光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023022201

掺铥光纤激光器的波长调谐特性研究

郑文龙[1,2,3]，莫锦恋[1,2,3]，高震森[1,2,3]，徐鹏柏[1,2,3]，董新永[1,2,3]*

（1. 广东工业大学 信息工程学院，广州 510006；2. 广东工业大学 先进光子技术研究所，广州 510006；
3. 广东省信息光子技术重点实验室，广州 510006）

摘　要： 基于简化的二能级激光系统和均匀展宽理论模型，利用原子速率方程和功率传输方程建立了掺铥光纤激光器的理论模型，并以环形腔掺铥光纤激光器为例，通过 Matlab 编程数值模拟研究了其出射功率和波长调谐范围与腔内损耗、掺铥光纤长度、输出耦合比、泵浦波长和泵浦功率等激光器参量的关系。数值模拟结果表明，降低激光器腔内损耗、提高泵浦激光功率和优化掺铥光纤长度可以提高掺铥光纤激光器的出射功率和增加波长调谐范围，而增加输出耦合比虽能提高激光功率，却减小了波长调谐范围。经过参数优化，在腔内总损耗为 3 dB、输出耦合比为 10％的情况下，通过提高泵浦激光功率和优化掺铥光纤长度，掺铥光纤激光器的波长调谐范围可达 528 nm（1 660～2 188 nm），高于目前已报道的实验结果。将部分模拟结果与文献报道的实验结果进行对比，较好地证实了模型的准确性。研究工作对于掺铥光纤激光器的设计和发展具有重要的理论参考价值和指导意义。

关键词： 掺铥光纤激光器；理论模拟；波长可调谐激光器

中图分类号： O436　**文章编号：** 1001－5868(2023)03－0336－08

Numerical Study on Wavelength Tuning Characteristics of Thulium-Doped Fiber Lasers

ZHENG Wenlong[1,2,3], MO Jinlian[1,2,3], GAO Zhensen[1,2,3], XU Pengbai[1,2,3], DONG Xinyong[1,2,3]

(1. School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, CHN;
2. Institute of Advanced Photonics Technology, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, CHN; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Photonics Information Technology, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, CHN)

Abstract: The theoretical model of thulium-doped fiber laser based on the simplified two-energy laser system and uniform spreading theory model was established, using the atomic rate equation and power transfer equation. Taking the ring cavity thulium-doped fiber laser as an example, the relationship between its output power and wavelength tuning range and cavity loss, thulium-doped fiber length, output coupling ratio, pumping wavelength and pumping power, etc., was investigated through Matlab programming numerical simulation. The numerical simulation results show that reducing the laser cavity loss, increasing the pump laser power and optimizing the thulium-doped fiber length can improve the output power and increase the wavelength tuning range of thulium-doped fiber laser, while increasing the output coupling ratio can improve the laser power but reduce the wavelength tuning range. After parameter optimization, the wavelength tuning range of the thulium-doped fiber laser can reach 528 nm (1 660～2 188 nm) by increasing the pump laser power and optimizing the thulium-doped fiber

收稿日期：2023－02－22.

基金项目：国家重点研发计划项目(2020YFB1805804)；国家自然科学基金项目(61775204，11974083)；广东省引进创新创业团队项目(2019ZT08X340)；浙江省基础公益研究计划项目(LGG19A040001).

* **通信作者：**董新永　**E-mail：** dongxy@gdut.edu.cn

length at a total intra-cavity loss of 3 dB and an output coupling ratio of 10%, which is higher than the experimental results reported so far. Some of the simulation results are compared with those experimental results in the literature, and the accuracy of the model is well confirmed. These findings have important theoretical reference value and guiding significance for the design and development of thulium-doped fiber lasers.

Key words: thulium-doped fiber laser; theoretical simulation; wavelength tunable laser

0　引言

掺铥光纤激光器的出射激光波长所在的 2 μm 波段包含丰富且强烈的水分子吸收峰[1-2]以及低传输损耗的大气通信窗口[3-4]，因此在激光手术、激光通信和激光雷达等领域有着重要应用。波长可调谐掺铥光纤激光器因其发射波长可以灵活调节从而覆盖较宽的光谱范围而备受关注。1990 年，Hanna 等以波长为 810 nm 的染料激光器通过空间光耦合的方式泵浦掺铥光纤，利用两个反射镜构成谐振腔和一个透射波长可调谐的双折射滤光片，得到了调谐范围达 236 nm(1 780～2 056 nm)的激光输出[5]。1998 年，Shubochkin 等[6]采用掺铥光纤制备的熔融拉锥耦合器构成的环形腔结构，结合 793 nm 激光泵浦，通过调节腔内偏振控制器的状态，实现了超过 100 nm(1 810～1 930 nm)的波长调谐。同年，Jackson 等[7]通过改变掺铥光纤长度和腔镜反射率的方法测试掺铥光纤激光的出射波长范围，在 1 880～2 033 nm 的波长范围内测得激光。后来，利用光纤布拉格光栅(FBG)作为波长调谐元件，Daniel 和 Li 等分别实现了 1 660～1 750 nm 和 1 925～2 200 nm 的波长调谐掺铥光纤激光器[8-9]，利用体布拉格光栅，Tokurakawa 等在 2015 年实现了 330 nm(1 740～2 070 nm)的波长调谐[10]，利用声光可调谐滤波器，Stevens 等[11]在 2016 年获得了 400 nm(1 710～2 110 nm)的调谐范围，400 nm 是迄今所有报道的掺铥光纤激光器中最大的波长调谐范围。

由上可见，在不同实验报道中获得的掺铥光纤激光器的波长输出范围差别很大，这与激光器的结构参数和器件性能等有直接的关系。而现有研究工作对于掺铥激光器的输出特性特别是波长调谐范围缺乏系统的理论研究，认知存在不足，如其理论极限是多少、输出波长范围由哪些因素决定、如何通过优化激光器的具体结构参数提高激光波长调谐范围等。这些问题的回答都需要建立一个完备的掺铥光纤激光器理论模型并进行系统的模拟研究。虽然国内外对掺铥光纤激光器的输出特性也已经开展了一些理论模拟研究[12-15]，但是这些研究尚局限在个别结构参数如掺铥光纤长度[13]对激光器输出的影响，不够全面和系统化。

本文以环形腔掺铥光纤激光器为例，基于简化的二能级激光系统和均匀展宽理论模型，利用原子速率方程和功率传输方程，建立了掺铥光纤激光器的理论模型，并通过 Matlab 编程计算，全面研究了掺铥光纤激光器的输出特性与其腔内总损耗、掺铥光纤长度、输出耦合比、泵浦波长和功率等参数的关系，得到了 528 nm 的理论波长调谐范围。论文研究结果可为各类掺铥光纤激光器的结构设计和出射波长范围优化提供较为全面的理论指导。

1　理论模型

所采用的环形腔掺铥光纤激光器的结构如图 1 所示。激光器采用效率最高的同带泵浦，泵浦波长在 1.55～1.61 μm，泵浦激光通过 1 550/2 000 nm 波分复用器(WDM)前向注入掺铥光纤(TDF)，输出耦合器将腔内一部分激光输出，剩余的激光在环形腔内经可调谐滤波器、隔离器和 WDM 后进入掺铥光纤，被再次放大。由于隔离器和滤波器的作用，环形腔内只能在一个方向产生与可调谐滤波器透射波长相同的激光。

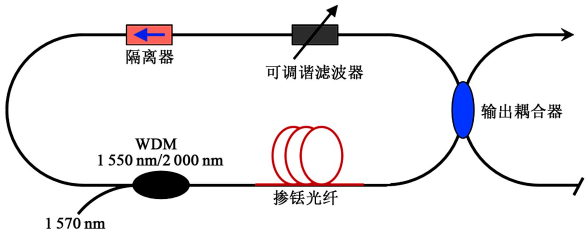


图 1　可调谐掺铥光纤环形腔激光器结构示意图

在二氧化硅介质中，铥离子的能级结构及电子跃迁如图 2 所示[12-13]，其中能级 $^3H_6$ 为基态，$^3F_4$ 为亚稳态，$^3H_5$ 和 $^3H_4$ 为激发态，括号内的数值为对应能级的寿命。通常可以采用能级 $^3H_6 \rightarrow {}^3H_4$ 和

$^3H_6 \rightarrow {}^3F_4$ 这两种方式泵浦来获得 2 μm 波段的发射，对应的泵浦波长一般为 793 和 1 570 nm。当泵浦波长为 793 nm 时，铥离子会被激发到 $^3H_4$ 激发态，然后电子通过无辐射弛豫跃迁到 $^3H_5$ 和 $^3F_4$ 能级，最后从 $^3F_4$ 跃迁到基态产生 2 μm 波段的光子。而当 1 570 nm 波段的泵浦激光作用在掺铥光纤上时，铥离子被激发到 $^3F_4$ 能级，然后电子从 $^3F_4$ 跃迁回基态，产生 2 μm 波段的光辐射。由于 $^3H_4$ 和 $^3H_5$ 能级的寿命非常短，分别只有 14 μs 和 7 ns[13]，而亚稳态 $^3F_4$ 能级的寿命远大于其他两个激发态能级的寿命，根据不同文献的报道其寿命在 300～600 μs[12-13,16] 范围内，我们根据较新的报道在计算中取值 560 μs[16]。基于上述能级寿命的巨大差异，为了简化模型和便于计算，我们将铥离子的能级结构简化为仅包含基态和亚稳态的二能级激光系统，并将泵浦光波长设定在同带泵浦的波长范围内。

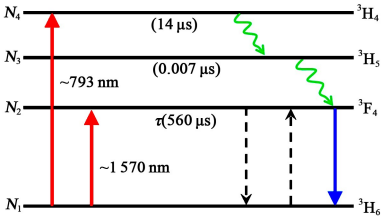


图 2 铥离子的能级跃迁

采用简化的二能级激光系统的均匀展宽理论模型，设基态和亚稳态的铥离子粒子数分别为 N_1 和 N_2，则激光器在稳态工作情况下的原子速率方程可表示为：

$$\frac{dN_1(z)}{dt} = -\frac{dN_2(z)}{dt} = -W_a(z)N_1(z) + \left[W_e(z) + \frac{1}{\tau}\right]N_2(z) = 0 \quad (1)$$

式中，τ 为亚稳态能级的寿命，$W_a(z)$ 和 $W_e(z)$ 分别为受激吸收几率和受激发射几率，可分别由下式求得：

$$W_a(z) = \sum_\nu \frac{\sigma_a(z)}{A_{eff}h\nu}[P^+(z,\nu) + P^-(z,\nu)]\Gamma(\nu) \quad (2)$$

$$W_e(z) = \sum_\nu \frac{\sigma_e(z)}{A_{eff}h\nu}[P^+(z,\nu) + P^-(z,\nu)]\Gamma(\nu) \quad (3)$$

式中，σ_a 和 σ_e 分别为铥离子的吸收截面和发射截面，h 为普朗克常数，A_{eff} 为掺铥光纤的有效模场面积，$\Gamma(\nu)$ 为 LP_{01} 模场强度分布与铥离子分布的重叠因子(Overlap Integral Factor)。σ_a，σ_e 和 $\Gamma(\nu)$ 在 1 560～2 300 nm 范围内随波长的变化如图 3 所示(σ_a 和 σ_e 均由厂家提供，$\Gamma(\nu)$ 为计算所得)。$P^\pm(z,\nu)$ 分别为正向和反向传播的频率为 ν 的光功率，根据频率不同可代表泵浦光、放大的自发辐射光(ASE)和激光的功率，$z(0 \leqslant z \leqslant L)$ 为掺铥光纤的长度坐标，L 为掺铥光纤的长度。

在掺铥光纤中，正向和反向传输的光的功率传输方程可由下式表述：

$$\frac{dP^+(z,\nu)}{dz} = 2h\nu\Delta\nu\Gamma(\nu)\sigma_e(\nu)N_2(z) + [\sigma_e(\nu)N_2(z) - \sigma_a(\nu)N_1(z)]\Gamma(\nu)P^+(z,\nu) \quad (4)$$

$$\frac{dP^-(z,\nu)}{dz} = -2h\nu\Delta\nu\Gamma(\nu)\sigma_e(\nu)N_2(z) - [\sigma_e(\nu)N_2(z) - \sigma_a(\nu)N_1(z)]\Gamma(\nu)P^-(z,\nu) \quad (5)$$

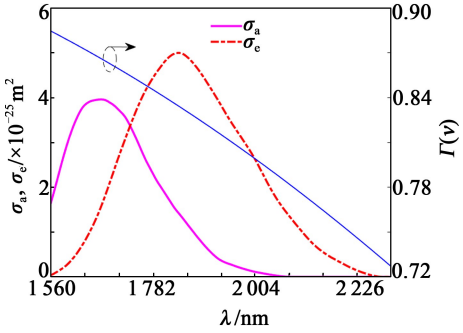


图 3 铥离子的吸收截面、发射截面和重叠因子

根据图 1 所示环形腔激光器的结构和运行条件，有以下边界条件成立：

$$P(0,\nu_{pump}) = P_{pump} \quad (6)$$

$$P^+(0,\nu_{ASE}) = P^-(L,\nu_{ASE}) = 0 \quad (7)$$

$$P^+(0,\nu_{laser}) = VP^+(L,\nu_{laser}) \quad (8)$$

式中，P_{pump} 表示频率为 ν_{pump} 的正向泵浦光功率，ν_{ASE} 和 ν_{laser} 分别为 ASE 和激光的频率；V 为传输系数，描述了激光从掺铥光纤末端传输到掺铥光纤起始端所剩余部分的比率，与腔内总损耗成反比。联立以上各式，利用 Matlab 软件的龙格-库塔迭代法求解激光器的功率传输方程，得到各种频率的光在掺铥光纤不同长度处的功率分布情况，既可获得激光器在不同波长的输出功率，即激光器的输出光谱。

2 模拟结果与分析

我们利用上述模型计算了掺铥光纤激光器在不同波长的输出光谱，设定激光器的结构参数分别为：掺铥光纤的铥离子浓度为 1.75×10^{26} m^{-3}[17]（以下

计算中不变)，纤芯直径为 10 μm，数值孔径为 0.15，掺铒光纤长度 $L=0.2$ m，腔内总损耗 $\varepsilon=3$ dB，输出耦合比 $\eta_{oc}=10\%$，泵浦波长和功率分别为 1 570 nm 和 1.0 W。得到不同波长的掺铒光纤激光输出光谱如图 4 所示，输出波长分别为 1 660，1 780，1 900，2 020 和 2 180 nm。由图可见，掺铒光纤激光器的最小和最大出射波长相差 520 nm，当激光器工作在 1 900～2 100 nm 波长范围内时，其输出功率比较高，放大的自发辐射(ASE)谱的功率比较低，光信噪比(OSNR)高达 77.24 dB。而当激光器工作在波长调谐范围的两端时，由于激射波长远离 ASE 谱的峰值波长，无法充分压制 ASE 噪声，导致宽带的 ASE 噪声谱的功率水平明显升高，而且激光峰值功率下降，光信噪比因此明显下降。当激光器工作在 1 660 和 2 180 nm 时，光信噪比分别减小到 21.3 和 32.3 dB。

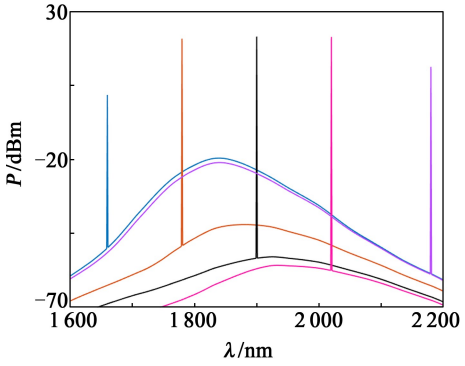


图 4　掺铒光纤激光器的模拟输出光谱($\varepsilon=3$ dB，$L=0.2$ m，$\eta_{oc}=10\%$)

2.1　泵浦波长和泵浦功率的影响

首先计算了泵浦波长和泵浦功率对掺铒光纤激光器输出性能的影响。在泵浦波长分别为 1 570，1 590 和 1 610 nm，其他参数跟前面相同的情况下，计算得到的激光输出功率谱如图 5 所示，激光器的波长调谐范围分别为 528 nm(1 660～2 188 nm)，532 nm(1 656～2 188 nm)和 528 nm(1 660～2 188 nm)，在 1 590 nm 取得稍宽一点的调谐范围。泵浦激光的吸收系数是掺铒光纤的吸收截面和发射截面共同决定的。在该波长范围内，吸收截面远高于发射截面，所以泵浦光的吸收主要由吸收截面决定。但在 1 600 nm 之后，吸收截面的增长趋缓，而发射截面的增长迅速并增大到足以影响泵浦光的吸收，因此泵浦波长的选择以 1 590～1 600 nm 为效果最佳。当然，1 570，1 590 和 1 610 nm 这几个泵浦波长获得的结果是非常接近的，在实际掺铒光纤激光器设计中，还要受泵浦激光器波长和功率获取的难易程度影响，如在很多已报道的工作中，都采用了商业上容易获得的 1 570 nm 的高功率掺铒光纤激光器作为泵浦源。因此，在本文后面的模拟工作中，我们将泵浦波长设定为 1 570 nm。

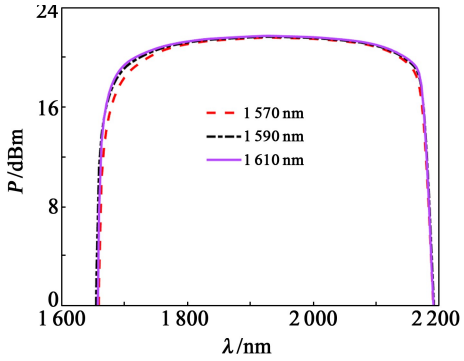


图 5　不同泵浦波长下掺铒光纤激光器的功率谱($\varepsilon=3$ dB，$L=0.2$ m，$\eta_{oc}=10\%$)

图 6 所示为不同 1 570 nm 泵浦激光功率下，不改变其他参数情况下计算得到的掺铒光纤激光器的输出功率谱。由图可见，激光器的波长调谐范围随着泵浦功率的增大而变宽，在 0.3，0.5，0.8，1.0 和 1.2 W 的泵浦功率下，分别为 344 nm(1 792～2 136 nm)，444 nm(1 724～2 168 nm)，508 nm(1 676～2 184 nm)，528 nm(1 660～2 188 nm)和 540 nm(1 652～2 192 nm)。同时，随着泵浦功率的增加，激光器的输出功率随之增大。在 0.3，0.5，0.8，1.0 和 1.2 W 的泵浦功率下，激光器的最高输出功率分别为：14.9，18.0，20.5，21.5 和 22.5 dBm。所以，在以下的计算中，我们就以 1.0 W 泵浦功率为例进行研究。

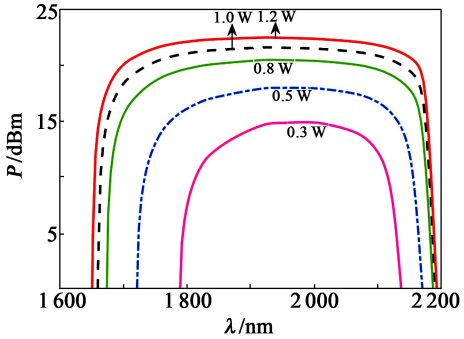


图 6　不同泵浦功率下掺铒光纤激光器的功率谱($\varepsilon=3$ dB，$L=0.2$ m，$\eta_{oc}=10\%$)

2.2　腔内总损耗的影响

腔内总损耗 ε 为激光在环形腔内从掺铒光纤末端传输到掺铒光纤起始端所经历的总的损耗(包含耦合器分光输出所带来的损耗 ε_{oc})，是影响掺铒光纤激光器输出性能的重要因素。图 7 是在掺铒光纤

长度为 0.2 m、输出耦合比为 10%的情况下，改变腔内总损耗得到的激光输出模拟结果。由图可见，掺铒光纤激光器的波长调谐范围和输出功率随腔内总损耗的变化很大。随着腔内损耗的增加，波长调谐范围快速收窄，输出功率降低。

在腔内总损耗分别为 3，6 和 9 dB 时，波长调谐范围分别为 528 nm(1 660～2 188 nm)，468 nm(1 672～2 140 nm)和 424 nm(1 684～2 108 nm)，最高输出功率分别为 21.6，19.5 和 18.6 dBm。当继续增加腔内损耗时，激光输出的波长范围继续收窄，输出功率降低。在腔内总损耗分别为 15，21 和 30 dB 时，激光输出的波长范围分别缩小到 348 nm(1 704～2 052 nm)，284 nm(1 728～2 012 nm)和 160 nm(1 772～1 932 nm)，最高输出功率分别降低至 17.5，16.7 和 14.4 dBm。腔内总损耗的增加使调谐范围两侧发射截面小的波长依次停止激射，因而调谐范围随之减少。

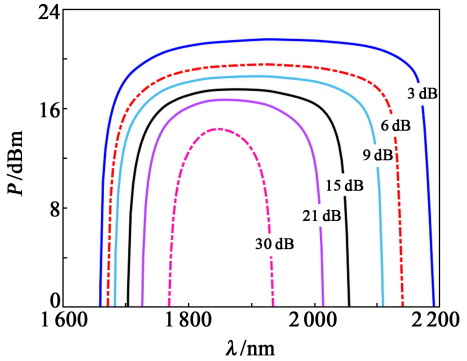


图 7 不同腔内总损耗下掺铒光纤激光器的功率谱(L=0.2 m，η_{oc}=10%)

众所周知，激光的产生与否取决于泵浦阈值功率是否达到。因此，我们计算了上述不同腔内总损耗下掺铒光纤激光器的泵浦阈值功率随波长的变化，结果如图 8 所示。由图可见，在同一腔内总损耗下，掺铒光纤激光器在 1 900～2 000 nm 波长范围的泵浦阈值较低，而位于调谐范围两侧波长的阈值急剧升高，直至逼近泵浦功率(超过泵浦功率则无法激射)。而腔内总损耗的增加，整体抬高了掺铒光纤激光器的泵浦阈值，其必然结果就是激光功率降低和波长调谐范围变窄。同时可见，随着腔内总损耗升高，长波长侧的阈值功率升高速率明显高于短波长侧，导致最低阈值波长都向短波长移动。当腔内总损耗分别为 3，6 和 9 dB 时，激光器的较低阈值波长分别为 1 924，1 906 和 1 896 nm。这种变化趋势与铒离子吸收及发射截面的光谱形状有直接的关系，其在长波长侧的变化趋势较短波长侧明显，所以激光器在长波长侧的激射受阈值影响较大。阈值功率的这些变化与前述激光器功率谱的计算结果一致。

我们在 3 dB 损耗下得到的波长调谐范围为 528 nm(1 660～2 188 nm)，虽然尚未有实验报道达到这么宽的范围，但是 1 660 nm 的最短波长在 Daniel 等[8]的掺铒光纤激光器实验工作中已有报道；另外，在 Li 等[9]实验报道中获得了 2 198 nm 的最长掺铒光纤激光波长。这些实验结果间接证明，我们通过优化激光器的结构参数计算得到的 528 nm 的波长调谐范围是可信的。

与此同时，在 3 dB 损耗下，我们计算得到在 1 930 nm 的泵浦阈值为 0.125 W，与文献[18]中掺铒光纤激光器在此波长的泵浦阈值的实验结果是相同的，文献中激光器的插入损耗为 3 dB。而文献[19]在 2 000 nm 获得激光输出的 0.2 W 的泵浦阈值，也与我们在 6 dB 腔内损耗情况下得到的 0.19 W 的结果基本吻合。

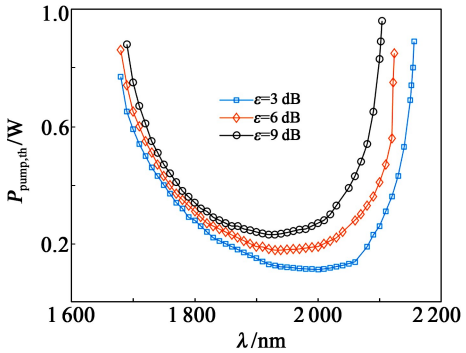


图 8 三种腔内总损耗下掺铒光纤激光器的泵浦阈值功率谱(L=0.2 m，η_{oc}=10%)

2.3 掺铒光纤长度的影响

掺铒光纤长度是决定掺铒光纤激光器输出波长范围的重要因素。图 9 为在腔内总损耗 ε=3 dB、输出耦合比 η_{oc}=10%的情况下，掺铒光纤长度分别为 0.05，0.1，0.2，0.5，1.0 和 2.0 m 的理论模拟结果。由图 9 可见，随着掺铒光纤长度增加，波长调谐范围逐渐变宽，中心波长红移。当掺铒光纤长度分别为 0.05，0.1 和 0.2 m 时，波长调谐范围分别为 408 nm(1 680～2 088 nm)，484 nm(1 660～2 144 nm)和 528 nm(1 660～2 188 nm)，中心波长分别在 1 884，1 902 和 1 924 nm，波长调谐范围在掺铒光纤长度 0.2 m 时达到最大值。随后，波长调谐范围随掺铒光纤长度的继续增加而开始逐渐减小，而中心波长继续红移。当掺铒光纤长度分别增加到 0.5，1.0 和

2.0 m 时，波长调谐范围分别降为 444 nm(1 760～2 204 nm)，368 nm(1 836～2 204 nm)和 296 nm(1 908～2 204 nm)，中心波长分别红移至 1 982，2 020 和 2 056 nm。

可见，随着掺铒光纤长度的增加，波长调谐范围先增加后减小，中心波长发生红移，这与文献[18]报道的实验结果所展现的波长范围和中心波长随掺铒光纤长度变化的趋势相吻合。在该文献中，通过逐渐增加掺铒光纤长度，在 2.0，4.0 和 8.0 m 光纤长度下，研究人员得到的激光输出谱的波长调谐范围分别是 240，255 和 220 nm，其中心波长分别为 1 920，1 930 和 1 950 nm。在我们的计算中，掺铒光纤的最优长度为 0.2 m，与文献[17]中的相同铒离子浓度的掺铒光纤的优化长度相同，这间接证明，我们计算得到掺铒光纤的最优长度是可信的。

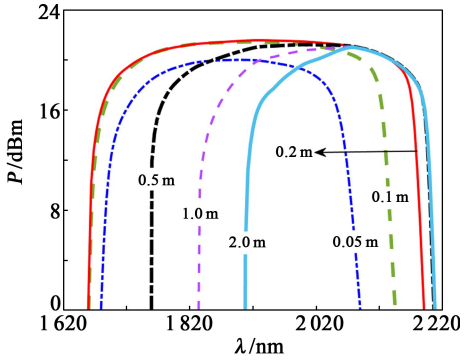


图 9　不同掺铒光纤长度下掺铒光纤激光器的功率谱(ε=3 dB，η_{oc}=10%)

此外，在我们的计算中，当掺铒光纤长度为 0.05，0.1，0.2，0.5，1.0 和 2.0 m 时，对应的最大输出功率为 20.0，21.4，21.5，21.2，21.1 和 21.0 dBm。可见，输出功率随掺铒光纤长度的增加呈现先增大后减小的变化趋势，这也符合文献[18]实验结果所展现的最高输出功率随光纤长度变化的趋势。在该文献中，通过逐渐增加掺铒光纤长度，在 2.0，4.0 和 8.0 m 光纤长度下，研究人员得到的激光输出的最高功率分别是 21，30 和 23 mW。

激光器的波长调谐范围和激光输出功率随光纤长度的变化呈现这种趋势，是因为当掺铒光纤的长度超过最优长度之后，光纤末端不能够充分地吸收到所需要的泵浦光，反而对已产生的激光进行吸收，使得激光输出功率降低，从而导致波长范围缩窄。综上，掺铒光纤的长度在激光器其他结构参数固定的情况下是存在最优值的，过短或过长都会使波长可调谐范围变小，输出功率降低，因此优化掺铒光纤的长度是提高掺铒光纤激光器性能的关键之一。

2.4　输出耦合比的影响

耦合器的输出耦合比决定了输出激光功率相对于腔内总激光功率的占比，同时也对腔内总损耗的大小产生影响，因此是影响掺铒光纤激光器输出特性的重要因素。为了研究其对掺铒光纤激光器输出的影响，我们在设定腔内总损耗 ε=2.54 dB+ε_{oc}、掺铒光纤长度 L=0.2 m 的情况下，给出了激光器在不同输出耦合比情况下的数值模拟结果，如图 10 所示。由图可见，随着输出耦合比的增加，激光器的波长调谐范围缩窄，输出功率上升，直到输出耦合比超过 90%后，此时继续提高输出耦合比已经不能提高输出功率了，反而使其下降。

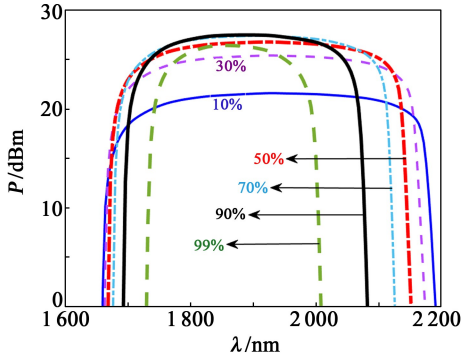


图 10　不同输出耦合比情况下掺铒光纤激光器的功率谱(ε=2.54 dB+ε_{oc}，L=0.2 m)

当输出耦合比 η_{oc} 分别取 10%，30%，50%，70%和 90%的时候，调谐范围分别为 528 nm(1 660～2 188 nm)，508 nm(1 664～2 172 nm)，476 nm(1 672～2 148 nm)，444 nm(1 680～2 124 nm)和 384 nm(1 696～2 080 nm)，最高输出功率分别为 21.6，25.4，26.7，27.4 和 27.5 dBm。当 η_{oc} 继续增加至 99%时，波长调谐范围继续缩窄，达到 276 nm(1 732～2 008 nm)，最高输出功率从 27.5 dBm 下降至 26.4 dBm。图 11 为在不改变参数情况下，输

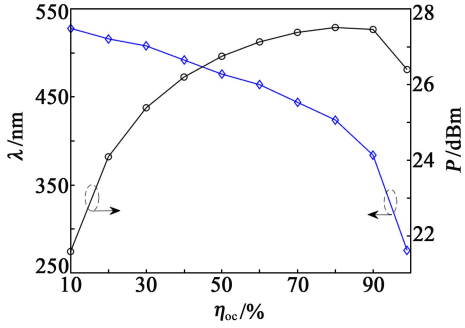


图 11　掺铒光纤激光器的波长调谐范围和最高输出功率随输出耦合比的变化(ε=2.54 dB+ε_{oc}，L=0.2 m)

出耦合比对波长调谐范围和最高输出功率的影响的计算结果。从图 11 我们可以更直观地看到，随着输出耦合比的增加，最高输出功率保持上升直到超过输出耦合比达到 90%，之后输出功率随输出耦合比下降，波长调谐范围继续变小。

上述波长调谐范围和输出功率随耦合比的变化趋势与文献[20]报道的实验结果所展现的变化趋势相吻合。在该文献中，随着输出耦合比从 0.1 增大到 0.99，掺铒光纤激光器的波长调谐范围变小，3 dB 调谐带宽从 121 nm(1 509～1 630 nm)减少到 42 nm(1 525～1 567 nm)；当输出耦合比分别为 0.5，0.7，0.9 和 0.99 时，最高输出功率分别是 14.8，15.8，17.5 和 17 dBm。

此外，由于输出耦合比和掺铒光纤长度同时影响激光器的输出功率，我们通过计算不同激射波长下的功率等值线图来分析两者的组合对激光器输出特性的影响。图 12 为不同激光波长下得到的数值模拟结果，腔内总损耗设定为 $\varepsilon=2.54\ \mathrm{dB}+\varepsilon_{oc}$，激光波长分别为 1 800，1 900，2 000 和 2 100 nm。可见，当掺铒光纤激光器工作在较短波长时，其最优选择为较短的掺铒光纤和较高的输出耦合比。如波长为 1 800 nm 时，在 80%的输出耦合比和 0.2 m 的掺铒光纤长度下，获得最高的激光输出功率范围。随着激光波长向长波长移动，激光器的最优参数选择表现为掺铒光纤的长度可以适度增加，同时输出耦合比适当降低。如当激光波长为 2 100 nm 时，掺铒光纤的适用长度范围变得很宽(0.2～2.0 m)，优化

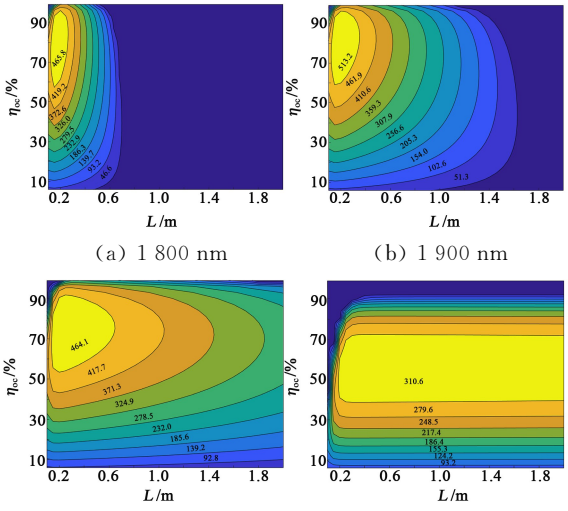


图 12 掺铒光纤激光器在不同波长的输出功率随掺铒光纤长度和输出耦合比变化的等值线图(输出功率标签单位为 mW($\varepsilon=2.54\ \mathrm{dB}+\varepsilon_{oc}$))

输出耦合比则降至 55%±14%。所以，输出耦合比和掺铒光纤长度的最优值随着发射波长的变化而显著变化，为了让掺铒光纤激光器保持高的输出功率，需要优化或平衡好这两个参数。

3 结论

本文根据原子速率方程和功率传输方程建立了掺铒光纤环形腔激光器的理论模型，通过 Matlab 编程数值模拟分析了激光器的输出与腔内损耗、掺铒光纤长度、输出耦合比、泵浦波长、泵浦功率等参量的关系。研究发现，降低掺铒光纤激光器的腔内损耗、优化掺铒光纤长度和减小输出耦合比可以提高掺铒光纤激光器的调谐范围。在腔内总损耗为 3 dB、输出耦合比为 10%情况下，通过提高泵浦激光功率和优化掺铒光纤长度，掺铒光纤激光器的波长调谐范围可达 528 nm(1 660～2 188 nm)，输出功率可达 21.6 dBm。虽然我们没有考虑浓度淬灭、激发态吸收、非均匀展宽效应、非辐射驰豫跃迁等复杂因素的影响，但多数计算结果被文献报道的实验测量所证实对于大多数掺铒光纤激光器的结构设计和优化具有理论参考价值和指导意义。

参考文献：

[1] Rothman L S, Gordon I E, Babikov Y, et al. The HITRAN2012 molecular spectroscopic database[J]. J. of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2013, 130: 4-50.

[2] 聂 伟，阚瑞峰，许振宇，等. 基于 TDLAS 技术的水汽低温吸收光谱参数测量[J]. 物理学报，2017，66(20)：97-102.
Nie Wei, Kan Ruifeng, Xu Zhenyu, et al. Measuring spectral parameters of water vapor at low temperature based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(20): 97-102.

[3] 张安军，段嘉霖，邢颖滨，等. 掺铥激光在生物医疗领域的应用[J]. 激光与光电子学进展，2022，59(1)：0100004.
Zhang Anjun, Duan Jialin, Xing Yingbin, et al. Application of thulium-doped laser in the biomedicine field[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(1): 0100004.

[4] Scholle K, Heumann E, Huber G. Single mode Tm and Tm, Ho: LuAG lasers for LIDAR applications[J]. Laser Phys. Lett., 2004, 1(6): 285-290.

[5] Hanna D C, Percival R M, Smart R G, et al. Efficient and tunable operation of a Tm-doped fiber laser[J]. Optics Communications, 1990, 75(3/4): 283-286.

[6] Shubochkin R L, Kozlov V A, Carter A, et al. Tunable thulium-doped all-fiber laser[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 1998, 10(7): 944-945.

[7] Jackson S D, King T A. High-power diode-cladding-pumped Tm-doped silica fiber laser[J]. Opt. Lett., 1998, 23(18): 1462-1464.

[8] Daniel J M O, Simakov N, Tokurakawa M, et al. Ultra-short wavelength operation of a thulium fibre laser in the 1 660～1 750 nm wavelength band[J]. Opt. Express, 2015, 23(14): 18269-18276.

[9] Li J, Sun Z, Luo H, et al. Wide wavelength selectable all-fiber thulium doped fiber laser between 1 925 nm and 2 200 nm [J]. Opt. Express, 2014, 22(5): 5387-5399.

[10] Tokurakawa M, Daniel J M O, Chenug C S, et al. Ultra-broadband wavelength-swept Tm-doped fiber laser using wavelength-combined gain stages[J]. Opt. Express, 2015, 23(1): 471-476.

[11] Stevens G, Legg T. All-fiber widely tunable thulium laser [C]// Fiber Lasers Ⅻ: Technology, Systems, and Applications. International Society for Optics and Photonics, 2016, 9728: 972814.

[12] Peterka P, Faure B, Blanc W, et al. Theoretical modelling of S-band thulium-doped silica fibre amplifiers[J]. Opt. Quant. Electron., 2004, 36(1): 201-212.

[13] Jackson S D, King T A. Theoretical modeling of Tm-doped silica fiber lasers[J]. J. Lightwave Technol., 1999, 17(5): 948-956.

[14] Sharma K, Srivastava M, Venkitesh D, et al. Design and modeling of tunable mid-IR fiber laser using thulium doped fibers[C]// Proc. of 2012 Inter. Conf. on Fiber Optics and Photonics (PHOTONICS), 2012: 1-3.

[15] Romano C, Tench R E, Delavaux J M. Simulation of 2 μm single clad thulium-doped silica fiber amplifiers by characterization of the $^3F_4$-$^3H_6$ transition[J]. Opt. Express, 2018, 26(20): 26080-26092.

[16] Agger S D, Povlsen J H. Emission and absorption cross section of thulium doped silica fibers[J]. Opt. Express, 2006, 14(1): 50-57.

[17] Tsai T Y, Tsao H X, Huang C L, et al. 1 590-nm-pumped passively Q-switched thulium all-fiber laser at 1 900 nm[J]. Opt. Express, 2015, 23(9): 11205-11210.

[18] Li Z, Alam S U, Jung Y, et al. All-fiber, ultra-wideband tunable laser at 2 μm[J]. Opt. Lett., 2013, 38(22): 4739-4742.

[19] Kharitonov S, Bres C S. Isolator-free unidirectional thulium-doped fiber laser[J]. Light: Sci. & Appl., 2015, 4(10): e340-e340.

[20] Dong X, Shum P, Ngo N Q, et al. Output power characteristics of tunable erbium-doped fiber ring lasers[J]. J. Lightwave Technol., 2005, 23(3): 1334-1341.

作者简介：

郑文龙(1997—)，男，广东省河源市人，硕士研究生，主要从事掺铥光纤激光器方面的研究；

董新永(1975—)，男，博士，教授，主要从事光纤激光器、光纤放大器和光纤传感技术等方面的研究。