

# 光纤激光仿真软件 See Fiber Laser 与 光纤激光工具集 SFTool

王小林<sup>1</sup>, 吕 品<sup>2</sup>, 张汉伟<sup>1</sup>, 谭姝丹<sup>2</sup>, 肖 虎<sup>1</sup>, 段 磊<sup>2</sup>, 宋云波<sup>2</sup>, 陶汝茂<sup>1</sup>,  
史 尘<sup>1</sup>, 周宇峰<sup>3</sup>, 马鹏飞<sup>1</sup>, 栗荣涛<sup>1</sup>, 周 朴<sup>1</sup>, 许晓军<sup>1\*</sup>, 徐帆江<sup>2</sup>

<sup>1</sup>国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

<sup>2</sup>中国科学院软件研究所, 北京 100190;

<sup>3</sup>广州中国科学院软件应用技术研究所, 广东 广州 511458

**摘要** 为了实现一款全国产、界面友好、使用简单、能够指导科研和产业设计的光纤激光仿真软件,进行了光纤激光仿真软件的开发研究。在光纤激光理论研究的基础上,初步开发了能够对高功率掺镱光纤激光器进行仿真的软件 See Fiber Laser 和能够对光纤激光器相关参数进行计算的光纤激光工具集 SFTool。介绍了两款软件的部分理论模型、基本功能和简单算例,该研究有望降低光纤激光器的研究和设计难度。

**关键词** 光纤光学; 仿真软件; 工具集; 受激拉曼散射; 光束质量; 模式不稳定

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0506002

## Fiber Laser Simulation Software See Fiber Laser and Fiber Laser Tool Collection SFTool

Wang Xiaolin<sup>1</sup>, Lü Pin<sup>2</sup>, Zhang Hanwei<sup>1</sup>, Tan Shudan<sup>2</sup>, Xiao Hu<sup>1</sup>,  
Duan Lei<sup>2</sup>, Song Yunbo<sup>2</sup>, Tao Rumao<sup>1</sup>, Shi Chen<sup>1</sup>, Zhou Yufeng<sup>3</sup>, Ma Pengfei<sup>1</sup>,  
Su Rongtao<sup>1</sup>, Zhou Pu<sup>1</sup>, Xu Xiaojun<sup>1</sup>, Xu Fanjiang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China;

<sup>2</sup>Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

<sup>3</sup>Institute of Software Application Technology, Guangzhou & Chinese Academy of Sciences,  
Guangzhou, Guangdong 511458, China

**Abstract** In order to develop a fiber laser simulation software, which is domestic, interface friendly, easy to use, and instructive in research and industry design, the development and the research for fiber laser simulation software are carried out. Based on the theory study about fiber laser, we develop a software named See Fiber Laser which can be used to the simulation of Yb<sup>3+</sup> doped high power fiber laser, and a fiber laser tool collection named SFTool which can be used to calculate the related parameters in fiber laser is developed. Some parts of theory models, basic function and sample calculate examples of the software are introduced. The study may make the research and the design of fiber laser easier.

**Key words** fiber optics; simulation software; tool collection; simulated Raman scattering; beam quality; mode instability

**OCIS codes** 140.3280; 140.3290; 140.3510

收稿日期: 2017-01-16; 收到修改稿日期: 2017-02-11

基金项目: 科技部重点研发计划(2016YFB0402204)、国家自然科学基金(61505260)

作者简介: 王小林(1985—),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事光纤激光器及相干合成方面的研究。

E-mail: chinaphotonics@163.com

\* 通信联系人。E-mail: xu\_xiaojun@126.com

# 1 引 言

光纤激光器具有体积小、重量轻、效率高、光束质量好、性能稳定、维护简单等优点<sup>[1]</sup>,可用于多种材料的快速高效打标、切割、焊接、熔覆及清洗,在飞机、汽车、船舶、矿山机械等先进制造领域得到了广泛应用<sup>[1-4]</sup>。得益于大模场双包层增益光纤制作工艺和高亮度抽运源技术的发展,自1999年掺镱光纤激光功率突破100 W以来,光纤激光输出功率得到了迅速提升<sup>[2-3]</sup>。2009年,美国IPG光子技术公司实现了功率为10 kW单模光纤激光输出<sup>[5]</sup>,4年之后,IPG光子技术公司将激光输出功率提升至20 kW<sup>[2]</sup>。目前,国内外有许多高校<sup>[6-8]</sup>、研究所<sup>[9-10]</sup>、企业<sup>[1,11-12]</sup>对光纤激光开展了理论和实验研究;但是,在理论研究方面,各研究单位主要采用自行编写的程序代码进行研究,一般只能覆盖所研究的特定领域。如果有一款界面友好、理论模型相对完善、计算效率高、能够指导实际科研和产业激光器设计的光纤激光仿真软件,可以在一定程度上提高科学研究和工业设计的效率。

目前,能够用于高功率光纤激光器仿真的软件主要有美国恩耐公司的Liekki Application Designer (LAD)、德国RP Photonics公司的RP-Fiber Power和美国VPI Photonics公司的Optical Amplifiers。美国恩耐公司旗下的光纤生产商LIEKKI公司在世界上最早研发了基于图形化界面的光纤激光仿真软件LAD。LAD将主要器件图形化、参数设置表格化,仿真时只需要将不同的器件放置于设计面板上,并通过光纤连接各个器件,便可构成可用的仿真对象。该软件不需要进行编程,使用方法简单,人机接口友好;但是自2008年LIEKKI被恩耐公司收购以后,暂时没有新的版本推出,难以满足高功率光纤激光快速发展的应用需求。德国RP Photonics公司的RP-Fiber Power是一款功能较为强大的高功率光纤激光仿真软件,能够用于连续、脉冲光纤激光器的仿真,能够计算光纤模式和光束传输,其丰富的光纤元器件库中包含了Liekki、Coactive、IXFiber和NKT公司的相关光纤,该软件可以根据计算结果进行简单作图,是目前市面上功能最为强大的高功率光纤激光仿真软件。但是,该软件界面不及LAD友好,需要在输入框或代码编辑器中输入设计系统类型和参数,对于理论基础较为薄弱的初学者,使用较为不便。美国VPI Photonics公司的Optical Amplifiers软件主要用于通信中的掺铒光纤放大器和掺镱共掺光纤放大器的设计和仿真,但是它主要应用于低功率通信应用激光器的仿真和设计,难以为当前工业产品中的高功率光纤激光器提供仿真服务。

综上所述,国际上能够用于工业市场高功率光纤激光仿真的仿真软件产品实际上只有两款。其中,LAD目前已经基本停止更新;RP-Fiber Power虽然会定期推出新的版本,但是界面不够友好,理论基础欠缺的初学者难以高效地应用该软件。因此,研究光纤激光器的建模仿真与辅助设计、整合光纤激光的基础和前沿理论以及开发一款界面友好且模型完善的光纤激光仿真软件,不仅能够推动光纤激光理论研究的发展,还能为产业公司提供高效便捷的设计手段,从而促进光纤激光器从实验室走向产业化应用。本课题组自2014年1月起便开始了对光纤激光仿真软件的开发研究,初步开发了能够对高功率掺镱光纤激光进行仿真的软件See Fiber Laser和能够对光纤激光器相关参数进行简单计算的光纤激光工具集软件SFTool。其中,See Fiber Laser主要是电脑(PC)版,SFTool目前初步推出了PC版和Android手机版。

## 2 光纤激光仿真软件 See Fiber Laser

### 2.1 See Fiber Laser 功能简介

See Fiber Laser是一款界面友好的仿真软件,不需要进行二次编程,只需要将各个光纤器件对应的模块拖拽到编辑窗口,并将各个模块按照一定的逻辑通过连线连接起来,然后设置各个器件的参数,完成参数设置后即可对激光器进行仿真。该软件通过模块拖拽的方式,实现了友好的界面,降低了用户掌握光纤激光器相关知识的要求;通过表格化的参数设置,可以避免普通仿真方法需要输入代码的繁琐,降低了使用难度。See Fiber Laser基于相干激光耦合波方程和非相干速率方程,可以对高功率掺镱连续光纤激光器和脉冲光纤激光器进行仿真。仿真中考虑放大自发辐射(ASE)、受激拉曼散射(SRS)、受激布里渊散射(SBS)、四波混频(FWM)等非线性效应;仿真结束后,可根据需要给出光纤激光功率、光谱、时域、温度等数据并进行作图,计算结果可以Matlab数据格式存储。

## 2.2 See Fiber Laser 部分理论模型简介

以光纤激光中最常见的两个非线性效应(SRS 和 SBS)的理论模型为例进行介绍。在光纤激光器中, SBS 和 SRS 同时存在的耦合方程包括<sup>[13-14]</sup>:描述抽运光随时间  $t$  和空间  $z$  的演变方程

$$\pm \frac{dP_p^\pm}{dz} + \frac{1}{v_{gp}} \frac{dP_p^\pm}{dt} = -\alpha_p P_p^\pm - \Gamma_p [\sigma_a^p N_0 - (\sigma_a^p + \sigma_e^p) N_2] P_p^\pm, \quad (1)$$

描述信号光随时间  $t$  和空间  $z$  的演变方程

$$\frac{\partial A_s}{\partial z} + \frac{1}{v_{gs}} \frac{\partial A_s}{\partial t} = -\frac{\alpha_s}{2} A_s + \frac{1}{2} [(\sigma_a^s + \sigma_e^s) N_2 - \sigma_a^s N] A_s + i\gamma_s (|A_s|^2 + 2 |A_B|^2) A_s + i\kappa_{1s} A_B Q, \quad (2)$$

描述 SBS 随时间  $t$  和空间  $z$  的演变方程

$$-\frac{\partial A_B}{\partial z} + \frac{1}{v_{gB}} \frac{\partial A_B}{\partial t} = -\frac{\alpha_s}{2} A_B + \frac{1}{2} [(\sigma_a^s + \sigma_e^s) N_2 - \sigma_a^s N] A_B + i\gamma_s (|A_B|^2 + 2 |A_s|^2) A_B + i\kappa_{1B} A_s Q^*, \quad (3)$$

描述 SRS 随时间  $t$  和空间  $z$  的演变方程

$$\frac{\partial A_R}{\partial z} + \frac{1}{v_{gR}} \frac{\partial A_R}{\partial t} = -\frac{\alpha_R}{2} A_R + i\gamma_R (1 - f_R) (|A_s|^2 + 2 |A_p|^2) A_s + R_s(z, t), \quad (4)$$

描述声波场随时间  $t$  和空间  $z$  的演变方程

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \nu_A \frac{\partial Q}{\partial z} = -\left[ \frac{1}{2} \Gamma_B + i(\Omega_B - \Omega) \right] Q + \frac{i\kappa_2}{A_{\text{eff},ao}} A_p A_s^* + f(z, t), \quad (5)$$

描述上能级粒子数随时间  $t$  和空间  $z$  的演变方程

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = -\frac{N_2}{\tau} + \frac{\Gamma_s \lambda_s}{hcA_c} [\sigma_a^s N_0 - (\sigma_a^s + \sigma_e^s) N_2] (P_s + P_B) + \frac{\Gamma_p \lambda_p}{hcA_c} [\sigma_a^p N_0 - (\sigma_a^p + \sigma_e^p) N_2] P_p, \quad (6)$$

式中上下标 p、s、B、R 分别表示抽运光、信号光、SBS 斯托克斯光和 SRS 斯托克斯光,  $P$  为功率,  $\alpha$  为光纤损耗系数,  $\Gamma$  为重叠因子,  $\sigma_a$  和  $\sigma_e$  分别为吸收和发射截面,  $A_p$ 、 $A_s$ 、 $A_B$ 、 $Q$  分别为抽运光、信号光、斯托克斯光和声波场的归一化振幅,  $A_s^*$ 、 $Q^*$  分别为信号光和声波场振幅的共轭,  $R_s(z, t)$  为拉曼信号在不同时刻  $t$  和不同光纤位置  $z$  的值,  $A_R$  为 SRS 斯托克斯光的归一化振幅,  $N$  为光纤掺杂浓度,  $N_2$  为上能级粒子数,  $v_{gp}$ 、 $v_{gs}$ 、 $v_{gB}$ 、 $v_{gR}$  分别为抽运光、信号光、SBS 斯托克斯光和 SRS 斯托克斯光的群速度,  $\gamma_s$  为信号光的非线性系数,  $\kappa_{1s}$ 、 $\kappa_{1B}$ 、 $\kappa_2$  为耦合系数,  $\nu_A$  为声速,  $\Gamma_B$  为声阻尼率,  $\Omega_B$  为声波频率,  $\Omega$  为可取频率值,  $A_{\text{eff},ao}$  为声光有效作用面积,  $f_R$  为延迟拉曼响应,  $h$  为普朗克常数,  $A_c$  为纤芯截面积,  $\tau$  为镱粒子上能级平均寿命。  $f(z, t)$  为自发引起 SBS 的热噪声源,  $f(z, t)$  满足关系式<sup>[15-16]</sup>

$$\langle f(z, t) \rangle = 0, \quad (7)$$

$$\langle f(z, t) f^*(z', t') \rangle = N_Q \delta(z - z') \delta(t - t'), \quad (8)$$

$$N_Q = \frac{2kT_0 \rho_0 \Gamma_B}{\nu_A^2 A_{\text{eff}}}, \quad (9)$$

式中  $f^*(z', t')$  为  $z$ 、 $t$  取特定值  $z'$ 、 $t'$  时  $f(z, t)$  的共轭,  $\delta(z - z')$ 、 $\delta(t - t')$  为狄拉克函数,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T_0$  为温度,  $\rho_0$  为光纤密度,  $A_{\text{eff}}$  为光纤有效模场面积。

## 2.3 See Fiber Laser 算例演示

以高功率宽谱光纤放大器中的 SRS 效应和单频放大器中的 SBS 效应为例, 介绍 See Fiber Laser 的仿真应用。

利用上述的理论模型, 在宽谱放大器中不考虑 SBS 效应, 对放大器中的 ASE 和 SRS 效应进行仿真。图 1 给出了仿真中编辑窗口的激光器结构和部分参数设置界面。在 See Fiber Laser 中, 首先通过拖拽的方式将需要的器件放置于编辑窗口中, 如图 1(a) 所示; 然后将各个器件通过线路连接起来, 再对各个器件进行参数设置。图 1(b)~(d) 分别显示了对抽运光、种子源和增益光纤进行参数设置的界面, 其中种子源和抽运光的光谱是通过 Excel 表格直接导入实验测得的数据得到的, 增益光纤的吸收发射截面等数据也可通过 Excel 表格直接导入。

在放大器各个器件连接和参数设置完成后, 运行仿真程序, 获得如图 2 所示的仿真结果。图 2 给出了种

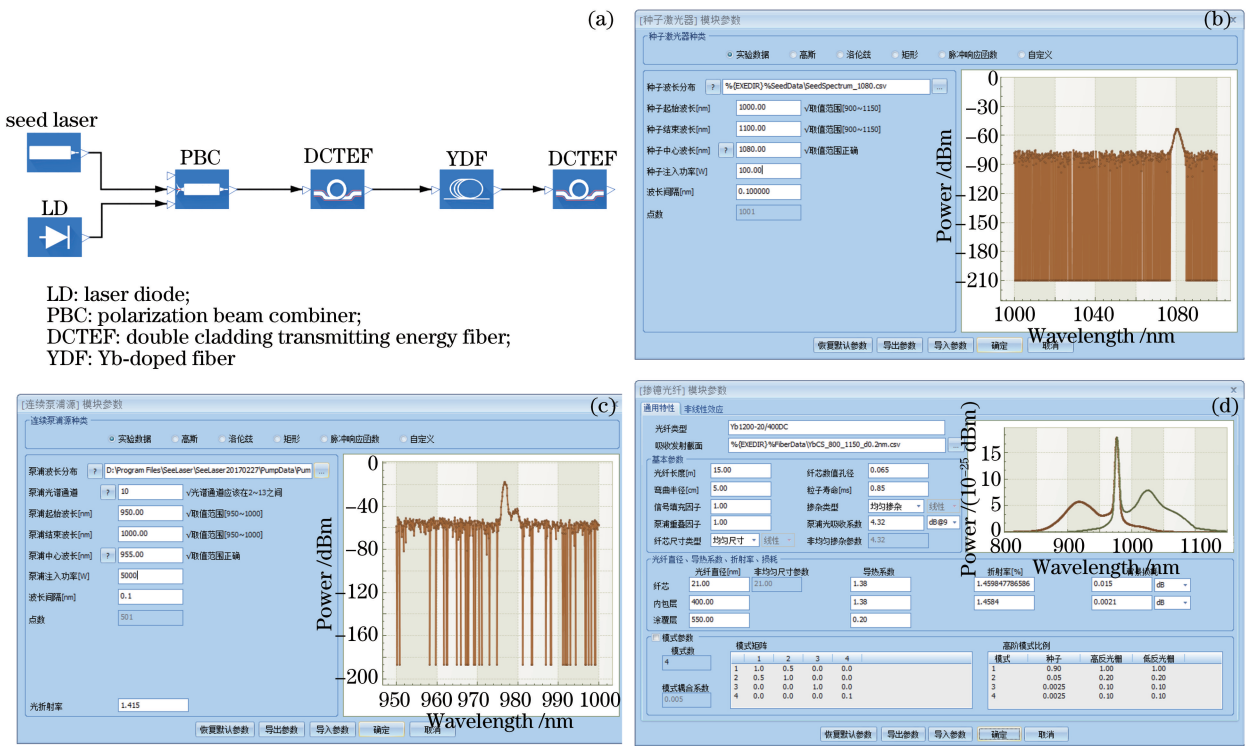


图 1 高功率光纤放大器中的 ASE 效应和 SRS 效应仿真参数设置界面。(a)编辑窗口的激光器结构；(b)种子激光器参数设置；(c)抽运光参数设置；(d)增益光纤参数设置

Fig. 1 Simulation parameter setting interfaces of ASE effect and SRS effect of high power fiber amplifier. (a) Laser configuration in edited window; (b) parameter set of seed laser; (c) parameter set of pump light; (d) parameter set of gain fiber

子功率为 100 W、抽运功率为 5000 W 时放大器的输出特性，包括抽运功率、信号功率随着增益光纤长度的变化以及激光器最终的输出光谱。结果表明，在高功率放大器输出中出现了 SRS 成分。此外，仿真结果还给出了增益光纤中的反转粒子数和增益光纤纤芯及表面的温度分布等参数。需要说明的是，本课题组对软件的仿真结果均进行了严格核对，以保证仿真程序本身的正确性<sup>[17-18]</sup>。

利用 SRS 和 SBS 信号模型，See Fiber Laser 可以对单频放大器中 SBS 信号的动态特性进行仿真。图 3 (a)给出了某一时刻单频放大器增益光纤内部抽运光、信号光、SRS 信号和 SBS 信号的功率随光纤长度的变化特性。由图 3(a)可知，在 SBS 信号刚刚出现时，各个信号的功率没有明显的变化；但从时域来看，输出信号和后向 SBS 信号的时域均会出现明显的脉冲特性，如图 3(b)所示。

### 3 光纤激光工具集 SFTool

#### 3.1 SFTool 功能简介

前述的光纤激光仿真软件可以实现较为完善的理论仿真，但是实际使用时需要在电脑上进行操作，使用不方便。为了给光纤激光研究提供快速简洁的参考性计算，初步开发了 PC 版和 Android 手机版的光纤激光工具集 SFTool。SFTool 基于光纤光学的各个物理公式，通过输入参数直接计算或估算各个物理量，并能够对计算得到的图形、数据进行存储。目前，SFTool 能够对多种参数进行计算，包括光学基本定律(反射、折射)、连续和脉冲激光基本特性参数、非线性效应(SBS、SRS、FWM)参数、光纤基本参数(掺杂浓度、光纤损耗、光纤端面反射率等)、光纤模式与光强分布、光束质量因子、不同模式弯曲损耗和模式不稳定功率阈值等。

#### 3.2 SFTool 部分理论模型简介

以光纤激光器的模式不稳定功率阈值计算模型为例，对 SFTool 中的模型进行简单介绍。模式不稳定是一种影响激光输出功率和光束质量的非线性效应。当光纤激光器抽运功率超过一定阈值时，光纤激光的

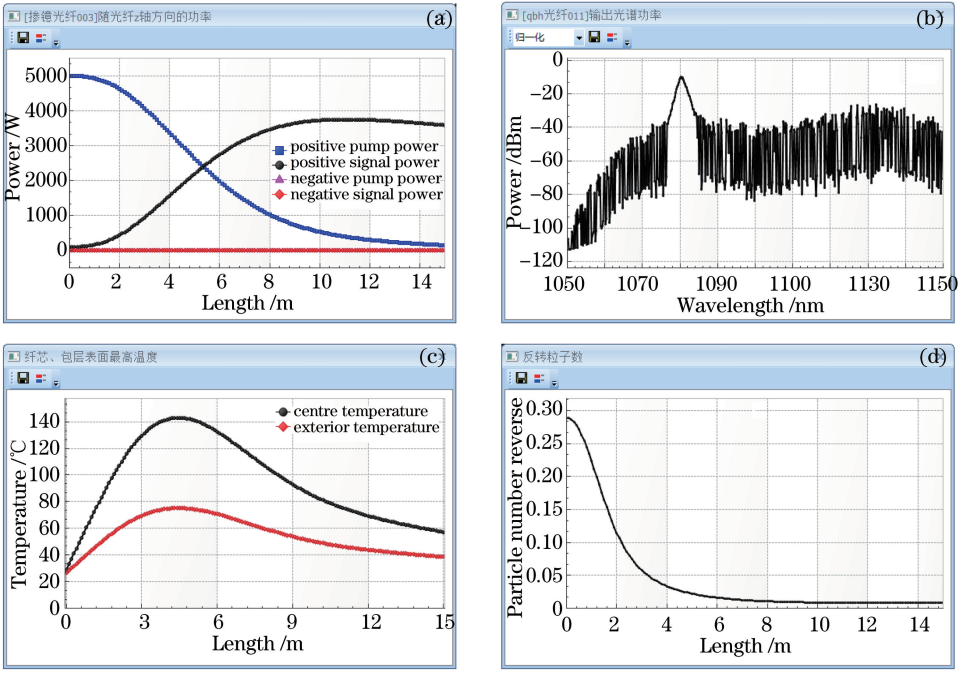


图 2 高功率光纤放大器中 ASE 效应和 SRS 效应的仿真结果。(a)增益光纤中抽运光和信号光的功率分布；  
(b)输出激光光谱；(c)增益光纤纤芯和包层表面温度；(d)增益光纤上能级粒子数分布

Fig. 2 Simulation results of ASE effect and SRS effect in high power fiber amplifier. (a) Power distributions of pump light and signal light in gain fiber; (b) spectrum of output laser; (c) temperatures of gain fiber core and cladding surface; (d) distribution of upper level population in gain fiber

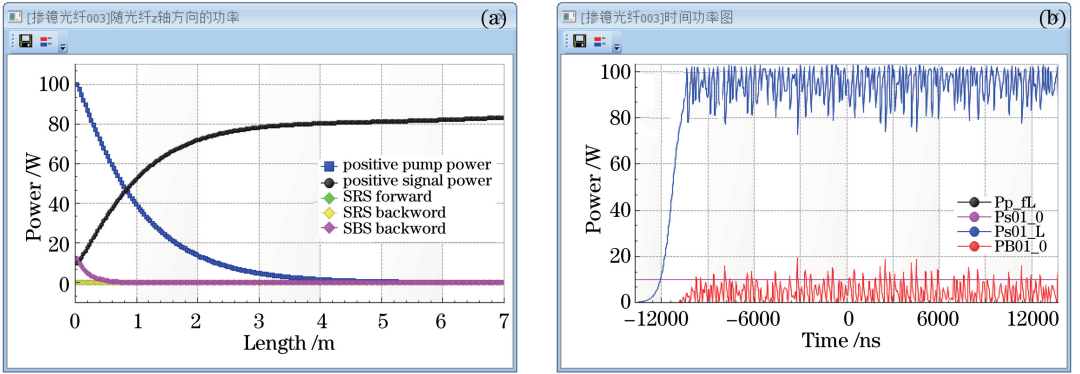


图 3 单频放大器中 SBS 信号的仿真结果。(a)增益光纤内部功率分布；(b)信号光和 SBS 信号的时域分布  
Fig. 3 Simulation results of SBS signal in single-frequency amplifier. (a) Power distribution in gain fiber; (b) time domain distributions of signal light and SBS signal

输出模式由稳定的基模变为基模和高阶模相对成分随时间迅速变化的非稳态模式。模式不稳定的功率阈值与光纤几何参数、种子功率、抽运波长和导热性能有关。根据热传导模型和光纤激光速率方程模型，建立了光纤激光器的模式不稳定模型<sup>[19-20]</sup>。只考虑两个模式时，通过适当简化，模式之间的动态耦合方程可表示为<sup>[21]</sup>

$$\frac{\partial P_1(z, \Omega)}{\partial z} = \frac{\Gamma_1}{2} g(z) P_1(z, \Omega) - iKg(z) \int_{-\infty}^{\infty} P_1(z, \Omega - \Omega') G_{1111}(\Omega') C_{11}(z, \Omega') d\Omega', \quad (10)$$

$$\frac{\partial P_2(z, \Omega)}{\partial z} = \frac{\Gamma_2}{2} g(z) P_2(z, \Omega) - iKg(z) \left[ \int_{-\infty}^{\infty} P_2(z, \Omega - \Omega') G_{2211}(\Omega') C_{11}(z, \Omega') d\Omega' + \int_{-\infty}^{\infty} P_1(z, \Omega - \Omega') G_{2121}(\Omega') C_{21}(z, \Omega') d\Omega' \right], \quad (11)$$

式中  $P_j(z, \Omega)$  为模式  $j$  的功率 ( $j=1, 2$ ),  $g(z)$  为增益系数,  $\Gamma_1$  和  $\Gamma_2$  分别为基模和高阶模的重叠积分,  $K$  为模式耦合系数,  $\Omega$  为基模与高阶模的角频率差,  $\Omega'$  为角频率的坐标,  $G_{jklm}(\Omega)$  和  $C_{jk}(z, \Omega)$  可表示为

$$G_{jklm}(\Omega) = \iint \psi_j(r) * \psi_k(r) \iint_{S_{\text{doped}}} g(r, r', \Omega) \psi_m(r') * \psi_l(r') dr' dr, \quad (12)$$

$$C_{jk}(z, \Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} P_j(z, \Omega + \Omega') P_k(z, \Omega') * d\Omega', \quad (13)$$

式中  $j, k, l, m$  的值取 1 或 2, 序数 1, 2 分别代表基模和高阶模。 $\psi_j(r), \psi_k(r), \psi_l(r), \psi_m(r)$  为基模和高阶模的归一化电场分布 ( $j, k, l, m$  为 1 时表示基模,  $j, k, l, m$  为 2 时表示高阶模)。

在实际的激光器设计中, 一般不需要对模式不稳定的动态特性进行模拟, 而是要对模式不稳定的功率阈值进行简单预判。因此, 可以通过引入高阶模成分参数  $\xi(L)$  来量化评价模式不稳定现象,  $\xi(L)$  可定义为

$$\xi(L) = \frac{P_2}{P_1 + P_2}, \quad (14)$$

式中  $P_2$  为高阶模输出功率,  $P_1$  为基模输出功率。定义高阶模功率比例占输出激光功率比例的 5% (即  $\xi(L) = 0.05$ ) 时输出激光功率为模式不稳定的功率阈值。利用模式不稳定的耦合方程, 得出  $\xi(L)$  的简化计算公式为

$$\xi(L) \approx \xi(0) \left[ \frac{P_{0,1}}{P_1} \right]^{1-R_2/\Gamma_1} \left\{ 1 + \frac{1}{4} R_N(\Omega_p) \sqrt{\frac{2\pi\Gamma_1}{P_1 |\chi''(\Omega_p)|}} \exp \left[ \frac{\Delta P_1}{\Gamma_1} \chi(\Omega_p) \right] \right\}, \quad (15)$$

式中  $\xi(0)$  为初始高阶模比例,  $\chi(\Omega)$  为模式的非线性耦合系数,  $\chi''(\Omega_p)$  为  $\chi(\Omega)$  的二阶导数,  $\Omega_p$  为  $\chi(\Omega)$  最大值所对应的频率,  $P_{0,1}$  为模式 1 的初始功率,  $R_N(\Omega_p)$  为相对强度噪声,  $\Delta P_1 = P_1 - P_{0,1}$ 。

在上述简化公式的基础上, 当  $\xi(L) = 0.05$  时, 对应的激光功率为模式不稳定的功率阈值。因此, SFTool 可以根据设定的相关输入参数来计算模式不稳定的功率阈值。

### 3.3 SFTool 算例演示

SFTool 可以计算的参数较多, 以 PC 版软件为基础, 对光纤模式计算、光束质量计算和模式不稳定的计算进行简单介绍。

根据光纤光学的原理, SFTool 中给定激光波长、光纤纤芯尺寸、纤芯数值孔径  $NA$  (或纤芯包层折射率) 的情况后, 可以计算光纤中支持的各个模式 (如线偏振模式  $LP_{11}, LP_{02}, LP_{21}, LP_{31}$ ), 可给出光纤中各个模式的光强和振幅分布, 将计算得到的数据和图形导出并存储。图 4(a) 为  $LP_{11}$  模式在纤芯数值孔径为 0.06、纤芯直径为  $20 \mu\text{m}$  的阶跃折射率光纤中的光强分布, 图 4(b) 为  $LP_{31}$  模式在纤芯数值孔径为 0.06、纤芯直径为  $30 \mu\text{m}$  的阶跃折射率光纤的振幅分布。

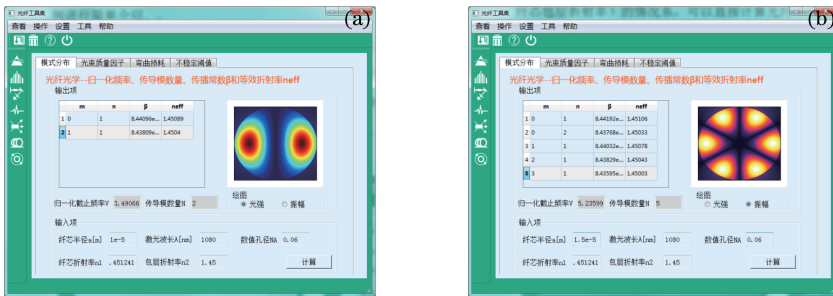


图 4 (a)  $LP_{11}$  模式在纤芯数值孔径为 0.06、纤芯直径为  $20 \mu\text{m}$  的阶跃折射率光纤中的光强分布;

(b)  $LP_{31}$  模式在纤芯数值孔径为 0.06、纤芯直径为  $30 \mu\text{m}$  的阶跃折射率光纤中的振幅分布

Fig. 4 (a) Light intensity distribution of  $LP_{11}$  mode in step-index fiber with NA of 0.06 and core diameter of  $20 \mu\text{m}$ ;

(b) amplitude distribution of  $LP_{31}$  mode in step-index fiber with NA of 0.06 and core diameter of  $30 \mu\text{m}$

在 SFTool 中, 根据激光光束质量与线偏振模式的关系, 在给定各个模式功率比的情况下, 可以计算出多模激光的光强分布, 并对光束质量进行估算。图 5 给出了在不同线偏振模式和功率比情况下, 多模光束的光束质量和光斑形态。图 5(a) 中  $LP_{02}$  与  $LP_{21}$  模式的功率比为 1:1, 光束质量  $M^2 = 3.18$ ; 图 5(b) 中  $LP_{02}$  与  $LP_{11}$  模式的功率比为 1:1, 光束质量  $M_x^2 = 3.20, M_y^2 = 2.09$ 。

根据第 3.2 节中模式不稳定功率阈值的计算公式, 利用 SFTool 可以计算光纤放大器的模式不稳定功率阈值和非线性耦合系数。在纤芯直径为  $50 \mu\text{m}$  的光纤中, SFTool 得到的典型计算结果如图 6 所示。在初始

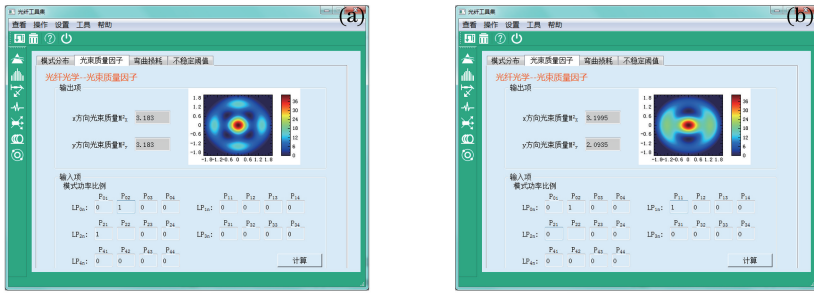


图 5 SFTool 计算得到的光束质量因子。(a)  $LP_{02}$  与  $LP_{21}$  模式的功率比为 1:1; (b)  $LP_{02}$  与  $LP_{11}$  模式的功率比为 1:1  
 Fig. 5 Beam quality factors calculated by SFTool. (a) Power rate of  $LP_{02}$  mode to  $LP_{21}$  mode is 1:1; (b) power rate of  $LP_{02}$  mode to  $LP_{11}$  mode is 1:1

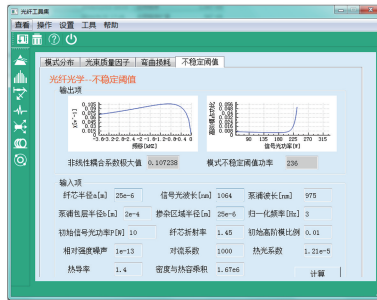


图 6 SFTool 计算得到的模式不稳定功率阈值  
 Fig. 6 Mode instability power threshold calculated by SFTool

高阶模式比例为 0.01 时,模式不稳定的功率阈值为 236 W 左右,非线性耦合系数的最大值为 0.107,对应的耦合频率为  $-0.8$  kHz。

## 4 结 论

介绍了初步开发的光纤激光仿真软件 See Fiber Laser 和光纤激光工具集 SFTool 的基本功能和算例演示,其中 SFTool 包括 PC 版和 Android 手机版。目前国际上的两款商用仿真软件只能满足教学、科研的应用,对于理论基础欠缺的普通商业公司人员,在实际应用时可能存在一定的难度。立足于国内科研人员和工业单位员工的可能需求,开发了一款界面友好、理论模型完善、计算效率高、能够指导实际科研和产业激光器设计的光纤激光仿真软件,不仅能够带动基础理论方面的发展,还有望提高光纤激光器的研发效率,降低光纤激光器的生产成本,从而推动相关产业的发展。当然,目前的软件功能还不够完善,部分参数设置还存在一定疏漏,需要不断改进和逐步完善。本课题组下一步的工作是通过基础理论、实验验证和软件开发协同攻关,以期再经过 3~5 年的努力,实现一款真正好用的国产光纤激光仿真软件。

## 参 考 文 献

- [1] Stark M. Over 50 percent wall-plug efficiency fiber laser[J]. Laser Technik Journal, 2016, 13(2): 14-16.
- [2] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: A review[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 1-23.
- [3] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: Current status and future perspectives[J]. J Opt Soc Am B, 2010, 27(11): B63-B92.
- [4] Zervas M N. High power ytterbium-doped fiber lasers - fundamentals and applications[J]. International Journal of Modern Physics B, 2014, 28(12): 1442009.
- [5] IPG Photonics Corporation. IPG photonics successfully tests world's first 10 kilowatt single-mode production laser [EB/OL]. (2009-6-16) [2017-01-20]. [http://www.ipgphotonics.com/Collateral/Documents/English-US/PR\\_Final\\_10\\_kW\\_SM\\_laser.pdf](http://www.ipgphotonics.com/Collateral/Documents/English-US/PR_Final_10_kW_SM_laser.pdf).
- [6] Liu Chaoping, Liao Lei, Li Jinyan. Research progress on photodarkening of Yb-doped fiber lasers[J]. Laser &

Optoelectronics Progress, 2016, 53(7): 070002.

刘超平, 廖 雷, 李进延. 掺镱光纤激光器光子暗化现象的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(7): 070002.

- [7] Xu S H, Yang Z M, Zhang W N, *et al.* 400 mW ultrashort cavity low-noise single-frequency  $\text{Yb}^{3+}$ -doped phosphate fiber laser[J]. Optics Letters, 2011, 36(18): 3708-3710.
- [8] Wang Xiaolin, Zhang Hanwei, Tao Rumao, *et al.* Laser diode pumped 4.1 kilowatt fiber laser with master oscillator power amplification configuration[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(5): 0502002.  
王小林, 张汉伟, 陶汝茂, 等. LD 抽运主振荡功率放大结构 4.1 kW 全光纤激光器[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0502002.
- [9] Zheng Y Z, Yang Y F, Wang J H, *et al.* 10.8 kW spectral beam combination of eight all-fiber superfluorescent sources and their dispersion compensation[J]. Optics Express, 2016, 24(11): 12063-12071.
- [10] Ke W W, Wang X J, Bao X F, *et al.* Thermally induced mode distortion and its limit to power scaling of fiber lasers [J]. Optics Express, 2013, 21(12): 14272-14281.
- [11] Hemming A, Richards J, Simakov N, *et al.* Pulsed operation of a resonantly pumped, linearly polarised, large mode area holmium-doped fibre amplifier[J]. Optics Express, 2014, 22(6): 7186-7193.
- [12] Wang J M, Yang D P, Xiong S S, *et al.* High power all-fiber amplifier with different seed power injection[J]. Optics Express, 2016, 26(13): 14463-14469.
- [13] Ran Yang, Wang Xiaolin, Lü Haibin, *et al.* Novel suppression method study for stimulated Brillouin scattering by simultaneous phase and intensity modulation in fiber amplifiers[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0805001.  
冉 阳, 王小林, 吕海斌, 等. 种子相位和强度同时调制抑制光纤激光放大器 SBS 的新方法研究[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0805001.
- [14] Ran Y, Su R T, Ma P F, *et al.* 293 W, GHz narrow-linewidth, polarization maintaining nanosecond fiber amplifier with SBS suppression employing simultaneous phase and intensity modulation [J]. Optics Express, 2015, 23(20): 25896-25905.
- [15] Boyd R W, Rzaewski K, Narum P. Noise initiation of stimulated Brillouin scattering[J]. Physics Review A, 1990, 42 (9): 5514-5521.
- [16] Mungan C E, Rogers S D, Satyan N. Time-dependent modeling of Brillouin scattering in optical fibers excited by a chirped diode laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2012, 48(12): 1542-1546.
- [17] Wang Xiaolin, Tao Rumao, Zhang Hanwei, *et al.* 1 kilowatt single-end pumped all-fiber laser oscillator with good beam quality and high stability[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1105001  
王小林, 陶汝茂, 张汉伟, 等. 1 kW 单端抽运、高光束质量、高稳定性全光纤激光振荡器[J]. 中国激光, 2014, 41 (11): 1105001.
- [18] Yu H Y, Zhang H W, Lü H B, *et al.* 3.15 kW direct diode-pumped near diffraction-limited all-fiber-integrated fiber laser[J]. Applied Optics, 2015, 54(14): 4556-4560.
- [19] Tao R M, Ma P F, Wang X L, *et al.* Comparison of the threshold of thermal-induced mode instabilities in polarization-maintaining and non-polarization-maintaining active fibers[J]. Journal of Optics, 2016, 18(6): 65501-65509.
- [20] Tao R M, Ma P F, Wang X L, *et al.* 1.3 kW monolithic linearly polarized single-mode master oscillator power amplifier and strategies for mitigating mode instabilities[J]. Photonics Research, 2015, 3(5): 86-93.
- [21] Tao Rumao. Study of thermal-induced modal instabilities in high power narrow-linewidth fiber amplifiers with near diffraction-limited beam quality[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015.  
陶汝茂. 高功率窄线宽近衍射极限光纤激光放大器热致模式不稳定研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.