

# 腔内泵浦的自持脉冲掺铒光纤激光器\*

孙军强 黄志坚 黄德修

(华中理工大学光电子工程系 武汉 430074)

**提要** 提出了一种结构新颖的腔内泵浦的自持脉冲掺铒光纤激光器。在连续的较低的功率泵浦下,实现了激光器的单倍和双倍周期的自持脉冲输出。实验结果表明,腔内两正交偏振激光场瞬态损耗的差异是导致这种非线性动力学现象的主要机制。

**关键词** 自持脉冲, 偏振态, 瞬态损耗

## 1 引 言

激光器中的自持脉冲一直受到众多学者极大的关注<sup>[1]</sup>。在掺铒光纤作为增益介质的激光器中,由于在掺铒光纤的较小的增益区域内可获得较大的泵浦光功率密度,可使产生自脉冲的泵浦阈值大幅度降低;由于铒离子的径向掺杂的非均匀性,且光纤在拉制过程中的非严格圆柱形,事实上掺铒光纤作为高功率密度激光场传输的光波导,体现为各向异性,因此,激光场的两正交偏振态在传输过程中将产生强烈的耦合与转化<sup>[2]</sup>,这为观察激光器中的动力学现象开辟了新领域。Puccionni 等人的研究表明<sup>[3]</sup>,当激光器中两偏振态共同作用时,激光器由连续工作过渡到自持脉冲工作的泵浦阈值要远小于 Haken 的第二阈值。Lacot 等人<sup>[4]</sup>观察到了在连续光泵浦下掺铒光纤激光器中两偏振态呈反相位脉动的动力学现象,并且在正弦调制光泵浦下,观察到了掺铒光纤激光器的双倍周期的自持脉冲输出。我们在环形腔掺铒光纤激光器中,依靠非线性半导体光波导的反馈,观察到了自脉冲现象<sup>[5]</sup>。

本文提出一种结构新颖的腔内泵浦的线型腔掺铒光纤激光器,利用半导体光波导对腔内两正交偏振激光场的不同的反射,观察到单倍及双倍周期的自持脉冲。

## 2 掺铒光纤激光器的结构描述

掺铒光纤激光器的结构如图 1 所示。掺铒光纤用 1480 nm 的半导体激光器泵浦,掺铒光纤直接与泵浦激光器的输出尾纤相接续,掺铒光纤受激辐射产生的 1.53  $\mu\text{m}$  的激光场通过 1.53/1.48  $\mu\text{m}$  波分复用器与 InGaAsP/InP 半导体光波导相耦合,监测端的测量表明,两者之间的耦合效率可达 60%;波分复用器对 1.53  $\mu\text{m}$  的光场从 1 到 4 的耦合效率大于 85%,对 1.48  $\mu\text{m}$  的激光场从 1 到 3 的耦合效率大于 90%。实验所用的 InGaAsP/InP 波导为一个中心

\* 国家自然科学基金、国家教委博士点基金资助项目。

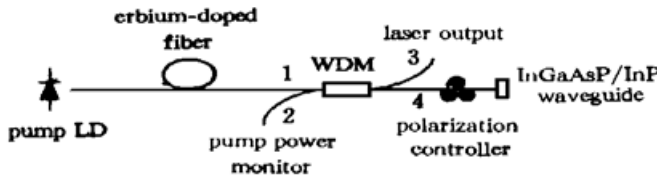


图 1 腔内泵浦的掺铒光纤激光器实验装置

Fig. 1 Experimental setup of the intercavity pumped  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber laser

和波分复用器组成激光器的谐振腔。在波分复用器和 InGaAsP/InP 波导之间设置有一个在线光纤偏振控制器,目的是通过张应力来增强光纤的双折射效应,改变激光腔内激光场的偏振态,也达到了调节入射到 InGaAsP/InP 波导上激光场的偏振态的目的。实验所用掺铒光纤长度为 13 m,连同波分复用器和激光器输出尾纤,激光器的总腔长约为 18 m。输出激光场经单色仪滤波后,用示波器观察其波形。这种线型腔激光器同环形腔结构相比,其性能和优点主要体现在:(1) 利用半导体光波导对腔内场的直接反射,替代了环形腔结构中辅助腔对激光场的反馈;(2) 线型腔结构是对腔内整个激射场的作用,而且对两偏振激光场的作用更加充分,但环形腔仅对由耦合器透射的场的反馈;(3) 在线型腔结构中,由泵浦激光器和 InGaAsP/InP 波导两解理面构成了谐振腔的两腔镜。同环形腔相比,减少了一个光纤耦合器,因而,可使插入损耗进一步降低;(4) 在环形腔结构的实验中,因采用泵浦激光器属多纵模结构,而波分复用耦合器却有一定的带宽,这样势必导致不能充分地利用泵浦功率。综上所述,线型腔结构一般较环形腔相比,更易观察到激光器的非线性自脉冲振荡。

### 3 掺铒光纤激光器的实验研究

实验测得掺铒光纤激光器的阈值泵浦功率为 10 mW。当泵浦功率处于 10~13 mW 之间时,激光器处于连续工作状态,激光器辐射的中心波长为 1.53  $\mu\text{m}$ ,属多纵模结构。增大泵浦功率至 13 mW,将 InGaAsP/InP 波导偏置在阈值电流以下,调节偏振控制器,开始在输出端观测到自脉冲输出。继续增大泵浦功率至 16 mW,输出脉冲消失,通过重新调节 InGaAsP/InP 波导的偏置电流,并且改变偏振控制器的状态,获得稳定的单倍周期脉冲输出如图 2 (a) 所

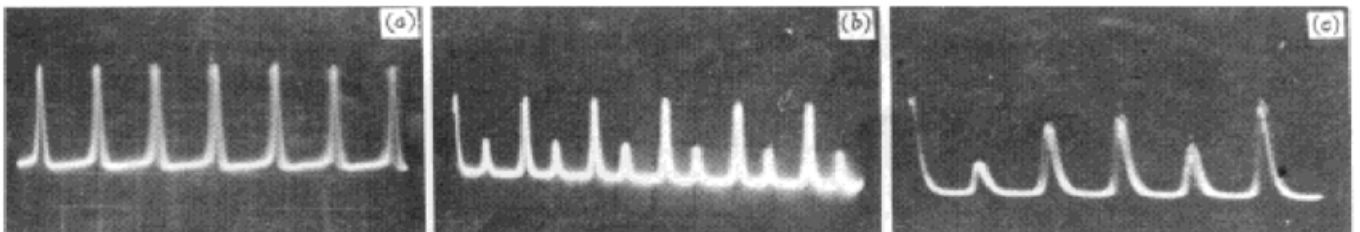


图 2 泵浦功率为 16 mW 时,掺铒光纤激光器输出的光脉冲序列

(a) 单倍周期光脉冲 (20  $\mu\text{s}/\text{div}$ , 20 mV/div); (b) 双倍周期光脉冲 (20  $\mu\text{s}/\text{div}$ , 20 mV/div);  
(c) 任意幅度光脉冲 (10  $\mu\text{s}/\text{div}$ , 20 mV/div)

Fig. 2 Pulse trains extracted from the  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber laser with the pump power of 16 mW being used

(a) T-periodic pulses (20  $\mu\text{s}/\text{div}$ , 20 mV/div); (b) 2T-periodic pulses (20  $\mu\text{s}/\text{div}$ , 20 mV/div);  
(c) Pulses with random amplitudes (10  $\mu\text{s}/\text{div}$ , 20 mV/div)

激射波长为 1.46  $\mu\text{m}$  的半导体激光器,它的阈值泵浦电流为 30 mA,对 1.53  $\mu\text{m}$  激光场没有明显的吸收,只存在弱的残余带尾态吸收。实验过程中 InGaAsP/InP 波导偏置在阈值电流以下,不产生受激辐射,其偏置电流在 0~30 mA 的范围内可调。泵浦激光器和 InGaAsP/InP 波导的前端面均镀有部分增透膜,后端面均镀有高反膜,反射率大于 90%,利用这两个高反射端面,结合掺铒光纤

示;保持泵浦功率和 InGaAsP/InP 波导的偏置电流不变,仔细地调整偏振控制器的状态,激光器输出稳定的双倍周期脉冲序列如图 2(b) 所示;在此偏振控制器状态附近,微调偏振控制器,激光器输出周期性的不等幅脉冲序列如图 2(c) 所示。随着泵浦功率的逐渐提高,激光器输出的脉冲更为稳定,而且较之低泵浦更容易获得稳定的脉冲输出,但获得周期性的不等幅脉冲序列的可能性降低,这一点与 F. Sanchez 等<sup>[6]</sup>在掺铒光纤激光器中通过降低泵浦功率经由周期倍增过程导致混沌不稳定态的实验结果有相似之处。图 3(a) 和(b) 分别表示在 21 mW 泵浦下,重新调节偏振控制器和改变 InGaAsP/InP 波导偏置电流的大小,激光器输出的单倍周期和双倍周期脉冲序列。与图 2(b) 相比,可以发现图 3(b) 中脉冲序列的振幅和重复率都有所提高。

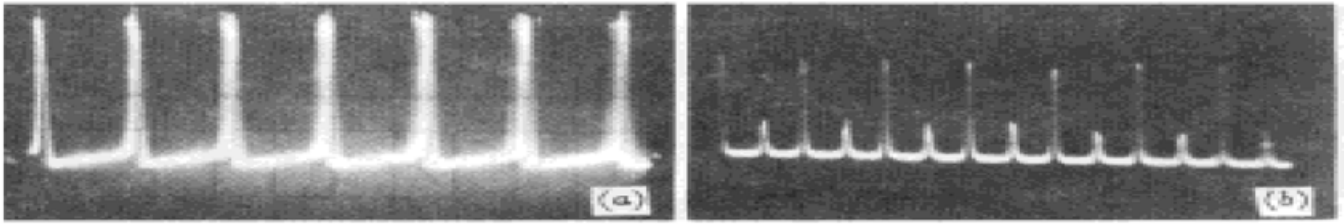


图 3 泵浦功率为 21 mW 时,掺铒光纤激光器输出的光脉冲序列

(a) 单倍周期光脉冲(20  $\mu\text{s}/\text{div}$ , 20 mV/div); (b) 双倍周期光脉冲(20  $\mu\text{s}/\text{div}$ , 20 mV/div)

Fig. 3 Pulse trains extracted from the Er<sup>3+</sup>-doped fiber laser with the pump power of 21 mW being used

(a) T-periodic pulses (20  $\mu\text{s}/\text{div}$ , 20 mV/div); (b) 2T-periodic pulses (20  $\mu\text{s}/\text{div}$ , 20 mV/div)

## 4 结果分析与讨论

从上述实验中发现,光纤中偏振控制器的状态和偏置在阈值以下的 InGaAsP/InP 光波导在掺铒光纤激光器中实现自脉冲的输出起着十分关键的作用。在上述的光纤激光器的结构中,可将 InGaAsP/InP 光波导等效为一个 F-P 标准具的反射镜。调节偏振控制器,使得照射到 InGaAsP/InP 光波导上的光具有确定的偏振态。当具有一定偏振态的激光场照射至 InGaAsP/InP 光波导后,激光场将在 InGaAsP/InP 光波导中激励 TE 和 TM 模传输。由于波导的特殊性,TE 和 TM 模在传输时存在着光程差,即

$$\Delta\delta = |n_{\text{TE}} - n_{\text{TM}}| \cdot d$$

式中, $d$  为波导增益区的长度; $n_{\text{TE}}$ ,  $n_{\text{TM}}$  分别为被激发的 TE 和 TM 模的有效折射率。在阈值电流以下调节 InGaAsP/InP 光波导的偏置电流,可改变光波导有源区的材料折射率<sup>[7]</sup>,这导致对  $n_{\text{TE}}$ ,  $n_{\text{TM}}$  的附加调节。由于 TE 和 TM 模的光程差的存在,使得在同一时刻从 InGaAsP/InP 光波导的前端面出射的两正交偏振激光场的强度形成差异。这相当于在腔内引入了一可调的时域反射率,也就是可调的时域损耗。而 InGaAsP/InP 光波导在 1.53  $\mu\text{m}$  的激光场存在着弱的残余带的吸收<sup>[8]</sup>,这也产生对时域损耗的附加调节。两正交偏振态时域反射率的差异和腔内偏振控制器的共同作用,可改变腔内两正交偏振激光场的耦合强弱。由两偏振模耦合的掺铒光纤激光器的半经典理论模型<sup>[4]</sup>可知,激光器中两正交偏振模损耗的差异可调,造成描述激光器动力学方程的自由度数目的在原来的基础上获得增加,从而更加容易地产生非线性动力学现象。

在实验中还发现,通过仔细地微调偏振控制器的状态,可产生双倍周期的自持脉冲。因用示波器观察到的光脉冲是激光器中两正交偏振态相互叠加的结构。由 Lacot 的理论模型<sup>[4]</sup>可

知, 对应于各个偏振态的光脉冲可能是双倍周期或四倍周期的, 且在条件合适时, 输出的激光场呈反相位脉动, 因此, 两者叠加可导致双倍周期的光脉冲产生。

泵浦功率的增加, 使得激光振荡的纵模更加丰富, 并且两正交偏振态的各个激光场的瞬态行为更加复杂多样, 不仅更容易获得自脉冲输出, 而且其重复率也会提高。在实验中, 正是观察到了随着泵浦功率的增加, 输出光脉冲的峰值功率和重复率获得了提高。

## 5 结 论

利用 InGaAsP/InP 光波导作为对两正交偏振激光场反射率可调的反射腔镜, 调节偏振控制器, 改变在掺铒光纤激光器中传输的两个正交偏振场的相对损耗, 在较低的泵浦功率下获得稳定的单倍周期和双倍周期光脉冲输出。我们认为, 激光器自由度数目的增加是导致掺铒光纤激光器非线性动力学行为的主要原因。

## 参 考 文 献

- 1 P. LeBoudec, M. LeFlohic, P. L. Francois *et al.*. Self-pulsing in Er<sup>3+</sup>-doped fiber laser. *Opt. & Quant. Electr.*, 1993, **25**: 359~ 367
- 2 A. J. Poustie. Polarization cross saturation in an Er<sup>3+</sup>-doped fiber ring laser. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(18): 1868~ 1870
- 3 G. P. Puccionni, M. V. Tratnik, J. E. Sipe. Low instability threshold in laser operating in both states of polarization. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(4): 242~ 244
- 4 E. Lacot, F. Stoeckel, M. Chenevier. Dynamics of an erbium-doped fiber laser. *Phys. Rev. A*, 1994, **49**(5): 3997~ 4008
- 5 孙军强, 黄德修, 李再光. 掺铒光纤激光器的自持脉冲. 物理学报, 1996, **45**(6): 960~ 965
- 6 F. Sanchez, M. Le Flohic, G. M. Stephan *et al.*. Quasi-periodic route to chaos in erbium-doped fiber laser. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1995, **QE-31**(3): 481~ 488
- 7 I. E. Day, P. A. Snow, R. V. Penty *et al.*. Bias dependent recovery time of all-optical resonant nonlinearity in an InGaAsP/InP multiquantum well waveguide. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **65**(21): 2657~ 2659
- 8 B. R. Bennett, R. A. Soref, J. A. D. Alamo. Carrier-induced change in refractive index of InP, GaAs, and InGaAsP. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1990, **QE-26**(1): 113~ 122

## A Self-pulsed Intercavity Pumped Er<sup>3+</sup>-doped Fiber Laser

Sun Junqiang Huang Zhijian Huang Dexiu

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

**Abstract** A novel self-pulsed Er<sup>3+</sup>-doped fiber laser pumped internally is presented in this paper. Stable T-periodic and 2T-periodic pulses have been achieved under the low pump power with the CW pumping mode. The experimental results indicate that the main mechanism of the nonlinear dynamics phenomena results from the transient loss difference between the two orthogonal states of polarization.

**Key words** self-pulsing, polarization states, transient loss