

可调谐光纤环形腔激光器输出特性的理论与实验研究

董新永^{1,2)} 赵春柳^{1,2)} 关柏鸥²⁾ 谭华耀²⁾ 袁树忠¹⁾ 开桂云¹⁾ 董孝义¹⁾

¹⁾ 南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

²⁾ 香港理工大学电机工程系, 香港 九龙)

(2001 年 12 月 3 日收到, 2002 年 3 月 18 日收到修改稿)

提出一种简单的理论模型, 并通过数值模拟详细研究了可调谐光纤环形腔激光器的输出特性随掺铒光纤长度、输出耦合比、抽运功率、腔内损耗等参量的变化关系. 理论分析得到, 通过参量优化可以实现在铒离子增益范围内超过 130nm 带宽(1500—1630nm)的激光输出. 实验获得了 100nm 带宽(1518.5—1618.5nm)的可调谐激光输出, 激光器输出功率高, 信噪比在大部分可调范围内高于 60dB, 实验结果与理论分析符合得较好.

关键词: 掺铒光纤, 光纤环形腔激光器, 可调谐, 光纤珐布里-珀罗滤波器

PACC: 4260, 4281

1. 引言

近年来, 掺铒光纤放大器(EDFA)的增益波段已经从常规的 C 波段, 即 1530—1565nm, 扩展到 C + L 波段, 即 1530—1610nm. 而增加 EDFA 增益带宽是提高光纤波分复用(WDM)通信系统容量的最有效的方法, 因此 C + L 波段的光纤 WDM 传输系统受到广泛的重视^[1-3]. 同时, C + L 波段的宽带可调谐激光器作为这种宽带 WDM 传输系统测试必需的器件, 近年来也引起了很多的研究兴趣^[4-7]. 与外腔半导体激光器相比, 光纤激光器虽然调谐范围受到增益带宽的限制, 输出功率较低, 但是具有较低的相干性和偏振特性, 因此是更为理想的测试光源^[5]. 最近的报道已经将掺铒光纤环形腔激光器的可调波长范围拓展到 C + L 波段^[6,7], 可调带宽超过了 120nm, 已经能够充分满足系统测试的带宽需求. 因此, 研究这种激光器的输出特性与其结构参量的关系, 并通过优化提高其性能就成了当务之急.

近年来, 国内对光纤环形腔激光器也有许多研究报道^[8-10], 但多集中在 C 波段的研究上, 理论分析也较少. 国外的报道如文献 [7], 虽然也在理论模拟方面做了一些工作, 但是采用的理论模型比较复杂, 没有给出光纤环形腔激光器的输出特性随掺铒光纤长度变化的模拟结果, 也没有考虑输出耦合比的变化. 本文提出一种简单的理论模拟, 可以对可调谐

光纤环形腔激光器的输出功率和波长范围与掺铒光纤长度、输出耦合比、抽运功率、腔内损耗等参量的关系进行全面分析, 并实验获得了 100nm 带宽的连续可调谐激光输出, 激光器输出功率高, 信噪比在大部分可调带宽内高于 60dB. 实验结果与理论分析符合得较好.

2. 激光器结构

图 1 所示为本实验装置的示意图. 所用器件包括 1480nm 的激光二极管(LD)泵源、1480nm/1590nm 波分复用器(WDM)、隔离器(Isolator)、偏振控制器(PC)、可调谐光纤珐布里-珀罗(FFP)滤波器和光纤输出耦合器. 由于所用光纤珐布里-珀罗滤波器的自由光谱范围(FSR)只有 28nm, 为了在更大范围内获得可调滤波, 在环形腔内另外加了一个可替换的透射带宽为 20nm 的带通滤波器, 依次换用多个波长范围连续的带通滤波器可以将环形腔内滤波范围扩展到超过 100nm. 这是一种低成本的方法, 因为自由光谱范围大的可调 FFP 滤波器成本较高且不容易得到. 带通滤波器加在两个准直透镜的中间, 切换方便, 虽然有 1dB 左右的损耗, 但是具有降低激光噪声, 提高信噪比的作用(见实验部分). 环形腔内经 FFP 滤波形成的激光经光纤输出耦合器分光, 一部分光从耦合器的输出端输出, 剩余的光被反馈回环形腔内. 由于隔离器的作用, 环形腔内只能在一个方

向产生与 FFP 透射波长相同的激光。

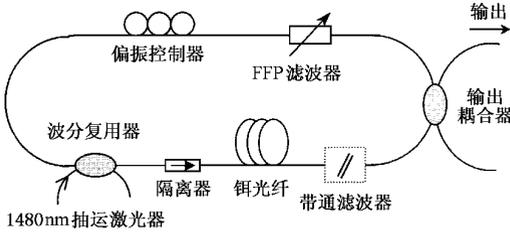


图1 可调谐光纤环形腔激光器的结构示意图

3. 理论模拟

在抽运功率高过阈值的稳定工作状态下，激光器中掺铒光纤相当于工作在饱和状态下的 EDFA，经铒光纤放大后的激光经过输出耦合器分光 and 腔内器件的滤波、衰减后作为信号再次进入铒光纤放大，只要其增益与循环一周的衰减相等，就能够共振和稳定输出。采用二能级系统的均匀展宽理论模型，抽运光和信号光在掺铒光纤内的传播方程分别为^[11]

$$\frac{dP_p}{dz} = (N_2 \sigma_p^{(e)} - N_1 \sigma_p^{(a)}) \Gamma_p P_p, \quad (1)$$

$$\frac{dP_s}{dz} = (N_2 \sigma_s^{(e)} - N_1 \sigma_s^{(a)}) \Gamma_s P_s, \quad (2)$$

式中 N_1 、 N_2 分别为基态 $^4I_{15/2}$ 和亚稳态 $^4I_{13/2}$ 的粒子数； P_p 、 $\sigma_p^{(e)}$ 、 $\sigma_p^{(a)}$ 和 Γ_p 分别抽运光和信号光在 EDF 中的功率、发射截面、吸收截面和 LP_{01} 模强度分布与铒离子分布的重叠因子； z 为沿光纤长度方向的坐标。如果 EDF 中铒离子浓度为 N_t ，则有 $N_1 + N_2 = N_t$ 。忽略放大自发辐射 (ASE) 噪声的影响，上能级粒子数 N_2 可表示为

$$N_2 = N_t \left(\frac{\tau \sigma_s^{(a)} \Gamma_s P_s + \tau \sigma_p^{(a)} \Gamma_p P_p}{Ah\nu_s} \right) / \left(\frac{\tau(\sigma_s^{(a)} + \sigma_s^{(e)})}{Ah\nu_s} \Gamma_s P_s + \frac{\tau(\sigma_p^{(a)} + \sigma_p^{(e)})}{Ah\nu_p} \Gamma_p P_p + 1 \right), \quad (3)$$

式中 τ 为上能级寿命，在硅光纤中约为 10ms； A 为光模式场面积； h 为普朗克常量， ν_p 、 ν_s 分别为信号光和抽运光频率。

考虑抽运光的分布及激光器稳定工作的共振条件，有以下边界条件成立：

$$P_p(0) = P_{p0}, \quad (4)$$

$$P_s(0) = P_s(L) V (1 - \gamma_{out}), \quad (5)$$

式中 P_{p0} 为输入铒光纤的抽运光功率； γ_{out} 为输出耦合比； V 为激光从铒光纤末端传输到前端的损耗系

数 (不包含输出耦合器分光的损耗)。考虑以上边界条件，采用四、五阶 Runge-Kutta 法可以求得方程 (1)(2) 的迭代数值解，由此得到激光器的输出功率。输出功率 P_{out} 表示为

$$P_{out} = P_s(L) V' \gamma_{out}, \quad (6)$$

式中 V' 为铒光纤末端到耦合器输出端的损耗系数 (不包含输出耦合器分光的损耗)。

在以下的理论模拟和实验中采用的器件及参量如下：掺铒光纤纤芯的铒离子掺杂浓度约为 $1.2 \times 10^{25} m^{-3}$ ，纤芯直径为 $3 \mu m$ ，数值孔径为 0.29，截止波长为 1000nm，不同波长的吸收/发射截面和重叠因子等数据由厂家提供。所用 1480nm LD 抽运源的最大输出功率可达 130mW。FFP 滤波器的 FSR 为 28nm，带通宽度为 0.2nm，插入损耗约 3dB。

3.1. EDF 长度对激光输出的影响

EDF 长度是决定光纤环形腔激光器输出波长范围的首要因素。在其他因素不变的情况下，改变 EDF 的长度可以在很大的范围内改变激光输出的波长范围。理论模拟结果如图 2 所示，EDF 长度分别为：2.5、5、8、10、20 和 30m，抽运功率设为 $P_{p0} = 120mW$ ，其他参量分别设为 $\gamma_{out} = 0.5$ ， $V = 5dB$ ， $V' = 2dB$ 。由图 2 可见，光纤环形腔激光器的工作波长范围随 EDF 长度的变化很大，从 50 到最大可以达到 130nm (1500—1530nm)。在 EDF 短时，激光输出的范围主要在 C 波段，即 1520—1570nm，输出功率也较低。随 EDF 长度增加，激光可调范围增大，输出功率也得到提高，但在达到某一最高值后不再增加，反而开始下降，而且短波侧的下降明显快于长波侧。

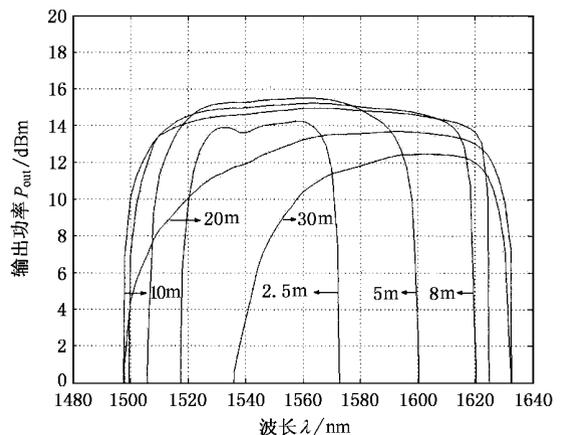


图2 光纤环形腔激光器的输出功率 P_{out} 随 EDF 长度的变化关系 $P_{p0} = 120mW$ ； $\gamma_{out} = 0.5$ ； $V = 5dB$ ； $V' = 2dB$

这种现象是由 EDF 的吸收和增益随长度变化的不同反应引起的. EDF 过短,如 $L = 2.5\text{m}$ 时,抽运光不能充分利用,激光信号得不到足够的增益,所以输出功率小,可调范围窄.随 EDF 增长,信号增益变大,激光功率升高,发射截面小的波长也得到足够的增益而产生激光,所以可调范围持续增加,如 $L = 5\text{m}$ 时即达到约 90nm ;但 EDF 的吸收同时增大,到一定的长度,吸收与增益的影响相当,激光功率达到最大,而后吸收的作用开始显现,虽然可调范围继续增大,但是平均输出功率开始下降,如 $L = 8\text{m}$ 和 $L = 10\text{m}$ 的情况.而 C 波段由于吸收截面大,所以吸收更大,激光功率下降更快,在 $L = 20\text{m}$ 时已经很明显,在 $L = 30\text{m}$ 时已经大部分不能产生激光.

3.2. 输出耦合比对激光输出的影响

输出耦合比直接决定输出激光功率占环形腔内能量的比值,为研究其对光纤环形腔激光器输出的影响,我们在固定其他参量为 $P_{p0} = 120\text{mW}$, $L = 8\text{m}$, $V = 5\text{dB}$, $V' = 2\text{dB}$ 的情况下给出了理论模拟的结果.如图 3 所示, γ_{out} 分别取为 0.2 , 0.5 和 0.8 .由图 3 可见, γ_{out} 不但影响输出功率,对波长调谐范围也有很大影响.三种情况下, $\gamma_{\text{out}} = 0.2$ 的可调范围最宽,超过 125nm ,但是输出功率最低; $\gamma_{\text{out}} = 0.5$ 时,可调范围接近 120nm ,但平均输出功率增高了 3dBm 多; $\gamma_{\text{out}} = 0.8$ 时,平均输出功率又提高了 1dBm 多,但可调范围减小到约 90nm .由于长波侧的发射截面小而且变化平缓,所以对 γ_{out} 的变化更加敏感,长波侧的可调范围减少比短波侧快得多.

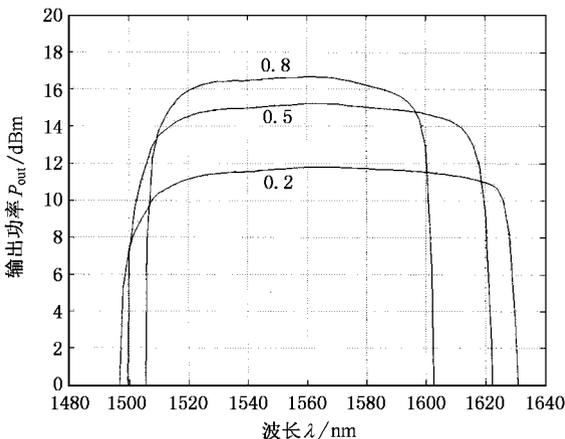


图 3 光纤环形腔激光器的输出功率 P_{out} 随输出耦合比 γ_{out} 的变化关系 $P_{p0} = 120\text{mW}$; $L = 8\text{m}$; $V = 5\text{dB}$; $V' = 2\text{dB}$

3.3. 腔内损耗对激光输出的影响

图 4 为在 $P_{p0} = 120\text{mW}$, $L = 8\text{m}$, $\gamma_{\text{out}} = 0.5$, $V' = 2\text{dB}$ 情况下得到的激光输出随腔内损耗变化的理论结果, V 分别取为 3 , 5 , 7 和 9dB .可见,随 V 的增加,激光功率变小,波长范围也变小,而且长波侧的减小明显快于短波侧.在短波侧,波长范围减小的速度约为 $1.5\text{nm}/\text{dB}$,长波侧的速度却超过 $3\text{nm}/\text{dB}$.所以实验中应该尽量采用插入损耗小的器件,减小腔内损耗,才能获得宽的波长范围和提高激光功率.

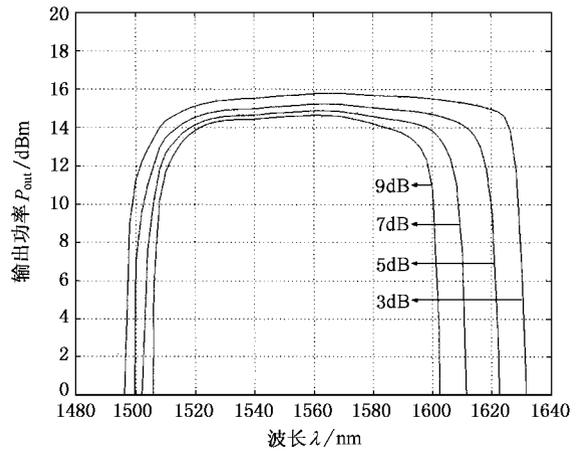


图 4 光纤环形腔激光器的输出功率 P_{out} 随腔内损耗 V 的变化关系 $P_{p0} = 120\text{mW}$; $L = 8\text{m}$; $\gamma_{\text{out}} = 0.5$; $V' = 2\text{dB}$

3.4. 抽运功率对激光输出的影响

图 5 所示为光纤环形腔激光器输出功率随抽运功率的变化情况,抽运功率依次取为 60 , 80 , 100 , 120 和 150mW ,其他参量分别设为 $L = 8\text{m}$, $\gamma_{\text{out}} = 0.5$, $V =$

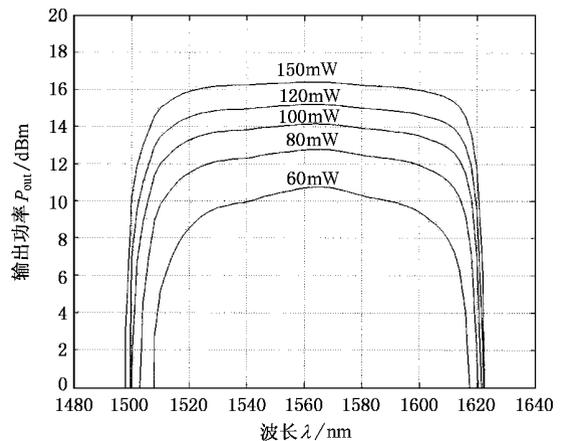


图 5 光纤环形腔激光器的输出功率 P_{out} 随抽运功率 P_p 的变化关系 $L = 8\text{m}$; $\gamma_{\text{out}} = 0.5$; $V = 5\text{dB}$; $V' = 2\text{dB}$

5dB, $V' = 2$ dB. 随着抽运功率的增大, 激光输出功率增大, 波长范围增加. 尤其是从 60 增加到 100mW 的过程中, 可调范围增加明显, 增加了约 10nm. 抽运功率大于 100mW 后, 输出功率随波长变化的平坦度明显改善, $P_{i0} = 100, 120$ 和 150mW 的 1dB 带宽分别达到 90, 95 和 105nm. 另外, 随抽运功率增大功率转换效率也得到提高. 在 $P_{i0} = 60$ mW 时的最大功率转换效率约为 20%, 而在 $P_{i0} = 150$ mW 时却可达到 28%.

4. 实验结果与讨论

实验采用图 1 所示的光纤环形腔结构, 分别将不同长度的 EDF 和不同耦合比的输出耦合器接如环形腔内, 用光谱仪和功率计测量了激光器在不同波长的输出光谱和功率. 其中光纤环形腔激光器输出随 EDF 长度变化的实验结果如图 6 所示, 输出耦合比为 0.5, 1480nm 抽运功率为 130mW, EDF 长度分别为 5, 8 和 20m. 三个 EDF 长度下得到的调谐波长

依赖性. 特别是 1480/1590nm WDM, 对 1590nm 附近的光损耗最小, 小于 0.1dB, 波长离得越远, 损耗越大, 在 1510nm 的损耗已经超过 10dB. 由前面的理论分析可见, 腔内损耗增加导致激光功率下降和波长范围减小, 所以实验中激光在波长范围两侧, 尤其是短波侧的功率下降和带宽损失是实验因素造成的, 并不影响理论模拟的准确性.

激光输出功率随输出耦合比的变化示于图 7, EDF 长度为 8m, 输出耦合比分别为 0.2, 0.5 和 0.8. 三种情况下得到的激光波长范围分别为 100 (1518.5—1618.5), 95 和 82nm (1523—1605nm). 考

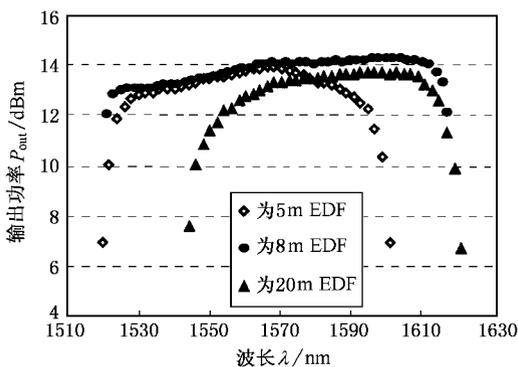


图 6 不同 EDF 长度下光纤环形腔激光器的输出功率 P_{out} 的实验值 $\gamma_{out} = 0.5$

范围分别为 80 (1520—1600), 95 (1521—1616) 和 76nm (1544—1620nm), 最大激光功率分别为 14, 14.25 和 13.7dBm. 由于抽运光在进入 EDF 前经过隔离器、WDM 等器件及接点损耗(约 0.7dB)使实际进入 EDF 的抽运光功率低于抽运源输出功率. 与理论模拟结果比较, 波长范围小了许多, 而且平坦度下降. 短波侧的输出功率明显低于理论预测值. 如 $L = 8$ m 的理论预测带宽为 1500—1620nm, 实验带宽在短波侧减小了 21nm, 在长波侧减少了 4nm; 另外, 输出功率在 1530nm 比在 1600nm 低约 1.2dBm. 这种现象是由腔内损耗随波长的变化引起的. 许多器件, 如隔离器、光纤耦合器、WDM 等的插入损耗具有波长依

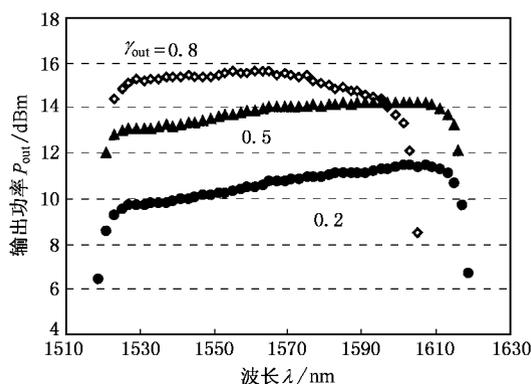


图 7 不同输出耦合比 γ_{out} 下光纤环形腔激光器的输出功率 P_{out} 的实验值 $L = 8$ m

虑腔内损耗的波长依赖性对激光输出功率和波长范围的影响后, 实验测量结果与理论模拟结果可以很好地符合, 两者具有几乎相同的变化趋势和幅度, 从而进一步证实了理论模拟的准确性. 另外, 输出耦合比的变化还影响激光工作的稳定性. 在耦合比为 0.2 和 0.5 的情况下, 激光稳定性很好, 但耦合比为 0.8 时, 稳定性变差, 越往长波侧, 激光越不稳定.

激光输出的光谱图如图 8 所示, 由于 20nm 带通滤波器的使用, 激光的 ASE 噪声只在带通范围内存在, 所以极大地压制了噪声, 提高了信噪比. 尤其是当激光器的工作波长大于 1570nm 时, 通常 C 波段的 ASE 噪声会比较高, 而且越往长波, 噪声越高. 所以这种滤波方法除成本低外, 对实验结果也有有利的一面. 在激光工作的大部分波长范围 (1530—1620nm), 激光器的信噪比可以高于 60dB. 但在短波侧当激光波长小于 1530nm 时, ASE 噪声会迅速增高, 如图 8 所示. 将 FFP 滤波器连接到输出耦合器之前可以有效地减低 ASE 噪声, 但由于 FFP 滤波器的插入损耗, 输出功率会降低.

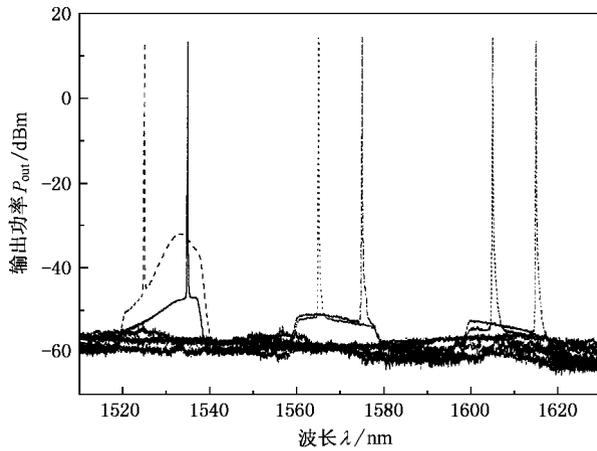


图 8 光纤环形腔激光器的激光输出的功率光谱图

5. 结 语

本文提出一种简单的理论模型,并采用数值模拟的方法全面分析了光纤环形腔激光器的输出功率和可调谐波长范围随 EDF 长度、输出耦合比、抽运功率和腔内损耗等因素的变化关系,并通过实验进行了验证.理论分析得到,通过参量优化可以实现在钕离子增益范围内超过 130nm 带宽(1500—1530nm)的激光输出.实验获得了 100nm 带宽(1518.5—1618.5nm)的可调谐激光,激光器输出功率高,信噪比在大部分可调带宽内高于 60dB,实验结果与理论分析符合得较好.

- [1] Ono H , Yamada M , Kanamori T *et al* 1999 *IEEE J. Lightwave Technol.* **17** 490
- [2] Flood F A 2000 *Proc. OFC '00* ,Baltimore ,Maryland ,paper WG1
- [3] Dong X Y ,Ning D ,Meng H Y ,Yuan S Z ,Kai G Y and Dong X Z 2002 *Chin. J. Quantum Electron.* **19** 193 [in Chinese] [董新永、宁鼎、蒙红云、袁树忠、开桂云、董孝义 2002 量子电子学报 **19** 193]
- [4] Tabuchi H , Ishikawa H 1990 *Electron. Lett.* **26** 742
- [5] Oh J M , Choi H B , Lee D *et al* 2001 *Proc. Optical Fiber Communication Conference 01* (California : Anaheim) paper WA6
- [6] Yamashita S ,Nishihara M 2001 *IEEE J. Selc. Top. Quantum Electron.* **7** 41
- [7] Bellemare A , Karasek M , Riviere C *et al* 2001 *IEEE J. Selc. Top. Quantum Electron.* **7** 22
- [8] Guan B O , Guo Z Y , Liu Z G , Dong X Y 2000 *Chin. J. Laser.* **27** 197 (in Chinese) [关柏鸥、郭转运、刘志国、董孝义 2000 中国激光 **27** 197]
- [9] Ding L , Kai G Y , Yuan S Z , Dong X Y *et al* 2001 *Chin. Phys. Lett.* **18** 376
- [10] Dong X Y , Guan B O , Wen W S , Tan H Y and Dong X Y *Acta Opt. Sin.* (to be published) [in Chinese] [董新永、关柏鸥、文伟成、谭华耀、董孝义 光学学报 (待发表)]
- [11] Becker P C , Olsson N A and Simpson J R 1998 *Erbium-Doped Fiber Amplifiers* (New York : Academic Press)

Output characteristics of tunable fiber ring laser :modeling and experimentation

Dong Xin-Yong^{1,2)} Zhao Chun-Liu^{1,2)} Guan Bai-Ou²⁾ Tan Hua-Yao²⁾ Yuan Shu-Zhong¹⁾
Kai Gui-Yun¹⁾ Dong Xiao-Yi¹⁾

¹⁾*Institute of Modern Optics , Nankai University , Tianjin 300071 ,China)*

²⁾*Department of Electrical Engineering , The Hong Kong Polytechnic University , Kowloon , Hong Kong ,China)*

(Received 3 December 2001 ; revised manuscript received 18 March 2002)

Abstract

Output characteristics of a tunable fiber ring laser are studied both by theoretical modeling and by experimentation. Dependencies of laser output power on lasing wavelength , pump power , erbium-doped fiber(EDF) length , output coupling ratio , and intra-cavity loss are demonstrated by using a simple theoretical model. It is shown that a wide tunable range over 130nm (i. e. 1500—1630nm) can be obtained through parameter optimization. As a result , the laser with a tunable range up to 100nm , high output power , and high signal-to-noise ratio in most of the tunable range has been achieved in experimentation. The experimental data are in good agreement with the theoretical modeling results.

Keywords : erbium-doped fiber , fiber ring laser , wavelength tunable , fiber Fabry-Perot filter

PACC : 4260 , 4281