

# 环形光纤激光器中的半导体光波导调制器\*

孙军强 黄志坚 黄德修

(华中理工大学光电子工程系, 武汉 430074)

**摘 要** 对环形光纤激光器中的半导体光波导调制器进行了理论研究, 结果表明, 光纤环中的偏振控制器对光的偏振态的控制以及半导体光波导对光的偏振态的调节构成了激光器的主要调制机理, 为环形光纤激光器的自调  $Q$  及锁模的新机制提供了理论依据。

**关键词** 半导体光波导, 偏振态的控制与调节, 光调制。

## 1 引 言

单模光纤由于其波导结构的特点, 采用简单的方法, 如通过对单模光纤的挤压、弯曲和扭曲, 可较容易地实现对单模光纤中传输的激光场偏振态的控制<sup>[1]</sup>。近几年来, 利用光纤中偏振态的非线性旋转, 实现了掺铒光纤激光器的被动锁模, 并获得亚皮秒的光脉冲<sup>[2]</sup>。然而, 应用这种技术, 获得激光器被动锁模的自启动, 有一定的难度, 主要是由于需要较高的光功率来激励光纤中非线性以及要足够长的光纤来实现偏振态的演变。应用多量子阱材料对入射光反射而充当饱和吸收体, 已实现掺铒光纤激光器的被动锁模<sup>[3]</sup>。Okhotnikov 等人<sup>[4]</sup>应用多量子阱波导充当波片, 形成光的两正交偏振态的线性旋转, 实现了光纤激光器的被动锁模。作者利用特殊的半导体波导微调激光谐振腔中传输激光场的两正交偏振态之间的相位延迟量, 在现有的条件下, 观察到了掺铒光纤激光器中的自调  $Q$ <sup>[5]</sup>。无论多量子阱还是半导体光波导在锁模或自调  $Q$  激光器中都充当调制器作用。但对这类调制器的调制机理的理论研究未曾见有过报道。本文正是基于自调  $Q$  的环形掺铒光纤激光器实验的基础上分析了这种激光器形成自调  $Q$  的调制机理。

## 2 实 验

实验采用如图1所示的环形掺铒光纤激光器来实现自调  $Q$  工作<sup>[5]</sup>。当注入掺铒光纤的泵浦功率为20 mW, 光纤环中的标准单模光纤的长度为1.133 km, 在仔细微调光纤环中的偏振控制器以及半导体光波导的偏置电流的过程中, 并微调泵浦激光器的注入功率, 实验获得了如图2所示的典型的调  $Q$  光脉冲序列, 脉宽为3  $\mu$ s, 重复率为67 kHz。如图3所示是激光器实现自调  $Q$  工作时, 观察到泵浦波长以及激射波长的强度变化, 对应于激光脉冲产生的位置,

\* 本项目得到国家自然科学基金、国家教委博士点基金资助。

收稿日期: 1996-5-12; 收到修改稿日期: 1997-3-10

泵浦波长存在着强烈的吸收, 因此, 在激光谐振腔内, 确实存在着  $Q$  开关机制。实验中发现自调  $Q$  光脉冲的产生不仅与(作为反射镜的)半导体光波导(LD<sub>2</sub>) 阈值以下的偏置电流大小有关, 且与(作为主腔的) 光纤环中的偏振控制器的状态有关。而且, 只在 LD<sub>2</sub> 特定的偏置电流和偏振控制器特定的状态下, 才能观察到自调  $Q$  脉冲。

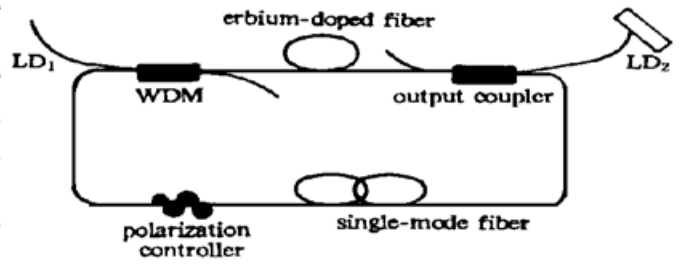


Fig. 1 Configuration of the Er<sup>3+</sup>-doped fiber ring laser

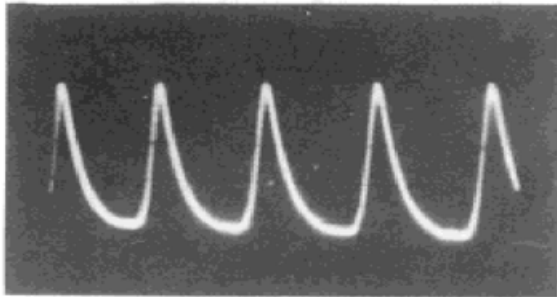


Fig. 2 Typical self-Q-switched optical pulse train (5 μs/div, 20 mv/div)

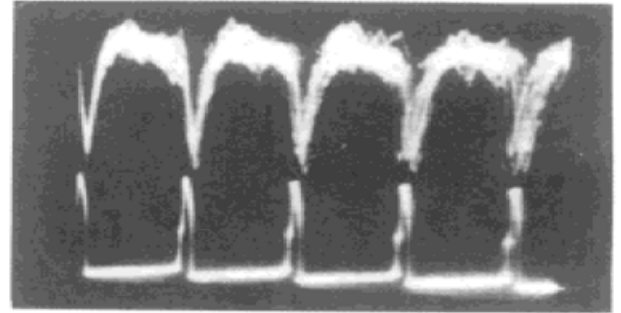


Fig. 3 The optical intensities with different wavelengths.

Upper: the optical intensity for the pump wavelength; Lower: the optical intensity for the pump wavelength and emission wavelength

### 3 理 论

在多量子阱或半导体波导中, 由于波导的线性及非线性的二向性<sup>[6]</sup>, 当一定偏振方向的光照射到半导体波导上时, 波导中激发的 TM 与 TE 模将经历不同的线性及非线性相位延迟, 导致光的偏振态椭圆率的变化。对 InGaAsP 激光器, 载流子引起的折射率的变化为  $d\bar{n}/dN = -(2.8 \pm 0.6) \times 10^{-20} \text{ cm}^3$ , 在阈值下折射率的变化范围为  $-0.04 \sim -0.10$ <sup>[7]</sup>。在较低的注入偏置电流下, 调节偏置电流, 可使 TM 模 TE 模的折射率改变为  $\Delta n_{TM}, \Delta n_{TE}$ <sup>[8]</sup>, 由此将导致相位延迟的改变:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} L (|\Delta n_{TM} - \Delta n_{TE}|) \tag{1}$$

式中  $L$  为半导体光波导的长度;  $\lambda$  为入射光的波长。所以, 半导体波导不仅提供光偏振态的相位延迟量, 而且通过调节其偏置电流, 可微调相位延迟  $\Delta\phi$  起到波片的作用。

综合上述分析可知, 该环形光纤激光器的自调制主要来源于半导体波导 LD<sub>2</sub> 和光纤耦合器对激光场的反馈光路(如图4所示)。激光器开始连续工作时, 光纤环中不可避免地存在着两相对传输的激光场  $E_1$  和  $E_4'$ , 并且设其幅值相等, 即  $|E_1| = |E_4'| = |E|$ , 入射至光纤耦合器时, 与所建坐标系  $x$  轴的夹角为  $\varphi$ ,  $\varphi$  是由于在光

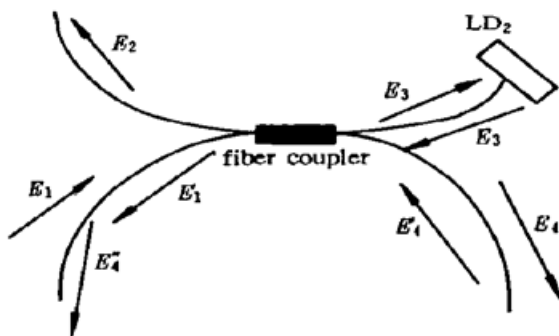


Fig. 4 Phase modulator made up of the fiber coupler and the semiconductor waveguide

纤环中放置偏振控制器而引起的光的偏振方向旋转角, 则有:

$$\begin{bmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \cos \varphi & -E \sin \varphi \\ E \sin \varphi & E \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \epsilon \\ j \sin \epsilon \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中  $\epsilon$  为偏振光的椭圆率。由  $E_1$  经光纤耦合器后, 其传输关系满足<sup>[9]</sup>:

$$\begin{bmatrix} E_{3x} \\ E_{3y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 - k_x)^{1/2} & 0 \\ 0 & (1 - k_y)^{1/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \end{bmatrix} \quad (3)$$

设激光场经过半导体波导后, 其延迟角为  $\phi$ ,  $y$  轴与 TM 模的振荡方向成  $\theta$  角, 如图5所示。对入射至 LD<sub>2</sub> 上的激光场与激发的 TM、TE 模有如下的变换关系, 在此忽略激发过程中两者的损耗。

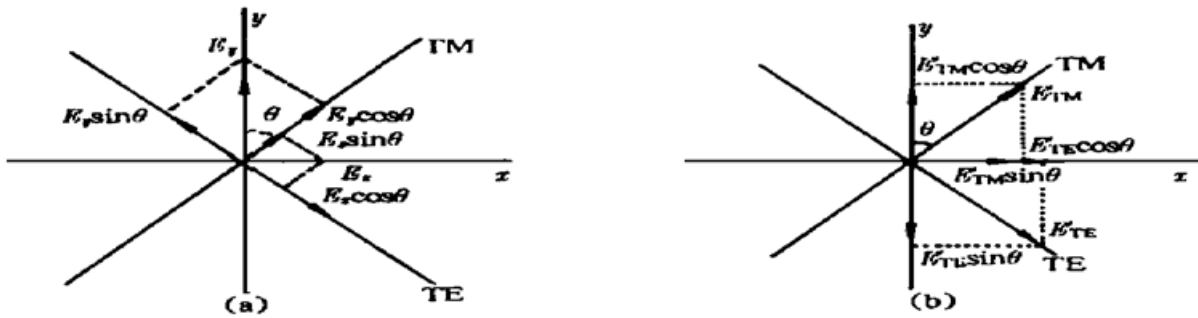


Fig. 5 Calculation of Jones matrix coefficients of the semiconductor waveguide

$$\begin{bmatrix} E_{TM} \\ E_{TE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta & \cos \theta \\ \cos \theta & -\sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

TM、TE 模在 LD<sub>2</sub> 波导中传输时, 拥有不同的传输速度及不同的损耗, 设 TM 模相对于 TE 模的相位延迟为  $\phi$ 。且对 TM 及 TE 模两者的传输系数为  $T_{TM}$ ,  $T_{TE}$ , 则有如下的变换关系:

$$\begin{bmatrix} E'_{TM} \\ E'_{TE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{TM} \exp(j\phi) & 0 \\ 0 & T_{TE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{TM} \\ E_{TE} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$E'_{TM}$ 、 $E'_{TE}$  为经 LD<sub>2</sub> 芯片后的出射的激光场。将  $E'_{TM}$ 、 $E'_{TE}$  变换为以  $x$ 、 $y$  为坐标的场, 有:

$$\begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta & \cos \theta \\ \cos \theta & -\sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_{TM} \\ E'_{TE} \end{bmatrix} \quad (6)$$

综上所述, 经 LD<sub>2</sub> 芯片变换后, 其 Jones 矩阵为:

$$\begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{yx} & J_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中的矩阵元为:

$$\begin{cases} J_{xx} = T_{TM} \exp(j\phi) \sin^2 \theta + T_{TE} \cos^2 \theta \\ J_{xy} = J_{yx} = (T_{TM} \exp(j\phi) - T_{TE}) \cos \theta \sin \theta \\ J_{yy} = T_{TM} \exp(j\phi) \cos^2 \theta + T_{TE} \sin^2 \theta \end{cases} \quad (8)$$

对  $E_1$  场, 其总的传输变换满足如下关系:

$$\begin{bmatrix} E'_{1x} \\ E'_{1y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 - k_x)^{1/2} & 0 \\ 0 & (1 - k_y)^{1/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{yx} & J_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{yx} & J_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (1 - k_x)^{1/2} & 0 \\ 0 & (1 - k_y)^{1/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \end{bmatrix} \quad (9)$$

(9) 式中矩阵  $\begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$  表示光场经 LD<sub>2</sub> 后解理面的反射, 从而反馈进入光纤激光器。在实验中采用的 LD<sub>2</sub> 实际上是一个半导体激光器芯片, LD<sub>2</sub> 的后解理面镀有增反膜。只是它工作在阈值以下, 不产生激光振荡。若 LD<sub>2</sub> 的后解理面不镀有增反膜, 则反馈的激光强度将减少, 但通过增加泵浦功率仍可以获得激光器的自调 Q 工作。

$E_4'$  经光纤耦合器变为  $E_4''$ , 并用  $E_1$  的场来描述, 有如下关系:

$$\begin{bmatrix} E_{4x}'' \\ E_{4y}'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} jk_x^{1/2} & 0 \\ 0 & jk_y^{1/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \end{bmatrix} \quad (10)$$

经 LD<sub>2</sub> 反馈与原来的场叠加后, 其总的场为:

$$\begin{bmatrix} E_x' \\ E_y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{1x}' \\ E_{1y}' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{4x}'' \\ E_{4y}'' \end{bmatrix} \quad (11)$$

可表示为:

$$\begin{bmatrix} E_x' \\ E_y' \end{bmatrix} = J_c \begin{bmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中:

$$J_c = \begin{bmatrix} (J_{xy}J_{yx} - J_{xx}^2)(1 - k_x) - jk_x^{1/2} & J_{xy}(J_{yy} - J_{xx})(1 - k_x)^{1/2}(1 - k_y)^{1/2} \\ J_{yx}(J_{yy} - J_{xx})(1 - k_x)^{1/2}(1 - k_y)^{1/2} & (J_{yy}^2 - J_{xy}J_{yx})(1 - k_y) - jk_y^{1/2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

由上式可知经 LD<sub>2</sub> 及光纤耦合器后的传输系数为:

$$T = |E'|^2 / |E_1|^2 = E_1^\dagger [J_c^\dagger J_c] E_1 / |E_1|^2 \quad (14)$$

" $\dagger$ " 表示矩阵的共轭转置。因此, 经过 LD<sub>2</sub> 及光纤耦合器后, 传输系数与许多参数密度相关。为了说明问题简单起见, 假设坐标 Y 轴与 TM 模的振荡方向成 45° 角, 即  $\theta = 45^\circ$ , 相当于半导体波导充当  $\lambda/4$  的波片, 假设光纤耦合器的耦合系数与偏振无关。通过合理地设计偏振控制器结构<sup>[11]</sup>, 认为入射至半导体光波导的光的瞬时偏振态为线偏振光, 则传输系数可简化为:

$$T = 2T_{TM}T_{TE}(1 - k)k^{1/2} \sin \phi \cos 2\varphi + T_{TM}^2T_{TE}^2(1 - k)^2 + k \quad (15)$$

很显然, 传输系统随  $T_{TM}$ ,  $T_{TE}$  及光纤耦合器的耦合系数  $k$  呈单调变化, 但随  $\varphi$  及  $\phi$  的变化较复杂,  $\phi$  的变化主要由半导体波导的对 TM、TE 模的折射率差异所致, 它包括两部分, 即线性  $\phi_L$  与非线性  $\phi_{NL}$  部分:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} L (|n_{TM} - n_{TE}|) \quad (16)$$

$$\phi_{NL} = \frac{2\pi}{\lambda} L n_2 |E|^2 \quad (17)$$

$\phi$  给调制器提供直流偏置, 而激光器能否由连续工作状态演变为脉冲工作状态由  $\phi_{NL}$  决定, 这是由于  $\phi_{NL}$  与激光场的强度  $|E|^2$  有关。通过调节 LD<sub>2</sub> 的注入偏置电流, 即微调线性延迟  $\phi$  以补偿非线性调制量。 $\varphi$  的变化主要由光纤环中的偏振控制器的调节来实现, 当  $2\varphi = 2k\pi + \pi/2$  ( $k$  为整数), 不论  $\phi$  如何选择, 都不能实现调制, 当  $2\varphi = 2k\pi$  ( $k$  为整数), 且  $k^{1/2}/(1 - k) \neq T_{TM}T_{TE}$ , 偏振控制器的调制才能达到最佳, 此时经 LD<sub>2</sub> 反馈的激光场与环形腔内的激光场发生相干加强, 因此, 此时适当地微调 LD<sub>2</sub> 上的偏置电流便可对传输的激光场进行调制, 有可能获得调 Q 光脉冲。

如图6所示, 选取光纤耦合器的耦合系数为 3 dB, 且  $\cos 2\varphi = 1$ , 应用式(15) 式计算传输

系数  $T$  与  $T_{TM} T_{TE}$  的关系。结果表明, 当  $\phi = \pi/2$  和  $\phi = \pi/4$  时且  $T_{TM} T_{TE} > 0.7$  时, 传输系数  $T > 1$ , 因此半导体光波导提供正反馈, 经反馈进入掺铒光纤的激光场获得相干加强, 为激光器实现调  $Q$  工作提供了必要条件。如图 7 所示是选取  $T_{TM} T_{TE} = 0.8$ , 在不同的光纤耦合器的耦合系数下, 传输系数与  $\phi$  的关系。结果表明,  $\phi$  在一定的范围内,  $T > 1$ , 且耦合系数在一定的区域内, 经半导体光波导反馈进入掺铒光纤的激光场才能获得相干加强。环形掺铒光纤激光器在开始振荡以及在振荡过程中由于噪声会产生微弱的光脉冲, 而这微弱的光脉冲在激光

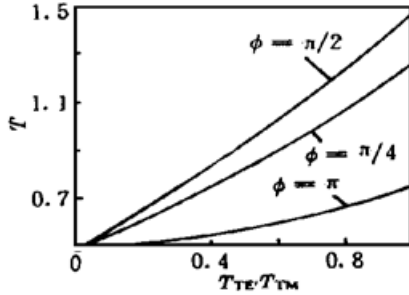


Fig. 6 Transmissivity  $T$  as a function of  $T_{TE} T_{TM}$

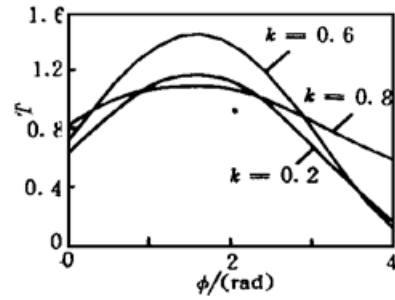


Fig. 7 Transmissivity  $T$  as a function of  $\phi$

器条件合适的状部分下演变为自脉冲, 为了计算的简便, 假设该光脉冲是高斯型, 即:

$$|E|^2 = \frac{\lambda}{2n_2L} \exp(-\tau^2/\tau_p^2) \tag{18}$$

其中,  $\tau_p$  是与注入脉冲的脉宽有关的常数, 如图 8(a) 所示, 当线性相位延迟角  $\phi_L = 5\pi/4$  时, 对应于光脉冲峰值功率处, 其传输系数为最大值, 因此, 光脉冲经半导体光波导及光纤耦合器后, 光脉冲在被压缩的同时, 其峰值功率获得增长。光脉冲再经包括掺铒光纤增益介质的多次往返后不断地增长而形成自调  $Q$  或自锁模脉冲。当线性相位延迟角  $\phi_L = \pi/4$  时, 对应于光脉冲峰值功率处, 其传输系数为最小值, 此时, 光脉冲经半导体光波导及光纤耦合器后, 被吸收而有可能演变为连续工作。如图 8(b) 所示,  $\phi_L = 7\pi/4$  时, 传输系数有两个极大值, 并且当  $\phi_L = 0$  时, 传输系数曲线中两峰值完全分裂, 此时, 光脉冲半导体光波导及光纤耦合器后, 单个光脉冲演变为两个光脉冲, 调制器调制在这个线性相位延迟时, 有助于光纤环形激光器输出脉冲的重复率增加。

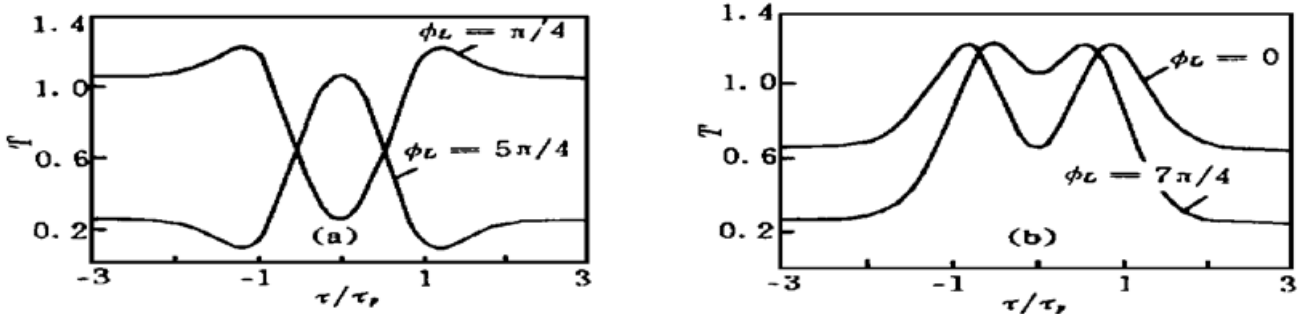


Fig. 8 The curves of temporal transmissivity under different linear phase bias

综合以上分析可知, 在特定的参数下, 调节半导体光波导 LD<sub>2</sub> 的偏置电流, 由光纤耦合器和 LD<sub>2</sub> 组成的反馈光路, 将根据激光腔内两正交偏振场的相对的线性与非线性偏振, 对入射到半导体光波导 LD<sub>2</sub> 的激光场进行选择反馈。由于激光器在工作过程中不可避免在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, 从而实现激光器的自调  $Q$  工作。

**结 论** 本文在理论上研究了用半导体波导作为调制器的调制特性, 导出了反映调制器特性的传输系数的表达式。光纤环中的偏振控制器对偏振态旋转角  $\varphi$  的控制以及半导体波导对在环中传输激光场的偏振态的延迟调节构成了主要的调制特性。通过微调半导体波导的偏置电流, 半导体波导对偏振态的线性相位延迟可补偿由于非线性折射率系数引起的偏振态的非线性相位延迟, 以实现调  $Q$  及锁模的自启动, 为自调  $Q$  及自启动锁模的新机理提供理论依据。

### 参 考 文 献

- [1] H. C. Lefevre, Single-mode fiber fractional wave devices and polarisation controllers. *Electron. Lett.*, 1980, **16**(20) ·778~ 780
- [2] V. J. Matsas, T. P. Newson, D. J. Richardson *et al.*, Selfstarting passively mode-locked fiber ring soliton laser exploiting nonlinear polarisation rotation. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(15) ·1391~ 1393
- [3] W. H. Loh, D. Wkinson, P. R. Morkel *et al.*, All-solid-state subpicosecond passively mode locked erbium-doped fiber laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(1) ·4~ 6
- [4] O. G. Okhotnikov, J. R. Salcedo, Passively mode-locked fiber laser based on polarization rotation in a multiple-quantum-well waveguide. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(1) ·67~ 69
- [5] Sun Junqiang, Huang Dexiu, Li Zaiguang, Investigation on self- $Q$ -switched  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber lasers. *Chinese J. Lasers B*, 1995, **B4**(3) ·211~ 216
- [6] I. F. Day, P. A. Snow, Z. Jiang *et al.*, Low power all-optical polarisation gate switch in a passive In-GaAsP MQW waveguide at 1.53  $\mu\text{m}$ . *Electron. Lett.*, 1994, **30**(13) ·1050~ 1052
- [7] Jaunne Manning, Robert Olshansky, Chin Bing su, The carrier-induced index change in AlGaAs and 1.3  $\mu\text{m}$  InGaAsP diode lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1983, **QE-19**(10) ·1525~ 1530
- [8] K. S. Jepsen, N. Storkfelt, M. Vaa, *et al.*, Polarization dependence of linewidth enhancement factor in InGaAs/InGaAsP MQW material. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **QE-30**(3) ·635~ 639
- [9] D. B. Mortimore, Fiber loop reflectors. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(7) ·1217~ 1224

## Optical Modulators Using Semiconductor Waveguide in Fiber Ring Lasers

Sun Junqiang      Huang Zhijian      Huang Dexiu

(Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

(Received 12 May 1996; revised 10 March 1997)

**Abstract** Optical modulators using semiconductor waveguide in fiber ring lasers are investigated theoretically. The analysis shows that the modulation mechanism resulted from the polarization control in the fiber loop and polarization adjustment of semiconductor waveguide. This provides a theoretical evidence for a new type of self-starting mode-locked and self- $Q$ -switched mechanism in fiber lasers.

**Key words** semiconductor waveguide, control and adjustment of polarization, optical modulation.