

全光纤自组织激光腔稳态模型及饱和吸收体光栅特性数值模拟

徐攀 胡正良 马明祥 姜暖 胡永明

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 在掺铒光纤环形腔内插入未抽运掺铒光纤可形成自组织激光腔。在环形腔多模激光器稳态方程中引入饱和吸收体光栅非线性耦合模方程,建立了全光纤自组织激光腔稳态模型,并得到了边模平坦的单纵模解。仿真分析了激光运行过程中输出耦合器位置、输出比例以及抽运功率等参数对饱和吸收体光栅特性的影响。仿真结果表明,在同等抽运参数与输出比例下,输出耦合器前置式结构较后置式结构中的光栅具有更高的纵模边模抑制比;两种结构下纵模边模抑制比均随输出比例增加而增加,并随抽运功率增加而减小。对前置式结构优化的输出耦合比例取值范围在 60%~80%之间。对两种结构激光器的稳定性地图测量证实了仿真结果。

关键词 光纤光学;光纤激光器;自组织;动态光栅;跳模

中图分类号 TN253; TN248; TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201333.0414001

Steady State Model of All-Fiber Self-Organizing Laser Cavities and Numerical Simulation on Properties of Saturable Absorption Gratings

Xu Pan Hu Zhengliang Ma Mingxiang Jiang Nuan Hu Yongming

(School of Optoelectronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract It is known that the all-fiber self-organizing laser cavity can be formed through inserting an unpumped erbium-doped fiber into an erbium-doped fiber ring cavity. The steady state model of this self-organizing laser cavity is established through introducing the nonlinear coupling equations of the saturable absorption grating into the standby equations of the multimode ring laser, and the single-longitudinal-mode solution with flat side mode spectrum is obtained. The influences of the position of the output coupler, output ratio and pump power on the characteristics of the saturable absorption grating are numerically analyzed. The numerical results show that the grating in the prepositive output coupler structure has a higher longitudinal-mode side mode suppression ratio (LM-SMSR) than in the postpositive output coupler structure with the same pump level and output ratio; and in both structures, the LM-SMSRs of the gratings increase with the output ratio but decrease with the pump power. The optimal range of the output ratio for the prepositive coupler structure is 60% ~ 80%. The numerical results are confirmed by the measured stability maps of the lasers with both structures.

Key words fiber optics; fiber laser; self-organization; dynamical grating; mode hopping

OCIS codes 060.3510; 190.2055; 140.3500; 140.3510

1 引言

自组织激光腔(SOLC)由在普通激光腔内插入动态全息记录介质而形成,可用于高性能单纵模/横

模激光器,在相干光通信、光传感、干涉光谱学和微波光子学等领域具有重要应用潜力^[1,2]。全息记录介质通常是一段具有复极化率光强非线性响应材料

收稿日期: 2012-10-09; 收到修改稿日期: 2012-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(60908004,11274384)资助课题。

作者简介: 徐攀(1984—),男,博士研究生,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: hbpanpan@gmail.com

导师简介: 胡永明(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感、光纤水听器等方面的研究。

E-mail: sdss@21cn.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

(如光折变晶体^[2~4]、饱和吸收介质^[5~12]等)。近年来,采用 SOLC 结构的光纤激光器获得了人们的关注。光纤激光器单横模条件由光纤基模特性自动得到满足,因而具有较高的光束质量。在此基础上引入未抽运的掺铒光纤(UPEDF)作为饱和吸收体,形成自适应饱和吸收体光栅(SAG),可以获得线宽更窄、噪声更低的高相干激光输出^[5~12]。目前,此类激光器的基础研究已趋成熟,正获得广泛应用。然而,实际应用中出现的各类跳模现象降低了相关系统的稳定性,能否有效抑制跳模成为此类激光器实现工业化生产的关键问题^[13~15]。

通过优化设计提高 SAG 的性能,降低环境扰动和温度效应引起的跳模是成本较低的被动抑制方法。虽然有大量文献研究了 SAG 机理及本身的特性^[16,17],如掺铒光纤(EDF)长度和输入光功率对自适应光栅特性的影响^[18]、基于饱和增益(损耗)光栅的环形镜的特性等^[19]。还有一些研究关注被动腔,考虑了其中纵模结构的影响^[8,17]。徐攀等^[20]考虑纵模结构对光栅反射谱进行频谱采样,计算了纵模反射谱,得到了获得优化的平坦纵模反射谱条件。但这些研究都未考虑实际运行中含增益介质的主动腔对 SAG 的影响。由于激光器的自组织特性,特定腔结构下注入 SAG 光功率与激光抽运功率的关系不能简单得到,且腔内 SAG 特性难以测量,研究中往往进行多次试验来获取优化的结构及参数,成本较大,耗时较长^[5~12]。

在已获得的平坦纵模反射谱条件的基础上,进一步考虑激光增益过程,建立了全光纤自组织激光腔稳态模型,可对起振模式稳态特性进行分析,特别是能够考察激光运行过程中相关参数对 SAG 特性的影响。由于目前尚无有效的实验手段测量主动腔内的 SAG 特性,本模型可为该类激光器的优化设计

提供有一定参考意义的分析工具。

2 模 型

2.1 建模分析

任何激光器均通过自组织过程起振,在激光腔内插入 SAG 后,这一自组织过程得到强化。自组织腔内激光起振过程可分为三个阶段:1) SAG 未形成前,SOLC 相当于普通激光腔,各纵模自由运转;由于掺铒光纤的增益均匀加宽特性,它们之间存在激烈的模式竞争;2)初始的各个纵模在 UPEDF 上形成各自的驻波结构,通过材料响应形成各自的动态光栅;3)占有微弱优势的纵模形成较强的动态光栅,在原有模式竞争的基础上,进一步抑制其余模式起振,在循环过程中不断强化这一过程,最终形成稳定的单纵模振荡。在已有的研究中,总结了 SOLC 的以下特点:自组织腔的动力学过程不仅依赖于系统的当前参数,也依赖于系统演化的历史——SAG 保存了过去一段时间激光器模式结构的记忆;虽然单纵模总是可以实现的,但每次起振时通向单纵模状态的演化过程并不重复^[1]。

显然,在理论上全面描述这一动态过程是复杂的,特别是多模光场在 UPEDF 中竞争形成 SAG 这一过程,难以进行完整的理论描述。但是激光器达到稳态后单纵模的稳定性是本文的关注点。因此忽略选择稳定模式的动态过程,通过人为选定一个优势纵模来分析该振荡建立后激光腔的稳态性能。

SOLC 模型由增益单元、损耗单元、饱和吸收体光栅、反馈及输出单元组成,核心是以速率方程表达的增益光纤模型以及由非线性耦合模方程表达的 SAG 稳态模型。速率方程不包含光场相位项,因此环形腔的存在对光场相位的影响通过引入纵模结构

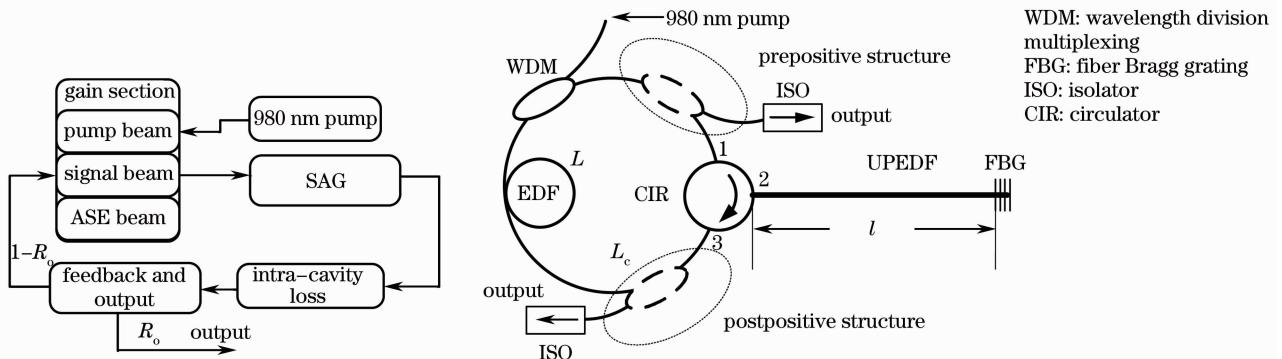


图 1 全光纤自组织激光腔稳态模型示意图及其结构

Fig. 1 Schematic of the steady state model of the all-fiber self-organizing laser cavity and its structure

来表征。这一唯象的处理方法在本文的限定条件下是有效的,并且它还提供了一个清晰的物理图像,即有源腔内的 SAG 有效反射谱由周期分布的纵模结构对自由 SAG 反射谱进行频域采样而得到。激光器的数值求解过程模仿激光器的起振过程,即由增益单元产生的放大自发辐射(ASE)开始,按照如图 1 左边所示流程经历损耗、选模以及反馈过程,在每一轮循环中计算出掺铒光纤纵模增益谱以及 SAG 纵模反射谱,直至最终收敛。

2.2 有源环形腔模型

有源环形腔结构如图 1 所示, L 为增益掺铒光

纤长度, l 为 UPEDF 长度, L_c 为腔内剩余光纤长度。 R_o 为输出耦合器的输出比例。设选模光纤光栅的中心波长为 λ_o , 带宽为 ΔV 。由于通常用于激光器中的光栅边模抑制比(SMSR)高达 30 dB, 可以近似认为通光带宽外光场强度为零, 因此只考虑 ΔV 带宽内的光场。将光纤中传输的光按照由腔长决定的纵模结构在频域上离散化, 纵模间隔为 $\Delta\nu$, 各阶纵模的中心频率为 ν_i , 因此, 可得到各阶纵模的功率传输方程如下^[21~24]:

$$\begin{cases} \frac{dP_k^s}{dz} = u_k \left[(g_k^* + \alpha_k) \frac{\bar{n}_2}{n_t} - (\alpha_k + \alpha') \right] P_k^s(z) \\ \frac{dP_l^{\text{ASE}}}{dz} = u_l \left[(g_l^* + \alpha_l) \frac{\bar{n}_2}{n_t} - (\alpha_l + \alpha') \right] P_l^{\text{ASE}}(z) + m u_l g_l^* \frac{\bar{n}_2}{n_t} h \nu_l \Delta\nu_l, \\ \frac{dP_j^p}{dz} = -u_j \alpha_j^p \left(1 - \frac{\bar{n}_2}{n_t} \right) P_j^p(z) - u_j \alpha P_j^p \end{cases} \quad (1)$$

(1) 式为信号光、ASE 光和抽运光的传输方程, P_k^s , P_l^{ASE} , P_j^p 分别为信号光、ASE 光及抽运光功率, 下标 j, k, l 分别为抽运光、信号光和 ASE 光的纵模序号; $g_{k,l}^*$ 和 $\alpha_{j,k,l}$ 分别为掺铒光纤的增益谱和吸收谱, α' 为光纤的衰减系数(本文中默认为零), h 为普朗克

常数。 \bar{n}_t 为铒离子平均总掺杂浓度, \bar{n}_2 为平均反转粒子数浓度。 $u_{j,k,l} = 1$ 表示正向传输, $u_{j,k,l} = -1$ 为反向传输。 m 为在光纤中传输光的偏振模数目。

$\frac{\bar{n}_2}{n_t}$ 为相对稳态反转粒子数分布, 由下式决定:

$$\frac{\bar{n}_2}{n_t} = \frac{\sum_j \frac{P_j^p}{P_j^{\text{th}}} + \sum_k \frac{\alpha_k P_k^s}{(\alpha_k + g_k^*) P_k^{\text{sat}}} + \sum_l \frac{\alpha_l P_l^{\text{ASE}}}{(\alpha_l + g_l^*) P_l^{\text{sat}}}}{1 + \sum_j \frac{P_j^p}{P_j^{\text{th}}} + \sum_k \frac{P_k^s}{P_k^{\text{sat}}} + \sum_l \frac{P_l^{\text{ASE}}}{P_l^{\text{sat}}}} \quad (2)$$

式中

$$P_j^{\text{th}} = \frac{h \nu_j \pi b_{\text{eff}}^2 \bar{n}_t}{\alpha_j \tau}, \quad P_{k,l}^{\text{sat}} = \frac{h \nu_{k,l} \pi b_{\text{eff}}^2 \bar{n}_t}{(\alpha_k + g_k^*) \tau},$$

式中 b_{eff} 为铒离子有效掺杂半径, τ 为亚稳态粒子寿命。

抽运光和信号光在循环开始和循环中的边界条件为

$$\begin{cases} P_n^p(z=0) = P^p \\ P_n^s(z=0, \nu_i) = 0, \quad n=1 \\ P_n^s(z=0, \nu_i) = P_{n-1}^{\text{ASE}}(z=L, \nu_i) \alpha (1 - R_o) F_n(\nu_i), \quad n=2 \\ P_n^s(z=0, \nu) = [P_{n-1}^{\text{ASE}}(z=L, \nu_i) + P_{n-1}^s(z=L, \nu_i)] \alpha (1 - R_o) F_n(\nu_i), \quad n > 2 \end{cases} \quad (3)$$

式中 n 为循环次数, α 为腔内背景传输损耗, 包括光纤的传输损耗、器件损耗及连接损耗; R_o 为输出耦合器的输出比例; $F_n(\nu_i)$ 为本模型的关键参数, 为 SAG 与光纤光栅共同形成的自适应干涉仪的反射谱, 在每轮循环中的 $F_n(\nu_i)$ 均需通过求解 SAG 非线性耦合模方程得到。在 2.3 节中将给出详细求解方法。

模型的仿真过程如下:

首先在抽运光的作用下, 铒纤将产生 ASE 信号, 此时铒纤无输入信号。

当循环次数 $n=2$ 时, 第一步中产生的 ASE 信号经谐振腔返回作为铒纤输入信号, 此时 UPEDF 中未形成 SAG, 整个 UPEDF 相当于无滤波结构的

损耗单元,且工作在小信号吸收状态;在这一步可判断主模式的小信号增益是否大于腔内总损耗,若增益大于损耗可进入下一轮循环;反之激光器将无法起振。

当循环次数 $n > 2$ 时,第 n 步循环中铒纤的信号光由两部分组成,一部分是第 $n-2$ 次循环的信号输出光经第 $n-1$ 次循环放大之后而得到,另一部分为第 $n-1$ 次循环过程中产生的 ASE 光,两部分叠加作为第 n 次循环的信号输入;在每步循环中,根据新产生的激光功率谱计算相应的 SAG 纵模反射谱。

在每次循环尾部,逐个波束比较本次循环与上

一次循环得到的输出功率,当各波束输出功率变化量的最大值小于给定的收敛判据时,循环结束。

2.3 稳态 SAG 模型

稳态 SAG 模型用于求解上一节每一轮循环中所需的 $F_n(\nu)$ 。在每一轮循环中,注入 SAG 的光场功率谱都将发生变化;由于 SAG 的参数受信号光功率控制,则 SAG 的滤波特性也随之变化。当注入光场边模的功率远小于主模功率时,沿着 SAG 分布的边模信号与主信号之间的相互作用可由如下的耦合非线性微分方程描述。已有的报道表明,该模型结果在波形上与实验结果吻合较好^[8,17,20,25]。

$$\frac{d\bar{E}_m^\pm}{d\bar{z}} = \mp \frac{\alpha_0 l}{2\sqrt{B^2 - 4|A|^2}} \left[\bar{E}_m^\pm - \frac{B - \sqrt{B^2 - 4|A|^2}}{2} \frac{\bar{E}_m^\pm}{|\bar{E}_m^\pm|^2} \right], \quad (4)$$

$$\frac{d\bar{E}_p^\pm}{d\bar{z}} = \mp \frac{\alpha_0 l}{2\sqrt{B^2 - 4|A|^2}} \left[\bar{E}_p^\pm - \frac{B - \sqrt{B^2 - 4|A|^2}}{2|A|^2} A\bar{E}_p^\mp \right], \quad (5)$$

$$A = \bar{E}_m^+ \bar{E}_m^{* -} \exp(-i2\Delta k \bar{z} l), \quad (6)$$

$$B = 1 + [|\bar{E}_m^+|^2 + |\bar{E}_m^-|^2], \quad (7)$$

式中下标 m 和 p 分别表示主信号和边模信号;正号和负号分别代表前向和后向传输; $\bar{E}_{p,m}$ 为归一化光场振幅,它与光场振幅 $E_{p,m}$ 之间的关系为 $\bar{E}_{p,m} = \sqrt{\frac{\pi a_{up}^2}{P_{p,m}^{up,sat}}} E_{p,m}$, $E_{p,m} = \sqrt{P_k^s}$; \bar{z} 为归一化纵向坐标, $\bar{z} = z/l$, $0 \leq \bar{z} \leq l$; α_0 , a_{up} , $P_{p,m}^{up,sat}$ 分别为未抽运掺铒光纤的小信号吸收系数,有效模场半径以及饱和功率; Δk 是主信号与探测信号之间的波数差,其值为 $\Delta k = \frac{2\pi n}{c}(\nu_p - \nu_m)$, n 为掺铒光纤折射率, $\nu_{p,m}$ 为光场频率。

在(5)式右边的两项中,第一项代表每一频率探测信号各自经历的吸收,第二项与两个相向传输的信号之间通过 SAG 的交叉耦合有关。从(4)式中可知,主信号光仅与相向传输的同频光发生双波混频(TWM)作用,而不受微弱边频光影响;而每对相向传输的边频光与主信号光通过参数 A 与 B 发生相互耦合,而忽略了不同边频光间的作用。这一模型表达了掺铒光纤中的四波混频(FWM)过程。

使用松弛迭代法以及四阶龙格-库塔法求解上述非线性耦合常微分方程即可得到反向传输光的输出,由此可计算得到不同模式的反射谱

$$F_n^*(\nu_i) = \left| \frac{\bar{E}_i^-(\bar{z}=0)}{\bar{E}_i^+(\bar{z}=0)} \right|^2, \quad i = m, p. \quad (8)$$

根据已有报道,计算得到的 SAG 反射谱与实测结果在波形上吻合,但在幅度上存在差别。以对数坐标表达的相对边模抑制比实测值是理论值的 $\frac{1}{5}$ ^[18]。为此引入修正因子 u_1 ,则得到修正后反射谱

$$\tilde{F}_n(\nu_i) = F_n^*(\nu_m) [F_n^*(\nu_i)/F_n^*(\nu_m)]^{u_1}. \quad (9)$$

需注意的是,本模型得到的 SAG 纵模反射谱是稳态值,因此模型循环过程并非真实的激光起振过程,而仅是求解算法。由于达到稳态值需要一段响应时间,当激光功率发生变化时,腔内单次循环时间内 SAG 并不会即时达到稳态,这可能导致求解算法出现振荡而无法收敛。采用松弛迭代思想并引入松弛因子 u_2 ,每次循环中的纵模反射谱 $F_n(\nu_i)$ 并不直接等于上式的结果,而是

$$F_n(\nu_i) = (1 - u_2)\tilde{F}_{n-1}(\nu_i) + u_2\tilde{F}_n(\nu_i). \quad (10)$$

3 仿真结果

3.1 平坦边模损耗谱及模型求解过程

如前所述,被动腔内有效的 SAG 反射谱由环形腔的纵模结构对自由 SAG 反射谱进行频域采样而得到,并定义采样后的反射谱为纵模反射谱(LMRS)。在之前的研究中,发现当 UPEDF 长度 $l \approx 1/3L_i$ (L_i 为腔内光纤长度)时,可获得平坦的边模损耗谱^[20]。在本模型中,为满足这一要求,设 EDF 长度 L 为 4 m, UPEDF 长度 l 为 2.88 m,腔内

其余光纤长度 L_c 为 2 m, 则有 $l \approx 0.324(l + L + L_c)$, 计算得到纵模间隔约为 17.58 MHz。输出耦合器置于环形器之前, 输出比例为 60%, 抽运功率为 75 mW, 模型中其余参数如表 1 所示。将这一关系代入模型求解, 得到输出激光功率谱与 SAG 纵模反射谱随循环次数的演化关系如图 2 所示。

图 2 给出了在循环求解时激光输出光谱以及 SAG 纵模反射谱随循环次数的变化关系。需要注意的是这并非激光器的真实起振过程, 而仅是求解过程。然而, 模型仍然包含了从频谱平坦的自发辐射起振, 通过自组织在优选纵模上逐步建立受激辐射的演化过程。伴随着激光起振过程, SAG 从无到有, 逐步强化。虽然 SAG 主模反射率与边模反射率都随着激光功率的增加而增加, 但优势模式反射率

增加速率快于边模反射率增加速率, 达到稳态时 SAG 具有一定的边模抑制比。同时, 在满足特定的腔长关系后, 在腔内可实现平坦的 SAG 纵模反射谱, 而激光输出谱的边模功率也达到平坦。

表 1 仿真参数表

Table 1 Parameters of simulation

| Parameter | Value | Parameter | Value |
|--------------------------------|----------------------|---------------------------------------|--------|
| $\alpha_j / (\text{dB/m})$ | 12.0 | L / m | 4 |
| $\alpha_{k,l} / \text{m}^{-3}$ | 5.7 | $g_{k,l}^* / \text{m}^{-3}$ | 5.1 |
| $b_{\text{eff}} / \mu\text{m}$ | 2.2 | λ_0 / nm | 1530 |
| τ / ms | 10 | α / dB | 6 |
| $\bar{n}_t / \text{m}^{-3}$ | 1.5×10^{25} | $P_{p,m}^{\text{up,sat}} / \text{mW}$ | 0.1465 |
| α_0 / m^{-3} | 1.27 | $a_{\text{up}} / \mu\text{m}$ | 1.52 |
| u_1 | 1/5 | u_2 | 0.5 |

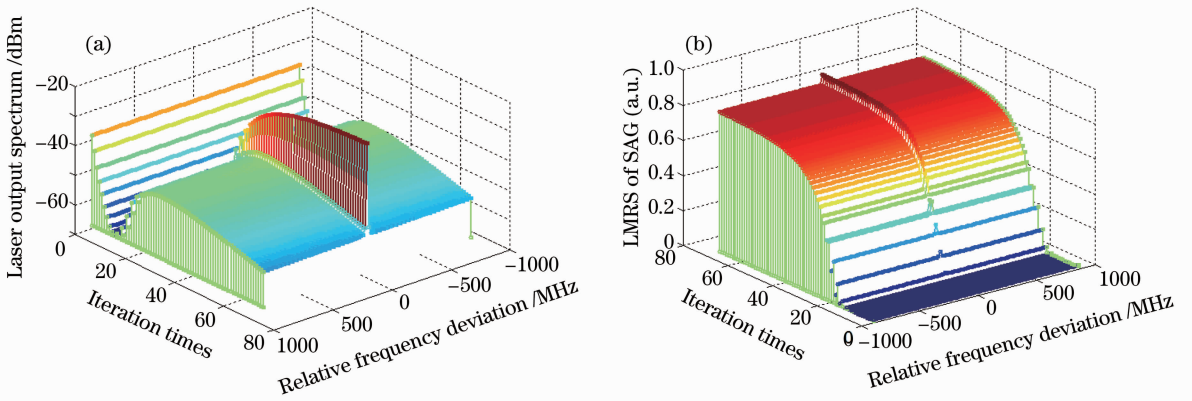


图 2 模型数值求解过程。(a) 激光输出光谱随时间演化; (b) SAG 纵模反射谱随时间演化

Fig. 2 Numerically solving process. (a) Development of the output power spectrum against circulation times;

(b) development of LMRS of the SAG against circulation times

在不外界扰动的情况下, 本模型总可以得到边模平坦的单纵模解, 因此激光输出功率谱的求解仅具备原理验证上的意义。然而, 相较于以往的 SAG 模型, 提出的模型考虑到了腔内的增益介质以及腔反馈导致的增益饱和效应, 因此可以获得由激光腔结构以及抽运参数决定的 SAG 反射谱特性, 这是目前的实验手段以及以往的模型都难以获得的信息。因此在下面的分析中, 将更加关注 SAG 反射谱特性, 如中心频率反射率 (RCF) 和纵模边模抑制比 (LM-SMSR) 的变化规律。

3.2 不同结构下 SAG 纵模反射谱特性

将饱和吸收体插入到激光器驻波段形成自组织激光腔, 在实现上有不同的设计结构。对环形激光器来说, 既可通过环形器来将光场注入饱和吸收体 (σ 结构), 也可结合定向耦合器与隔离器实现。对于本文所用的 σ 环形腔结构, 输出耦合器可置于 SAG 之前与之后。不同的结构及参数下腔内的激

光功率存在较大差别, 而 SAG 的 RCF 以及 LM-SMSR 受主信号功率的影响, 因此, SAG 的反射谱特性由腔结构及抽运参数决定。特别是 SAG 的 LM-SMSR 影响着激光器的抗扰动能力, 对这一问题进行分析非常必要。由于激光器的自组织特性, 特定腔结构下注入 SAG 光功率与抽运功率的关系不能简单得到, 腔内 SAG 特性难以测量, 目前多通过实验手段进行多次试验来获取优化的结构及参数, 成本巨大, 耗时较长。与实验手段相比, 本模型可全参数空间计算各结构参数与 SAG 反射谱关系, 提高设计效率, 降低优化成本。下面以目前文献报道中常见的 σ 结构及其参数范围进行分析。

3.2.1 输出耦合器置于 SAG 之前

将模型输出耦合器置于 SAG 之前, 即 SAG 注入光场设为 $E_{p,m} = \sqrt{(1 - R_o)P_k}$, 设抽运功率为 75 mW, 计算不同输出系数下的激光输出, 如图 3 所示。

图 3(a)为注入 SAG 处激光功率谱,各个模式功率均归一化到饱和吸收体的饱和功率。可见,随着输

出比例的提高,SAG 注入光功率减小。这虽然降低了 SAG 的 RCF,但也提高了 SAG 的 LM-SMSR。

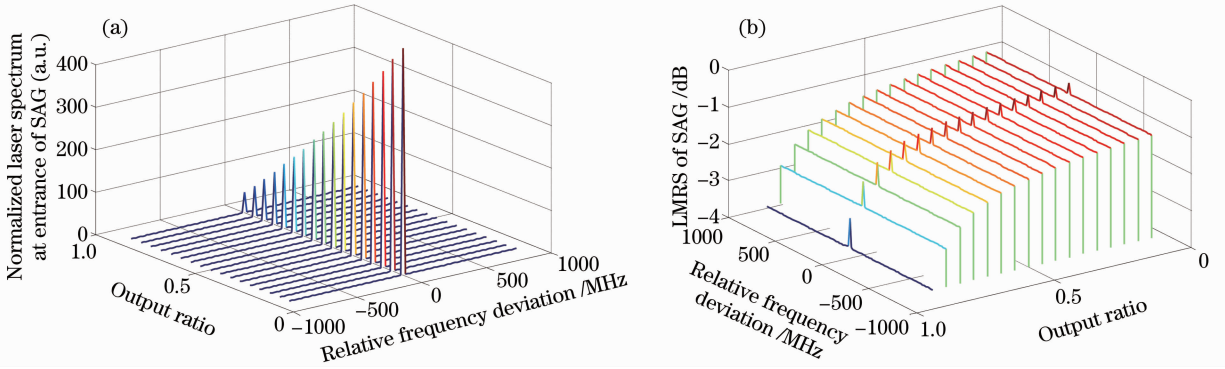


图 3 抽运功率为 75 mW 时不同输出比例下的求解结果。(a)注入 SAG 处激光归一化功率谱随输出比例变化；(b) SAG 纵模反射谱随输出比例变化(前置式结构)

Fig. 3 Results of the model at variant output ratios with pump power of 75 mW. (a) Normalized laser spectrum at the entrance of the SAG against output ratio; (b) LMRS of the SAG against output ratio (prepositive structure)

图 4 给出了 SAG 特性随抽运功率与输出比例的变化规律。由图 4(a),(b)可知,RCF 在输出比例达到 0.8 之前缓慢下降,而在达到 0.8 之后迅速下降;LM-SMSR 变化规律与之相反,随输出比例增加而增加,且在大输出比例情况下的增长速率较小输出比例情况下要快。因此,在保证激光功率的情况下,为提高激光器的稳定性,应当尽可能地增大输出

比例系数。由图 4(c),(d)可知,SAG 反射率随抽运功率增加而增加,而 LM-SMSR 随抽运功率增加而降低。可见,低抽运功率有助于提高激光器的稳定性。对常用的抽运功率范围,合适的输出耦合比例取值范围在 60%~80%之间。

3.2.2 输出耦合器置于 SAG 之后

将输出耦合置于 SAG 之后,即将模型中 SAG

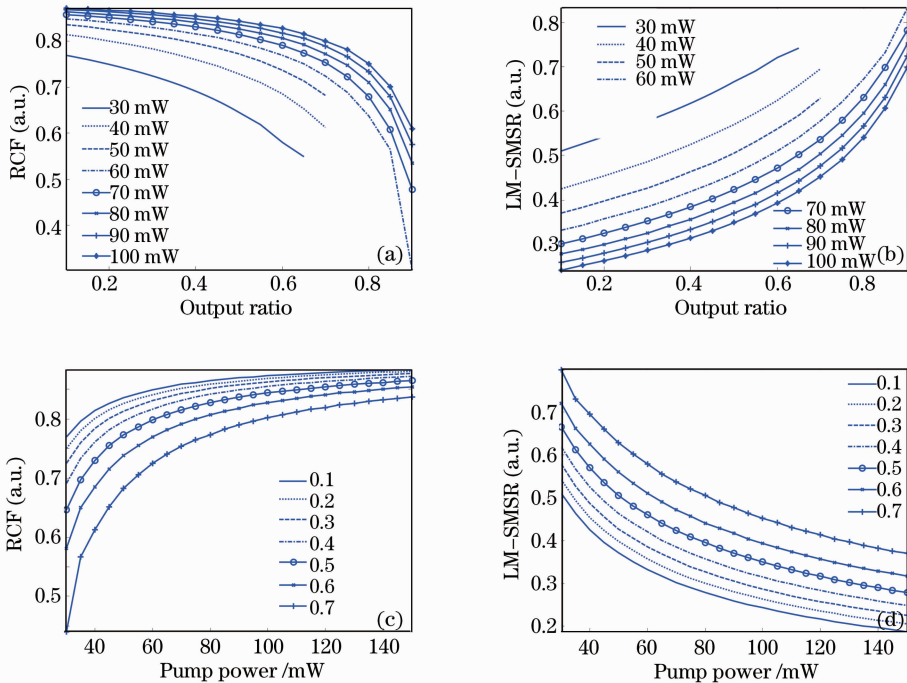


图 4 (a) RCF 随输出的比例变化; (b) LM-SMSR 随输出比例变化; (c)RCF 随抽运功率变化; (d) LM-SMSR 随抽运功率变化(前置式结构)

Fig. 4 (a) RCF versus output ratio; (b) LM-SMSR versus output ratio; (c) RCF versus pump power; (d) LM-SMSR versus pump power(prepositive structure)

注入光场设为 $E_{p,m} = \sqrt{P_i}$, 设抽运功率为 75 mW, 计算不同输出系数下的激光输出, 如图 5 所示。由图 5(a) 的注入 SAG 处激光功率演化规律可知, SAG 注入光功率随输出比例提高变化不大, 功率略

有降低, 同时腔内激光功率均处于较高水平。高的主模功率使得 LM-SMSR 较低, 且在整個仿真范围内变化不大。

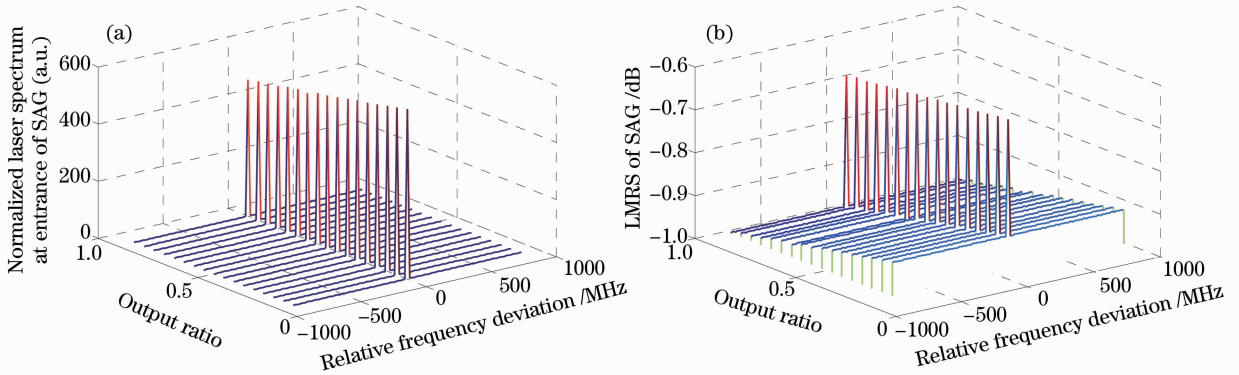


图 5 抽运功率为 75 mW 时不同输出比例下的求解结果。(a) 注入 SAG 处激光归一化功率谱随输出比例变化; (b) SAG 纵模反射谱随输出比例变化(后置式结构)

Fig. 5 Results of the model at variant output ratios with pump power of 75 mW. (a) Normalized laser spectrum at the entrance of SAG against output ratio; (b) LMRS of the SAG against output ratio (postpositive structure)

图 6 给出了 SAG 特性随抽运功率与输出比例的变化规律。在输出耦合置于 SAG 之后的结构中, RCF 以及 LM-SMSR 随输出比例增加变化均不大, 整体曲线变化平缓, RCF 变化小于 0.02, 而 LM-SMSR 变化幅度小于 0.05 dB, 如图 6(a), (b) 所示。

但二者均受抽运功率的强烈影响, 由图 6 (c), (d) 可知, 在抽运功率小于 60 mW 时, RCF 随抽运功率增加迅速增长, 而 SMSR 随抽运功率增加而迅速降低; 在抽运功率大于 60 mW 时, RCF 与 SMSR 随抽运功率增加变化趋缓。在这种结构下, 要提高激

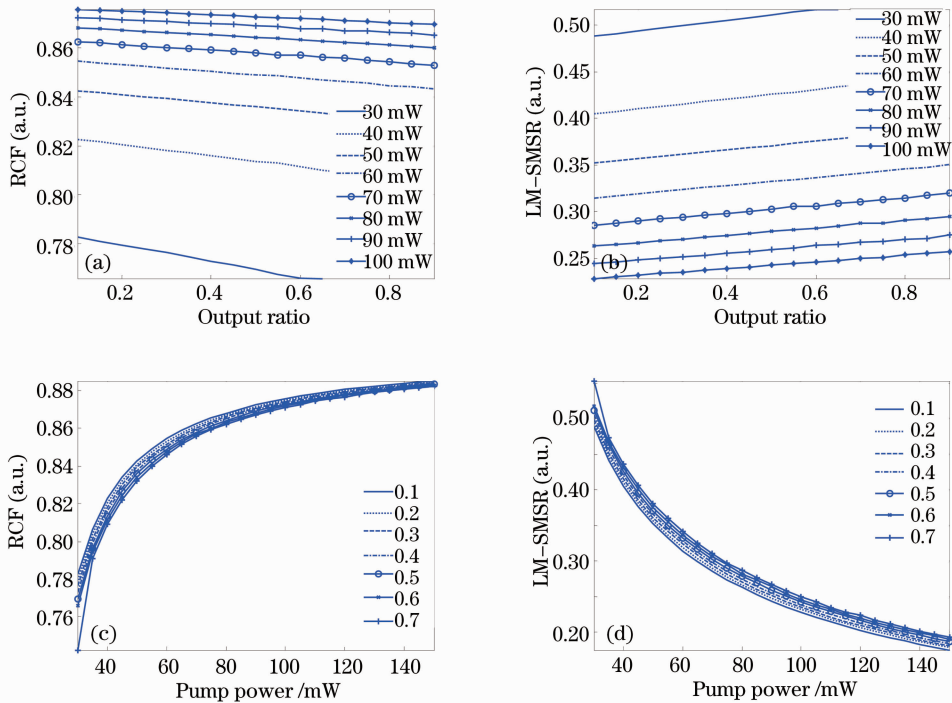


图 6 (a) RCF 随输出比例变化; (b) LM-SMSR 随输出比例变化; (c) RCF 随抽运功率变化; (d) LM-SMSR 随抽运功率变化(后置式结构)

Fig. 6 (a) RCF versus output ratio; (b) LM-SMSR versus output ratio; (c) RCF versus pump power; (d) LM-SMSR versus pump power(postpositive structure)

光稳定性,输出比例应尽量大,而抽运功率应当尽量小。另一方面,与图 5(d)结果相比,图 6(d)整体接近于小输出比例下的结果,即接近于其最小 SMSR。这意味着输出耦合置于 SAG 之前较之置于 SAG 之后可实现高得多的 SMSR。

3.2.3 腔长偏离平坦边模条件

以上分析结果均在腔长满足平坦边模条件下得到,但在实际中,受光纤器件尾纤长度及熔接工艺等因素限制,腔长难以做到严格匹配。下面对腔长偏离平坦边模条件的情况进行分析。求解中抽运功率设为 60 mW,输出比例设为 60%。图 7(a)给出了增益光纤长度以及 SAG 长度均固定,但整体腔长偏离平坦边模条件时的 SAG 纵模反射谱的变化规律。由图 7(a)可知,当满足平坦边模条件时,各个边模反射率几乎一致;随着腔长偏离这一条件,纵模非等

周期采样的结果导致主模附近的边模采到 SAG 自由反射谱的次级大,使得 LM-SMSR 降低。图 7(b)给出了不同偏移比例与方向下 RCF 与 LM-SMSR 的变化规律,可见 RCF 不受腔长偏离的影响,但 LM-SMSR 随着偏离增加而减小。负偏离时二阶边模反射率增大,一阶边模反射率减小,腔长偏离 -15% 时,LM-SMSR 降低了 0.067 dB;正偏离时一阶边模反射率增大,二阶边模反射率减小,腔长偏离 +15% 时,LM-SMSR 降低了 0.086 dB。在实践中,腔长精度可控制在厘米量级,相对于 10 m 量级的腔长,偏离可控制在 0.1%,因此这一程度的偏离对 LM-SMSR 的恶化并不敏感,只有偏移量达到 1%,即 10 cm 量级时,LM-SMSR 才有较明显的变化。因此边模平坦的条件较易达到,而本文基于这一条件进行的分析是合理的。

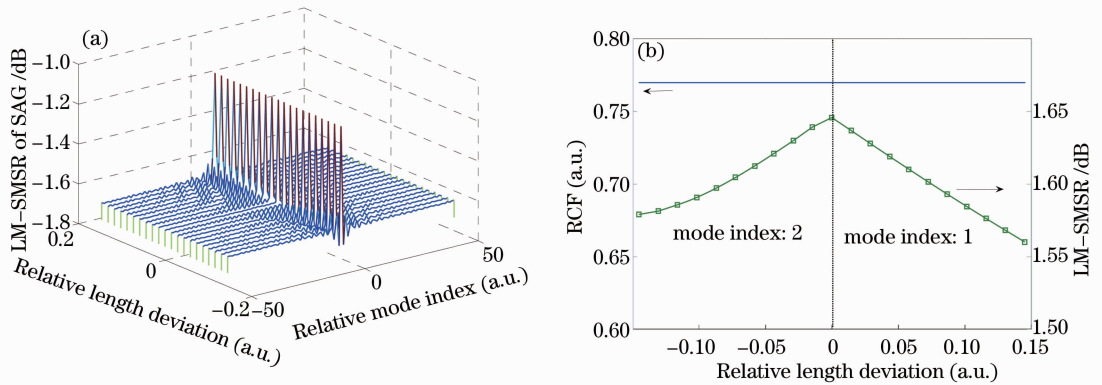


图 7 腔长偏离平坦边模条件对 SAG 纵模反射谱的影响。(a)不同偏移长度时 SAG 纵模反射谱; (b) RCF 与 LM-SMSR 随相对长度偏移关系

Fig. 7 Influence of the cavity length deviation from the flat side mode condition on the LMRS of the SAG. (a) LMRS versus relative length deviation; (b) RCF and LM-SMSR versus relative length deviation

4 实验与讨论

目前,虽然自由运转以及被动腔内的 SAG 特性可以采用四波混频结构或双波混频结构得到测量,但尚无测量主动腔内的 SAG 特性的报道。基于“抽运-探测”结构的原理,需要一束额外探测光注入 SAG 以获取谱信息,这一探测光与 SAG 中心波长差别在兆赫兹量级,幅度约小于主信号光 20 dB,对激光器而言相当于外光注入。根据激光动力学理论,这将改变激光运行状态,发生注入锁定以及混沌^[26],在存在腔长漂移是还可能发生爆发动态现象^[27]。在这种情况下,SAG 中心频率或者锁定到注入光,或者被完全破坏,无法完成测量。

由于腔结构参数以及抽运参数决定了 SAG 性

能,也就决定了激光器的稳定性,因此可通过激光稳定性测量及分析来间接验证理论分析的合理性。在理想模型中,只要 SAG 具有一定的边模抑制比即可得到单纵模解;但在实际制造的激光器中往往存在一些缺陷,例如由于有限的隔离度以及总是存在器件回波损耗,环形腔中有可能形成附加的反馈回路,构成弱复合腔。对起振模式而言,当子腔与主腔相位关系失配而 SAG 的 LM-SMSR 降到足够低时,当前模式将无法保持。已发现对特定结构的 SOLC,在高抽运功率下腔长的慢漂会触发非随机跳模。通过测量特定结构的稳定性地图,可比较出 SAG 性能的差别。

分别测量了两种结构激光器的稳定性地图,这两种结构中,输出耦合器分别位于 SAG 之前与之后,输

出比例分别为 60% 与 40%，中心波长为 1552 nm，其余参数与表 1 一致，测量结果如图 8 所示。具体测量方法请见文献[29]。当腔结构及参数确定后，激光稳定性仅由抽运功率与腔长共同决定，因此稳定性地图表现为不同抽运功率时，在同一腔长慢调信号下激光器的输出状态变化。图中单个彩色点代表一次跳模事件，而连片的亮点区域表示多次跳模或多纵模状态。图 8(a) 中，抽运参数增加时，激光器从无跳模区依次进入单次跳模区、多次跳模区以及多纵模区，抽运上升与下降时跳模阈值分别为 1.93 倍与 1.59 倍阈值功率。在多纵模区，单纵模状态完全消失，SOLC 被破坏，这正是当抽运功率增加时 SAG 的 LM-SMSR 按照图 6(d) 的规律快速下降而

导致的。当改变激光器结构，将输出耦合置于 SAG 之前，且输出比例增加到 60% 时，测得的稳定性地图如图 8(b) 所示。由图 8 可知，在同样的抽运功率范围内，跳模阈值大幅提升，抽运上升区和下降区阈值均为 3.86 倍阈值功率。在全控制参数空间，均只出现单次跳模区，而没有多纵模出现。这一结果可通过对比图 5(d) 与图 6(d) 得到解释。对后一种结构，在抽运功率增长时 LM-SMSR 从 0.72 降为 0.32；对前一种结构，图 6(d) 中 LM-SMSR 从 0.5 降为 0.2，如图 9 所示。正是由于输出耦合前置时较高的 LM-SMSR，使得该结构具备良好的抗腔长慢漂能力，表现出较高的跳模阈值与较少的跳模概率。

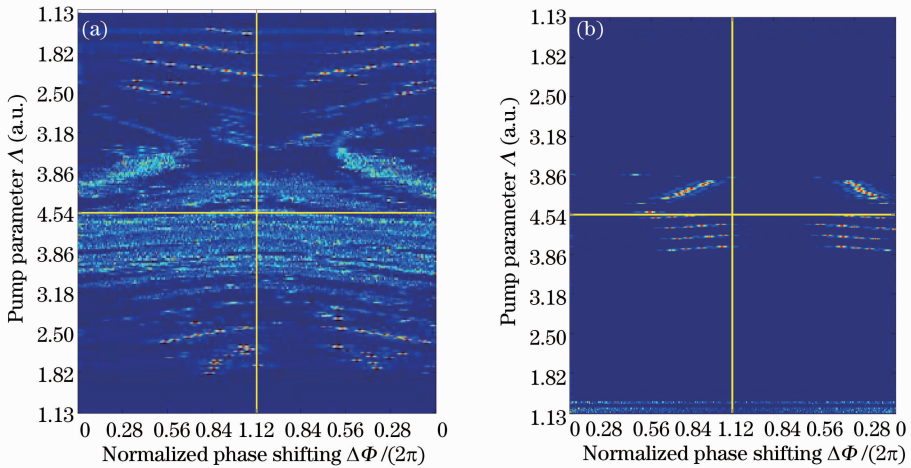


图 8 两种结构激光器的抽运功率与腔长双参数稳定性地图。(a)输出耦合位于 SAG 之后；(b)输出耦合位于 SAG 之前
Fig. 8 Dual-parameter stability maps of two lasers with different structures. (a) Output coupler located after the SAG;

(b) output coupler located before the SAG

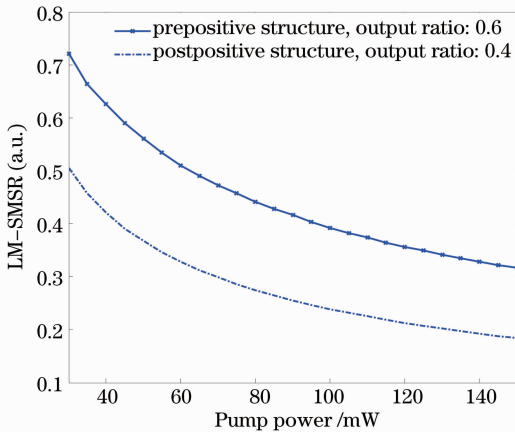


图 9 两种结构激光器中 SAG 的 LM-SMSR

Fig. 9 LM-SMSR of SAGs in two structures of lasers

5 结 论

对全光纤 SOLC 稳态模型的数值分析及稳定

性地图的实验测量结果表明，稳定的单纵模以及抑制腔长慢漂能力主要由 SAG 的 LM-SMSR 决定。根据仿真与实验结果，高的 LM-SMSR 可由输出耦合前置式结构实现，并且需要尽可能高的输出耦合比和低的抽运功率。然而，这仅是提高激光器抗慢漂能力单一要求下的结果。在实际应用中，至少还有两个方面限制输出比例及抽运功率的选取。首先，在应用中需要激光器具备一定的输出功率以抗衡探测运行中的光损耗；其次，在相干探测中需要激光器具备良好的相位噪声性能，而高的腔内功率有助于降低激光器的噪声水平，提高应用系统的探测灵敏度。高的注入功率还有助于降低瞬态反射谱的边模抑制比，从而降低在腔长快速突变时主模经历的损耗变化，提高抗抖动能力^[30]。而本文的结果表明高的注入功率将降低稳态 LM-SMSR，使单纵模无法保持，抗腔长慢漂能力下降，显然，同时满足这

二者在实践上是矛盾的。因此,在设计时需优先保证激光器的单纵模状态,使 SAG 保持一定的 LM-SMSR,以保证激光器具有可靠的抗腔长慢漂能力,整体工作在无跳模区;在此基础上提高激光功率,降低相位噪声,在一定程度上使激光器具备抗快速抖动能力。事实上,激光器的抗抖动性能可通过良好的封装结构设计得到提高,这可降低对激光器本身设计的要求。提出的模型可为这一优化设计过程提供一定的参考。

参 考 文 献

- G. Pauliat, N. Dubreuil, G. Roosen. Self-Organizing Laser Cavities[M]. New York: Springer, 2007. 115, 253~275
- V. Reboud, N. Dubreuil, P. Fournet *et al.*. Self-induced transverse mode selection in a photorefractive extended cavity laser diode[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7): 2735~2743
- Z. Zhang, J. Lim, N. Dubreuil *et al.*. Numerical modeling of photorefractive crystals for self-adapting external cavity laser mirrors[J]. *Opt. Quantum Electron.*, 2009, **41**(9): 681~688
- A. Godard, G. Pauliat, G. Roosen *et al.*. Relaxation of the single-mode emission conditions in extended-cavity semiconductor lasers with a self-organizing photorefractive filter [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(17): 3543~3547
- Y. Cheng, J. T. Kringlebotn, W. H. Loh *et al.*. Stable single-frequency traveling-wave fiber loop laser with integral saturable-absorber-based tracking narrow-band filter[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(8): 875~877
- Z. Meng, G. Stewart, G. Whitenett. Stable single-mode operation of a narrow-linewidth, linearly polarized, erbium-fiber ring laser using a saturable absorber [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(5): 2179~2183
- K. Zhang, J. U. Kang. C-band wavelength-swept single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(18): 14173~14179
- M. S. Kang, M. S. Lee, J. C. Yong *et al.*. Characterization of wavelength-tunable single-frequency fiber laser employing acoustooptic tunable filter[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(4): 1812~1823
- J. Liu, J. Yao, J. Yao *et al.*. Single-longitudinal-mode multiwavelength fiber ring laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(4): 1020~1022
- N. J. C. Libatique, L. Wang, R. K. Jain. Single-longitudinal-mode tunable WDM-channel-selectable fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(25): 1503~1507
- Y. W. Song, S. A. Havstad, D. Starodubov *et al.*. 40-nm-wide tunable fiber ring laser with single-mode operation using a highly stretchable FBG [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(11): 1167~1169
- C. H. Yeh, C. T. Chen, C. N. Lee *et al.*. Using ring-filter and saturable-absorber-based filter for stable erbium fiber laser[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2007, **4**(7): 543~545
- Liang Xun, Yao Qiong, Hu Yongming *et al.*. Real-time mode hopping detection on narrow line-width laser source based on unbalanced fiber interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 437~442
梁 迅,姚 琼,胡永明等.基于非平衡光纤干涉仪的窄线宽激光器光源跳模实时测试方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 437~442
- Ma Mingxiang, Yang Huayong, Xu Pan *et al.*. Investigation on characteristics of mode hopping in ultra-narrow linewidth erbium-doped fiber ring laser under pump modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0314002
马明祥,杨华勇,徐攀等.抽运调制条件下超窄线宽掺铒光纤环形激光器的跳模特性研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(3): 0314002
- Ma Mingxiang, Hu Zhengliang, Xu Pan *et al.*. Mode hopping detection for fiber laser based on dynamic phase changes in interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(6): 0602013
马明祥,胡正良,徐攀等.基于干涉仪动态相移的光纤激光器跳模检测方法[J]. *中国激光*, 2012, **39**(6): 0602013
- B. Fischer, J. L. Zyskind, J. W. Sulhoff *et al.*. Nonlinear wave mixing and induced gratings in erbium-doped fiber amplifiers[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(24): 2108~2110
- M. Horowitz, R. Daisy, B. Fischer *et al.*. Linewidth-narrowing mechanism in lasers by nonlinear wave mixing[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(18): 1406~1408
- M. D. Feuer. Length and power dependence of self-adjusting optical fiber filters[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(11): 1587~1589
- S. A. Havstad, B. Fischer, A. E. Willner *et al.*. Loop-mirror filters based on saturable-gain or -absorber gratings[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(21): 1466~1468
- Xu Pan, Hu Zhengliang, Ma Mingxiang *et al.*. Numerical simulation and characteristics analysis of the saturable absorber grating in the fiber ring cavity resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(8): 0814001
徐攀,胡正良,马明祥等.光纤环形谐振腔中饱和吸收体光栅的数值模拟和特性分析[J]. *光学学报*, 2012, **32**(8): 0814001
- C. R. Giles, E. Desurvire. Modeling erbium-doped fiber amplifiers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(2): 271~283
- A. Cucinotta, S. Dallargine, S. Selleri *et al.*. Modeling of erbium doped fiber ring laser [J]. *Opt. Commun.*, 1997, **141**: 21~24
- S. Selvakennedy, M. A. Mahdi, M. K. Abdullah *et al.*. Design optimisation of erbium-doped fibre ring laser through numerical simulation[J]. *Opt. Commun.*, 1999, **170**: 247~253
- Xu Pan, Hu Zhengliang, Ma Lina *et al.*. Modeling of dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser and simulation of mode competition[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s1): 74~78
徐攀,胡正良,马丽娜等.双波长环形腔掺铒光纤激光器建模及模式竞争的仿真[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s1): 74~78
- H. S. Kim, S. K. Kim, B. Y. Kim. Longitudinal mode control in few-mode erbium-doped fiber lasers[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(15): 1144~1146
- Zhang Hongjun. Optical Chaos [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Education Publishing House, 1997
张洪钧. *光学混沌*[M]. 上海:上海科技教育出版社, 1997
- D. J. Deshazer, J. Garcia-Ojalvo, R. Roy. Bursting dynamics of a fiber laser with an injected signal[J]. *Phys. Rev. E*, 2003, **67**(3): 036602
- P. Xu, Z. Hu, M. Ma *et al.*. Nonrandom mode hopping triggered by weak inner-cavity feedback in self-organizing cavity erbium-doped fiber ring lasers[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2012, submitted
- P. Xu, Z. Hu, M. Ma *et al.*. Mapping the optical frequency stability of the single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring lasers with saturable absorber[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2012, accepted
- P. Xu, Z. Hu, N. Jiang *et al.*. Transient reflectance spectra of adaptive filters based on dynamic population gratings[J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(11): 1992~1994