一 k 值存在有一个最大值, 在此最大值两边功率反馈系数 $|r|^2$ 逐渐下降。 $\phi = \pi$ 时, k 在 0.346 附近 $|r|^2$ 达到最大值, 约为 1.35。因此, 有必要通过适当地选择光纤耦

合器参数, 以使反馈回掺铒光纤的激光场获得最大的增强。

由于激光器在工作过程中不可避免地存在着拍模而产生具有随机相位的噪声脉冲。若在光纤环中相向传输的噪声光脉冲的相位恰好能满足正反馈条件, 则在连续的激光场背景上将逐渐迭加振幅不断增大的光脉冲, 而这光脉冲增大到一定程度, 必将引起掺铒光纤的增益饱和。

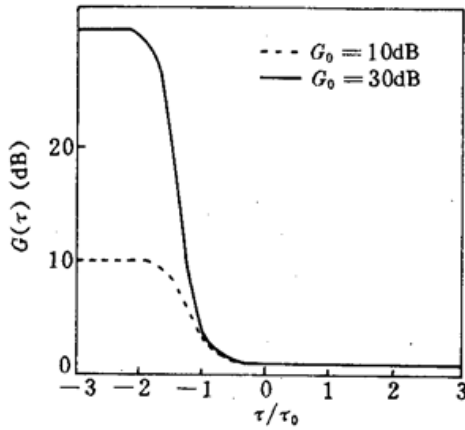


Fig. 8 The transient gain saturation of an erbium-doped fiber for different small-signal gain G_0 with a given pulse width $\tau, \tau = \tau_0$

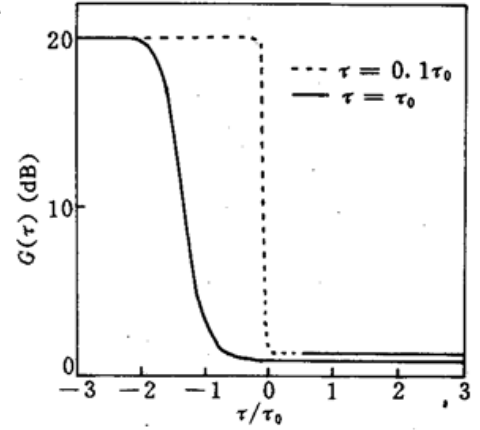


Fig. 9 The transient gain saturation for different pulse widths with a given small-signal gain $G_0 = 20$ dB

由于掺铒光纤激光亚稳态的反转粒子数寿命 τ_c 约为 $1 \sim 10$ ms, 只要在光纤环中传输的光脉冲 τ , 满足 $\tau \ll \tau_c$, 则掺铒光纤的瞬态增益可用下式表示

$$G(\tau) = \left\{ 1 - \left(1 - \frac{1}{G_0} \right) \exp \left[- \frac{1}{|E_s|^2} \int_{-\infty}^{\tau} |E_{in}(\tau')|^2 d\tau' \right] \right\}^{-1} \quad (11)$$

式中, G_0 为掺铒光纤的小信号增益, $|E_s|^2$ 是掺铒光纤的饱和能量, $|E_{in}(\tau)|^2$ 为注入掺铒光纤中光脉冲的强度, 假设在掺铒光纤中传输的脉冲具有高斯型:

$$|E_{in}(\tau)|^2 = |E_0|^2 \exp(-\tau^2/\tau_0^2) \quad (12)$$

$|E_0|^2$ 表示注入光脉冲的能量。取 $|E_0|^2/|E_s|^2 = 0.1$, 在不同的小信号增益 G_0 下, 掺铒光纤的瞬态增益变化如图 8 所示, 当强光脉冲经掺铒光纤时, 掺铒光纤的增益将出现饱和。因此, 当周期光脉冲经过掺铒光纤时, 掺铒光纤的瞬态增益也将产生周期性的变化, 形成激光器的自调 Q。至于饱和增益何时恢复, 取决于掺铒光纤的增益恢复时间。在很大程度上, 掺铒光纤瞬态增益恢复的快慢将决定光脉冲序列的重复周期。在室温下, 掺铒光纤的增益恢复时间约为 $10 \sim 200 \mu\text{s}$ ^[5]。实验中, 获得的光脉冲序列的周期分别为 20, 17.8 和 15 μs , 在一定程度上表明了是掺铒光纤的增益饱和导致了激光器的自调 Q 工作。由图 8 还可看出, 掺铒光纤的小信号增益越大, 即泵浦功率越高, 增益饱和的速度越快, 光脉冲序列的重复率也越高, 与实验中观察到的现象相一致。图 9 为当掺铒光纤的小信号增益为 20 dB 时, 对于不同脉宽的光脉冲, 掺铒光纤的瞬态增益变化。由图可以看出, 光脉冲越窄, 掺铒光纤增益饱和越快, 这也就意味着光脉冲序列的周期将变小, 重复率提高, 和实验现象相吻合。光脉冲的脉宽为 μs 量级, 大于铒离子的横向弛豫时间(ns 量级), 这进一步表明是掺铒光纤的增益饱和导致了激光器的自调 Q。

参 考 文 献

- 1 R. J. Mears, L. Reekie, I. M. Jauncey. High-power tunable erbium-doped fiber laser operating at 1.55 μm . in *Proc. Conf. on Laser and Electro-Optics (CLEO)*, Optical Society of America and IEEE/ Laser and Electro-Optics Society, 1987, 14(1) : 122~123
- 2 M. Nakazawa, K. Suzuki, H. Kubato *et al.*. Self-*Q*-switching and mode locking in a 1.53 μm fiber ring laser with saturable absorption in erbium-doped fiber at 4.2 k. *Opt. Lett.*, 1993, 18(8) : 613~615
- 3 Zhuzhong Zhang, Liejia Qian, Dianyuan Fan *et al.*. Gallium arsenide: A new material to accomplish passively mode-locked Nd : YAG laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, 60(4) : 419~421
- 4 黄德修. 半导体光电子学. 成都: 电子科技大学出版社, 1994. 56
- 5 C. R. Giles, E. Desurvire, J. R. Simpson. Transient gain and crosstalk in erbium-doped fiber amplifiers. *Opt. Lett.*, 1989, 14(16) : 880~882

Study on Self-*Q*-switched Erbium-doped Fiber Ring Laser

Huang Zhijian Sun Junqiang Huang Dexiu

(Department of Opto-electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract The mechanism of a novel structure self-*Q*-switched erbium-doped fiber ring laser has been investigated. The results show, according to phase difference of counterpropagating light fields in a fiber loop, the optical feedback which is consisted of a fiber coupler and LD chip can feedback light fields into the erbium-doped fiber selectively, and the laser can generate optical pulses with increasing amplitude. Optical pulses lead to transient gain saturation of the erbium-doped fiber, which will result in self-*Q*-switching in the laser. The theoretical analysis is in good agreement with the experiments.

Key words self-*Q*-switching, feedback selectively, transient gain saturation