

# 数值优化 3~5 $\mu\text{m}$ 中红外 ZBLAN 光纤拉曼激光器的研究

王莹 罗正钱 熊凤福 蔡志平 许惠英

厦门大学信息科学与技术学院电子工程系, 福建 厦门 361005

**摘要** 3~5  $\mu\text{m}$  中红外激光在国防、医疗、自由空间光通信及材料加工等领域具有重要的应用价值。本文提出利用发展较成熟的 2.7~2.9  $\mu\text{m}$  掺 Er 激光作为拉曼抽运源, ZBLAN 光纤作为拉曼增益介质, 为获得激励波长灵活、结构紧凑的 3~5  $\mu\text{m}$  中红外激光提供一种可行方法。依据光纤拉曼激光器的非线性耦合方程组, 数值分析并优化设计了 3~5  $\mu\text{m}$  中红外 ZBLAN 光纤一级/二级拉曼激光器。主要研究了 ZBLAN 光纤长度和输出镜反射率等参数对拉曼激光阈值及输出功率的影响。数值结果表明: 1) 拉曼阈值随着输出镜反射率的增大而明显下降, 且存在最优的 ZBLAN 光纤长度使一级拉曼阈值最低(4.15 W); 2) 为获得最高拉曼激光输出功率, 最优输出镜反射率分别为 84%~98%(一级)和 42%~60%(二级), 最优 ZBLAN 光纤长度分别为 6.7~8.9 m(一级)和 1.5~2.4 m(二级), 最优斜率效率分别高达 72.36%(一级)和 34.06%(二级)。研究工作在一定程度上可为实验研究此类中红外拉曼激光器提供理论指导。

**关键词** 激光器; 拉曼光纤激光器; 中红外; ZBLAN 光纤; 数值模拟

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.061405

## Numerical Optimization of 3~5 $\mu\text{m}$ Mid-Infrared ZBLAN Fiber Raman Lasers

Wang Ying Luo Zhengqian Xiong Fengfu Cai Zhiping Xu Huiying

*Department of Electronic Engineering, College of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China*

**Abstract** 3~5  $\mu\text{m}$  mid-infrared lasers have attracted much attentions due to their wide applications in defences, medicine, free-space optical communication and materials processing. A new scheme for obtaining a 3~5  $\mu\text{m}$  flexible-wavelength, compact mid-infrared Raman fiber laser is proposed, using a 2.7~2.9  $\mu\text{m}$  Er-doped fiber laser as Raman pump source and a ZBLAN fluoride fiber as Raman gain medium. Based on the nonlinear coupling equations of Raman fiber lasers, the 3~5  $\mu\text{m}$  mid-infrared ZBLAN fiber 1st/2nd-order Raman lasers are numerically analyzed and optimized. The theoretical optimization is mainly focused on the effects of ZBLAN fiber length and output-mirror reflectivity on the Raman laser threshold and output power. The numerical results show: 1) the Raman laser threshold significantly reduces with the increase of the output-mirror reflectivity, and there always exists the optimized ZBLAN fiber length for the lowest Raman threshold (4.15 W); 2) in order to obtain the high-power Raman laser output, the optimized reflectivities of output mirror are 84~98% (1st-order) and 42~60% (2nd-order), the optimized ZBLAN fiber lengths are 6.7~8.9 m(1st-order) and 1.5~2.4 m (2nd-order), respectively. The optimized slope conversion efficiencies can be as high as 72.36% (1st-order) and 34.06% (2nd-order). These results could provide a theoretical guidance for such mid-infrared fiber Raman lasers.

**Key words** lasers; Raman fiber laser; mid-infrared; ZBLAN fiber; numerical simulation

**OCIS codes** 140.3550; 140.3510; 140.3480; 190.4370

收稿日期: 2014-01-24; 收到修改稿日期: 2014-02-24; 网络出版日期: 2014-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(61107038)、厦门大学大学生创新创业实训项目

作者简介: 王莹(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事拉曼光纤激光器方面的研究。E-mail: wangying\_1030@163.com

导师简介: 罗正钱(1982—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光纤激光器及非线性光学方面的研究。

E-mail: zqluo@xmu.edu.cn(通信联系人)

## 1 引言

光纤激光器因具备结构紧凑、效率高、成本低且光束质量好等优点,近20年来已成为国际激光研究领域的热点之一。近红外(1~2  $\mu\text{m}$ )光纤激光器已发展较为成熟<sup>[1-5]</sup>,在1  $\mu\text{m}$ 波段光纤激光器输出功率可达万瓦级<sup>[6]</sup>,在2  $\mu\text{m}$ 波段掺Tm光纤激光器输出功率也已高达千瓦<sup>[7]</sup>。相比之下,3~5  $\mu\text{m}$ 波段中红外光纤激光的发展仍相对缓慢,但该波段激光却具有重要应用价值<sup>[8]</sup>,主要包括:1) 3~5  $\mu\text{m}$ 波段覆盖了众多重要分子的振动吸收峰(“指纹”谱),在化学/物理学研究、安全检测及环境保护等方面具有重要应用;2) 3~5  $\mu\text{m}$ 波段是衰减最小的大气红外窗口,是激光雷达、大气遥感、自由空间光通信的理想光源;3) 在医疗领域,由于人体组织在3  $\mu\text{m}$ 左右吸收强烈,中红外激光用于微创激光手术具有组织穿透深度浅、创面小、手术精度高等优点。因此,3~5  $\mu\text{m}$ 中红外光纤激光已受到世界激光研究者的广泛关注,是目前激光研究领域的前沿热点之一。

随着软玻璃光纤(如氟化物、碲化物和硫化物光纤)制作技术日益成熟,因其中红外波段透明的特性,可用于传输或产生中红外激光<sup>[9]</sup>。Többen等<sup>[10]</sup>已经利用掺Er<sup>3+</sup>:ZBLAN氟化物光纤产生了3.5  $\mu\text{m}$ 中红外激光。然而,中红外稀土光纤通常只能在一些离散的波段产生激射,难以在3~5  $\mu\text{m}$ 中红外区域拓展新的激光波长。相比较地,若直接利用这些软玻璃光纤的光学非线性效应(例如受激拉曼散射)获得激光增益,则可实现波长灵活可变、结构简单且成本低的中红外激光,已成为目前中红外光纤激光技术之一。

一方面,利用软玻璃光纤产生中红外拉曼激光已取得显著进展<sup>[11-17]</sup>。Fortin等<sup>[11]</sup>利用氟化物ZBLAN光纤已产生了3.66 W高功率2231 nm拉曼激光;Bernier等<sup>[13]</sup>利用硫化物As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>光纤已获得3.34  $\mu\text{m}$ 中红外连续波拉曼激光。这些成果表明,使用软玻璃光纤的拉曼增益实现中红外光纤激光将是切实可行的。其中,ZBLAN光纤材料(一种典型组分的摩尔分数为53% ZrF<sub>4</sub>,20% BaF<sub>2</sub>,4% LaF<sub>3</sub>,3% AlF<sub>3</sub>,20% NaF)是最早开始研究的,已经较为成熟并且商业化。ZBLAN光纤在0.8~4.5  $\mu\text{m}$ 波段有较低的损耗<sup>[18]</sup>,其光学、机械性能良好,拉曼频移量可达579  $\text{cm}^{-1}$ ,远高于As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>及As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>等硫化物光纤。因此,利用ZBLAN光纤作为拉曼增益介质被认为是理想选择之一。

另一方面,2.7~2.9  $\mu\text{m}$ 掺铒氟化物光纤激光器的研究近几年有了很大进展<sup>[19,19-22]</sup>。Tokita等<sup>[19]</sup>利用掺铒ZBLAN光纤在水冷的条件下获得了2.7  $\mu\text{m}$ 波段24 W的连续激光输出;该研究小组同样利用掺铒ZBLAN光纤在无制冷条件下获得了2.71~2.88  $\mu\text{m}$ 波段可调谐、8~11 W激光输出<sup>[20]</sup>。由此看来,2.7~2.9  $\mu\text{m}$ 掺铒光纤激光器有望成为优良的拉曼抽运源,通过有效抽运ZBLAN光纤,可在3~5  $\mu\text{m}$ 波段产生高性能拉曼激光。因此,对此结构的3~5  $\mu\text{m}$ 中红外ZBLAN光纤拉曼激光器进行理论研究、优化设计,为后续实验研究提供指导,将具有重大学术意义。

李剑锋等<sup>[23-25]</sup>理论研究了ZBLAN光纤拉曼激光器,但他们仅研究了2  $\mu\text{m}$ 波段拉曼激光,且未优化拉曼抽运阈值及级联拉曼的情况。本文提出以2.75  $\mu\text{m}$ 掺铒光纤激光器作为抽运源,ZBLAN光纤作为拉曼增益介质,构建了3~5  $\mu\text{m}$ 中红外光纤拉曼激光器的理论模型。分别研究了一级拉曼和两级级联拉曼情况下,输出镜反射率和ZBLAN光纤长度等参数对激光器性能的影响。数值计算结果表明,输出镜反射率和ZBLAN光纤长度对一级和二级拉曼激光的阈值和输出功率均有较大影响,并进一步给出了其相应的最优值范围。

## 2 中红外ZBLAN光纤拉曼激光器的理论模型

图1给出了 $n$ 级拉曼ZBLAN光纤激光器的结构示意图。拉曼抽运源可采用2.75  $\mu\text{m}$ 连续波掺铒双包层光纤激光器,拉曼增益介质为ZBLAN光纤(长度为 $L$ )。 $n$ 对反射镜[如光纤布拉格光栅(FBG)]在ZBLAN光纤两端构建相应的拉曼谐振腔( $n$ 级拉曼Stokes腔)。其中,FBG<sub>0</sub><sup>0</sup>(反射率为 $R_0^0$ )用于反射剩余的拉曼抽运光( $\lambda_0$ ),FBG<sub>1</sub> <sup>$j$</sup> ( $j=1,\dots,n$ )及FBG <sub>$n$</sub>  <sup>$j$</sup> (反射率分别为 $R_1^j$ , $R_n^j$ )对第 $j$ 级拉曼波长 $\lambda_j$ 高反射,FBG<sub>out</sub> <sup>$n$</sup> (反射率为 $R_{out}^n$ )作为激光输出镜对第 $n$ 级拉曼波长 $\lambda_n$ 部分反射。

抽运光在拉曼光纤中经过能量频移,产生新的拉曼Stokes波长,表示为

$$\frac{1}{\lambda_{n-1}} - \frac{1}{\lambda_n} = \Delta\nu, \quad n \geq 1, \quad (1)$$

式中 $\lambda_0$ 为抽运光波长, $\lambda_n$ 为 $n$ 级拉曼Stokes光波长, $\Delta\nu$ 为ZBLAN光纤的拉曼频移量(579  $\text{cm}^{-1}$  [11-12])。由

(1)式可知,只要给定抽运光波长  $\lambda_0$ ,可以计算任意级的拉曼 Stokes 光波长。

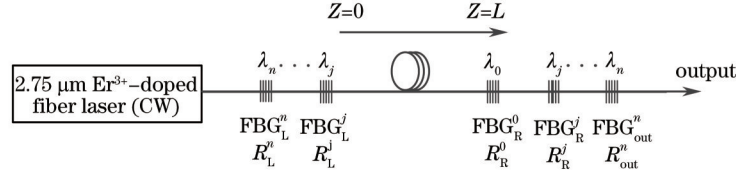


图1 ZBLAN 光纤拉曼激光器结构图

Fig.1 Schematic configuration of ZBLAN Raman fiber laser

$n$  级拉曼 ZBLAN 光纤激光器的动力学耦合方程组为<sup>[26]</sup>

$$\begin{aligned} dP_0^{F/B}/dz &= \mp \alpha_0 P_0^{F/B} \mp \lambda_0 g_1 (P_1^F + P_1^B) P_0^{F/B} / \lambda_1, \\ &\dots \\ dP_j^{F/B}/dz &= \mp \alpha_j P_j^{F/B} \pm g_j (P_{j-1}^F + P_{j-1}^B) P_j^{F/B} \mp \lambda_j g_{j+1} (P_{j+1}^F + P_{j+1}^B) P_j^{F/B} / \lambda_{j+1}, \\ &(j = 1, \dots, n-1) \\ dP_n^{F/B}/dz &= \mp \alpha_n P_n^{F/B} \pm g_n (P_{n-1}^F + P_{n-1}^B) P_n^{F/B}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $P_0^F$ ,  $P_0^B$ ,  $P_j^F$  ( $j=1, \dots, n$ ),  $P_j^B$  分别表示正向传输的抽运光、反向传输的抽运光、正向传输的  $j$  级 Stokes 光、反向传输的  $j$  级 Stokes 光,  $\alpha_0$  表示 ZBLAN 光纤在抽运光波长的损耗系数,  $\alpha_j$  ( $j=1, \dots, n$ ) 表示 ZBLAN 光纤在  $j$  级 Stokes 光波长的损耗系数,  $g_j$  ( $j=1, \dots, n$ ) 表示 ZBLAN 光纤在  $j$  级 Stokes 光波长处的拉曼增益系数。

边界条件为

$$\begin{aligned} P_0^F(0) &= P_{in}, \quad P_0^B(L) = R_R^0 P_0^F(L), \quad P_j^F(0) = R_L^j P_j^B(0), \quad P_j^B(L) = R_R^j P_j^F(L), \quad j = 1, \dots, n-1 \\ P_n^F(0) &= R_L^n P_n^B(0), \quad P_n^B(L) = R_{out}^n P_n^F(L), \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $P_{in}$  为输入抽运功率。

考虑到 ZBLAN 光纤仅在小于 4.5  $\mu\text{m}$  波段范围透明,且主要研究 3~5  $\mu\text{m}$  波段中红外拉曼激光,因此,在 2.75  $\mu\text{m}$  掺铒光纤激光抽运下,只需一级或二级拉曼便可获得所需的 3~5  $\mu\text{m}$  中红外激光。通过(1)式计算,图2给出了 3~5  $\mu\text{m}$  ZBLAN 拉曼光纤激光器的拉曼频移示意图。当抽运光波长  $\lambda_0 = 2.75 \mu\text{m}$  时,一级和二级 Stokes 光波长分别为  $\lambda_1 = 3.27 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_2 = 4.035 \mu\text{m}$ 。

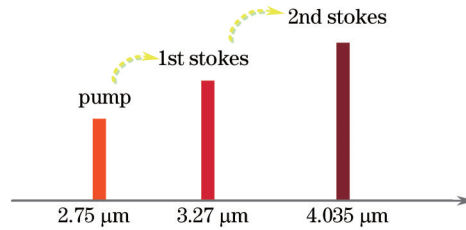


图2 ZBLAN 光纤的拉曼频移示意图

Fig.2 Raman frequency shift of ZBLAN fiber

数值模拟中所需其他参数均采用日本 Fiberlabs 公司已商业化的 ZBLAN 6/123 光纤为参考:  $\alpha_0 = 0.0275 \text{ dB/m}$ 、 $\alpha_1 = 0.0375 \text{ dB/m}$ 、 $\alpha_2 = 0.3175 \text{ dB/m}$ <sup>[18]</sup>,  $g_0 = 1.15 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ <sup>[12]</sup>、 $g_1 = 9.671 \times 10^{-4} \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $\text{FBG}_R^j$  ( $j=0, \dots, n-1$ ) 及  $\text{FBG}_L^j$  ( $j=0, \dots, n$ ) 的反射率分别取  $R_R^j = 99\%$ ,  $R_L^j = 99\%$ , 输出镜  $\text{FBG}_{out}^n$  的反射率  $R_{out}^n$  在 5%~99% 之间取值。另外,利用 Newton-Raphson 算法<sup>[27]</sup>快速求解(2)式,以获得准确的数值模拟结果。

### 3 3.27 $\mu\text{m}$ ZBLAN 光纤一级拉曼激光器的数值优化

在抽运功率 10 W、ZBLAN 光纤长度  $L=30 \text{ m}$ 、输出镜反射率  $R_{out}^1$  分别取 30% 和 70% 时,图3给出了抽运光和一级 Stokes 光功率在光纤内的演化情况。在 ZBLAN 光纤内,随着抽运光的传输,前/后向抽运光均逐渐减小,前/后向拉曼激光均逐渐增大(注:后向指从  $z=30 \text{ m}$  至  $z=0$ ),表明抽运光能量在 ZBLAN 光纤中能有效地转化至拉曼激光。对比图 3(a) 和图 3(b) 可以看出,  $R_{out}^1 = 70\%$  时抽运光的利用率更高(即剩余抽运光较少),腔内拉曼激光功率也较高;另外,  $R_{out}^1$  在较高反射率(70%)时,前/后向拉曼激光随着 ZBLAN 光纤长度增长有

饱和的趋势。

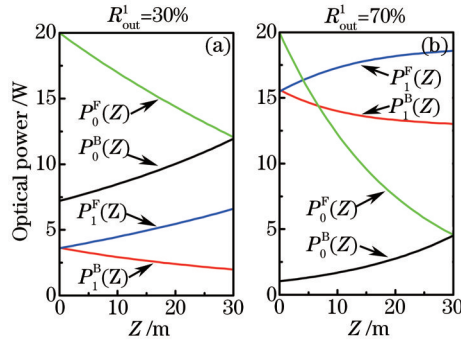


图3 抽运光和一级 Stokes 光在拉曼激光腔内的功率演化。(a)  $R_{\text{out}}^1=30\%$ ; (b)  $R_{\text{out}}^1=70\%$

Fig.3 Power evolution of the pump and 1st-order Raman Stokes light. (a)  $R_{\text{out}}^1=30\%$ ; (b)  $R_{\text{out}}^1=70\%$

综上所述,影响拉曼激光器运转的因素很多,比如抽运功率,ZBLAN 光纤的长度,输出镜反射率等,这些因素对激光器的拉曼阈值和输出功率均有很大影响。因此,通过研究并优化这些参数对获得低阈值、高效率/高功率拉曼激光将是有意义的。

### 3.1 3.27 $\mu\text{m}$ 一级拉曼抽运阈值

图4给出了输出镜  $\text{FBG}_{\text{out}}^1$  的反射率  $R_{\text{out}}^1$  分别为 40%、65%和 95%时,ZBLAN 光纤长度  $L$  对拉曼阈值的影响。由图4可知,随着  $L$  的增加,拉曼阈值先快速下降,然后缓慢上升,即存在最优 ZBLAN 光纤长度使拉曼阈值最小值。若 ZBLAN 光纤太短,拉曼增益小,只有在非常高的抽运功率下才能获得足够增益弥补腔损耗;相反,若 ZBLAN 光纤太长,光纤本身引入的损耗增加,也导致拉曼阈值增大。例如,在  $R_{\text{out}}^1=95\%$  时,最优光纤长度  $L=30.0\text{ m}$ ,此时拉曼阈值为 5.1 W;在  $R_{\text{out}}^1=65\%$  时,最优光纤长度  $L=58.8\text{ m}$ ;而在  $R_{\text{out}}^1=40\%$  时,最优光纤长度  $L=79.0\text{ m}$ 。

图5给出了 ZBLAN 光纤长度为 30、60、150 m 时,  $\text{FBG}_{\text{out}}^1$  反射率  $R_{\text{out}}^1$  对拉曼阈值的影响。随着  $R_{\text{out}}^1$  增大,拉曼阈值逐渐减小,这主要归因于:输出镜反射率  $R_{\text{out}}^1$  越大,腔损耗越小,越容易达到拉曼阈值产生激光。由图5可知,在  $L=30\text{ m}$ ,  $R_{\text{out}}^1=99\%$  时,拉曼阈值最低可至 4.7 W;在  $L=60\text{ m}$ ,  $R_{\text{out}}^1=99\%$  时,最低拉曼阈值为 5.5 W;  $L=150\text{ m}$ ,  $R_{\text{out}}^1=99\%$  时,最低拉曼阈值为 8.5 W。

综合图4和图5分析可得,若单纯考虑拉曼阈值,ZBLAN 光纤长度应取 30~50 m 之间为宜,输出镜反射率  $R_{\text{out}}^1$  越高越好。

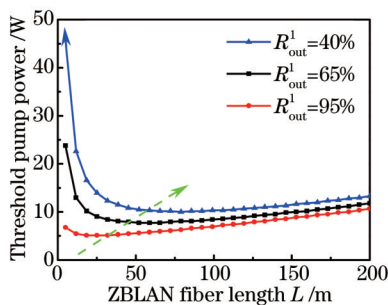


图4 一级拉曼阈值随 ZBLAN 拉曼光纤长度  $L$  的变化

Fig.4 1st-order threshold pump power as a function of ZBLAN fiber length  $L$

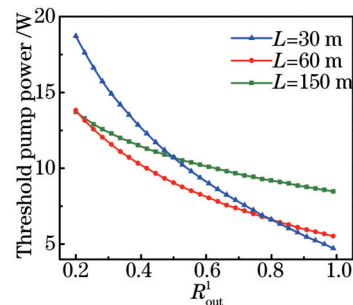


图5 一级拉曼阈值随输出镜反射率  $R_{\text{out}}^1$  的变化

Fig.5 1st-order threshold pump power as a function of the output-mirror reflectivity  $R_{\text{out}}^1$

### 3.2 优化 3.27 $\mu\text{m}$ 一级拉曼输出功率

在抽运功率为 10 W 时,图6(a)和(b)分别给出了 3.27  $\mu\text{m}$  一级拉曼激光输出功率随 ZBLAN 光纤长度  $L$  及输出镜反射率  $R_{\text{out}}^1$  的变化情况。由图6(a)可见,ZBLAN 光纤长度对拉曼光纤激光器的输出功率有较大的影响。在不同  $R_{\text{out}}^1$  下,均存在最优光纤长度  $L$  使拉曼激光输出功率达到最大。ZBLAN 光纤长度过小时,抽运光没有被充分吸收(剩余较多抽运光),因此转化至拉曼激光的效率低;ZBLAN 光纤长度过大时,有限的抽运光不能充分激发所有拉曼光纤,这些未被有效抽运的光纤不仅提供的拉曼增益非常小,反而引入额外的

光纤损耗,也导致输出功率降低。由图6(b)可知,随着 $R_{\text{out}}^1$ 增加,3.27  $\mu\text{m}$ 一阶拉曼激光输出功率先增加至最大值,然后下降。在不同的ZBLAN光纤长度 $L$ 下,均存在最优 $R_{\text{out}}^1$ 可使输出功率达到最大。当 $R_{\text{out}}^1$ 过小时,腔损耗太大,腔内拉曼激光功率太小,导致输出功率较低; $R_{\text{out}}^1$ 过大时,尽管腔内拉曼激光功率可达非常高,但透射率 $(1-R_{\text{out}}^1)$ 太小,导致输出功率降低。

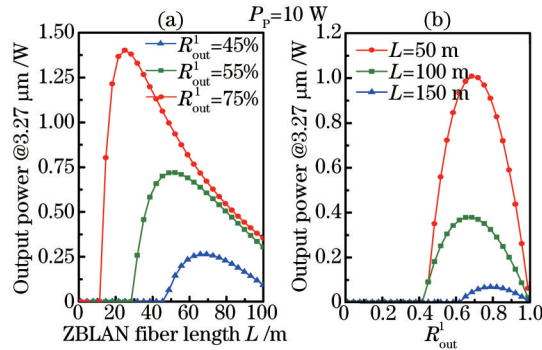


图6 3.27  $\mu\text{m}$ 一阶拉曼输出功率随(a)反射率 $R_{\text{out}}^1$ 及(b)ZBLAN光纤长度 $L$ 的变化

Fig.6 3.27  $\mu\text{m}$  1st-order Raman output power as a function of (a) output-mirror reflectivity  $R_{\text{out}}^1$  and (b) different ZBLAN fiber lengths  $L$

由图6可知,ZBLAN光纤长度 $L$ 及输出镜反射率 $R_{\text{out}}^1$ 对拉曼光纤激光器的输出功率均有很大的影响,必需同时全局优化这两个参数以获得最高输出功率。在抽运功率 $P_p$ 分别为5、10、15、20 W时,图7分别给出了3.27  $\mu\text{m}$ 一阶拉曼激光输出功率与输出镜反射率 $R_{\text{out}}^1$ 及ZBLAN光纤长度 $L$ 的全局优化图。由此,可以获得相应的 $L$ 和 $R_{\text{out}}^1$ 的最优组合,图8给出了不同抽运功率下的最优组合。

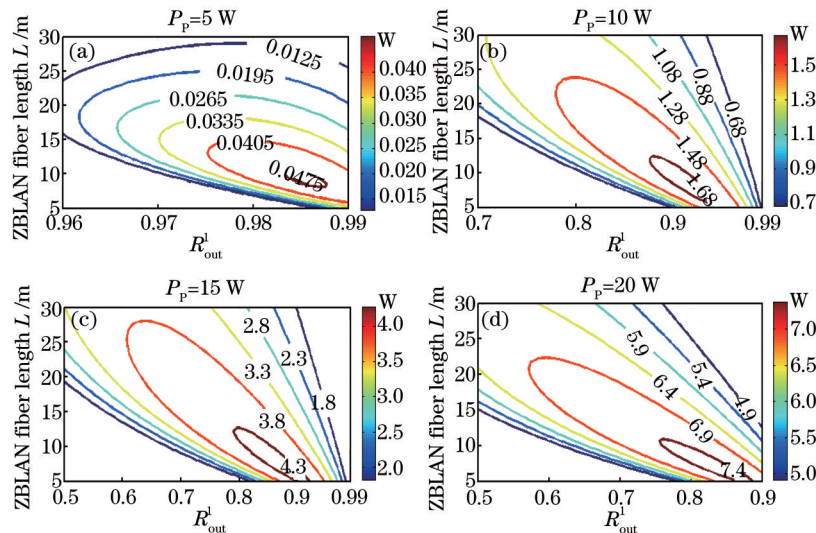


图7 在抽运功率分别为(a) 5 W、(b) 10 W、(c) 15 W、(d) 20 W时,3.27  $\mu\text{m}$ 一阶拉曼输出功率与输出镜反射率 $R_{\text{out}}^1$ 及ZBLAN光纤长度 $L$ 的全局优化图(等高线)

Fig.7 Contour maps for 3.27  $\mu\text{m}$  1st-order Raman output power versus output-mirror reflectivity  $R_{\text{out}}^1$  and ZBLAN fiber length  $L$  at the pump power of (a) 5 W, (b) 10 W, (c) 15 W, (d) 20 W, respectively

由图8可知,随着抽运功率从5 W增加至20 W,最优的ZBLAN光纤长度 $L$ 和输出镜反射率均逐渐减小。当抽运功率 $P_p=5$  W时,最优组合为 $L=8.95$  m, $R_{\text{out}}^1=98.5\%$ ;当抽运功率增加至 $P_p=20$  W时,最优组合为 $L=6.69$  m, $R_{\text{out}}^1=84.1\%$ 。最优光纤长度 $L$ 和最优输出镜反射率 $R_{\text{out}}^1$ 随抽运功率增加而减小的趋势,主要归因于:光纤拉曼增益 $G \propto \exp(gP_p L)$ ,抽运功率 $P_p$ 越大,所需拉曼光纤长度 $L$ 将越短;增益越大,输出镜反射率可适当减小(即腔损耗可适当增加)。因此,为获得高功率拉曼激光输出,最优ZBLAN光纤长度应在6.7~8.9 m范围,最优输出镜反射率应在84%~98%范围内。

依据上述对ZBLAN光纤长度 $L$ 和输出镜反射率 $R_{\text{out}}^1$ 的优化设计,选用 $R_{\text{out}}^1=99\%$ , $L=30$  m这对参数,以

获得最低的拉曼阈值;选用  $R_{\text{out}}^1=84\%$ ,  $L=6.7$  m 这对参数,以获得最高的输出功率。图9给出了取这两对参数时  $3.27 \mu\text{m}$  一级拉曼激光的输入输出功率关系曲线。由图9可知,在 20 W 的抽运功率下,当  $R_{\text{out}}^1=84\%$ ,  $L=6.7$  m 时,可以获得 7.5 W 的拉曼激光输出,斜率效率可以达到 72.36%,但此时拉曼阈值高达 9.66 W;当  $R_{\text{out}}^1=99\%$ ,  $L=30$  m 时,拉曼阈值可低至 4.15 W,但此时激光斜率效率仅 1.82%,最大拉曼功率也仅 0.29 W。由此可见,在实验设计此类拉曼激光器时,设计者需依据具体目的而采用相应的折衷:1)若设计者需要尽可能低的拉曼阈值,则应选取 ZBLAN 光纤长度 30 m 左右,输出镜反射率  $R_{\text{out}}^1$  尽可能高;2)若设计者要求获得尽可能大的拉曼输出功率,则应选取图8中列出的最优组合参数。

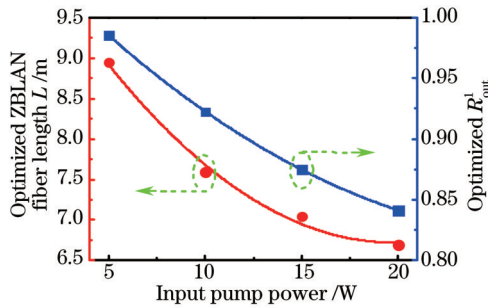


图8 不同抽运功率情况的最优组合( $L, R_{\text{out}}^1$ )

Fig.8 Optimized combinations ( $L, R_{\text{out}}^1$ ) for different pump powers

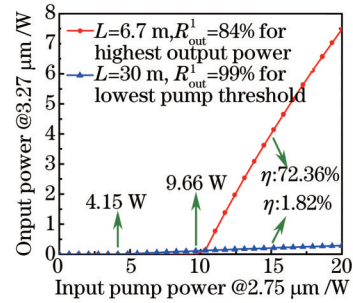


图9  $3.27 \mu\text{m}$  一级拉曼激光输入输出功率关系曲线

Fig.9  $3.27 \mu\text{m}$  1st-order Raman output power versus input pump power

#### 4 4.035 $\mu\text{m}$ ZBLAN 光纤二级联拉曼激光器的数值优化

紧接着,对 ZBLAN 光纤二级拉曼激光器也将进行相应的优化设计,此时输出拉曼激光波长位于  $4.035 \mu\text{m}$ ,具体优化过程与上述  $3.27 \mu\text{m}$  一级拉曼类似。

##### 4.1 4.035 $\mu\text{m}$ 二级拉曼抽运阈值

图10给出了拉曼阈值随 ZBLAN 拉曼光纤长度  $L$  及输出镜  $\text{FBG}_{\text{out}}^2$  反射率  $R_{\text{out}}^2$  的变化情况。由图可见,随着  $L$  的增加,拉曼阈值先快速下降,然后缓慢上升,也存在最优 ZBLAN 光纤长度使拉曼阈值最小。在 ZBLAN 光纤长度在 2~6 m,输出镜反射率在 70%~99%范围内,拉曼阈值在 10 W 以下,尤其是  $R_{\text{out}}^2=95\%$ ,  $L=2.5$  m 时,拉曼阈值最低可达 7.70 W。另外,对比图10和图4,要使拉曼阈值较低,二级拉曼激光器所需要的 ZBLAN 光纤长度比一级拉曼激光器明显小很多,同时二级拉曼阈值比一级拉曼阈值更高,这主要因为 ZBLAN 光纤在  $4.035 \mu\text{m}$  的损耗远大于在  $3.27 \mu\text{m}$  的损耗。

图11给出了 ZBLAN 光纤长度为 10、15、20 m 时,输出镜  $\text{FBG}_{\text{out}}^2$  反射率  $R_{\text{out}}^2$  对拉曼阈值的影响。随着  $R_{\text{out}}^2$  增大,拉曼阈值逐渐减小。 $L=2$  m,  $R_{\text{out}}^2=99\%$  时,最低拉曼阈值可达 7.61 W;  $L=10$  m,  $R_{\text{out}}^2=99\%$  时,最低拉曼阈值可达 10.61 W;  $L=15$  m,  $R_{\text{out}}^2=99\%$  时,最低拉曼阈值可达 13.95 W。

综合图10和图11可知,为获得低阈值  $4.035 \mu\text{m}$  二级级联拉曼激光,ZBLAN 光纤长度应在 2~6 m 范围

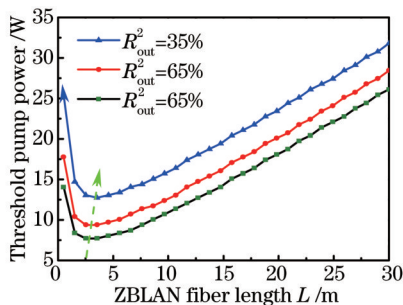


图10 二级拉曼阈值随 ZBLAN 拉曼光纤长度  $L$  的变化

Fig.10 2nd-order threshold pump power as a function of ZBALN fiber length  $L$

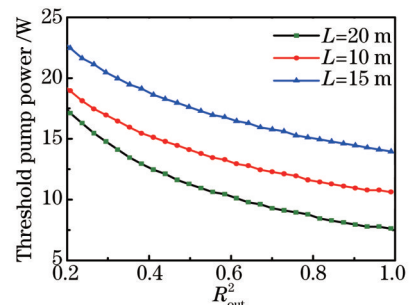


图11 二级拉曼阈值随输出镜反射率  $R_{\text{out}}^2$  的变化

Fig.11 2nd-order threshold pump power as a function of the output-mirror reflectivity  $R_{\text{out}}^2$

内选择,输出镜反射率  $R_{\text{out}}^2$  应越高越好。

#### 4.2 优化 4.035 $\mu\text{m}$ 二级拉曼输出功率

对 4.035  $\mu\text{m}$  二级拉曼激光器的输出功率进行优化。在抽运功率为 20 W 时,图 12 给出了二级拉曼输出功率随着 ZBLAN 光纤长度  $L$  及输出镜 FBG $_{\text{out}}^2$  反射率  $R_{\text{out}}^2$  的变化情况。由图 12(a)可知,在不同的  $R_{\text{out}}^2$  下,均存在最优光纤长度  $L$  使拉曼激光输出功率达到最大,最佳光纤长度范围是 1.5~2.4 m。当  $R_{\text{out}}^2=50\%$ ,  $L=2.24$  m 时,最大输出功率达到 3.13 W。由图 12(b)可知,随着  $R_{\text{out}}^2$  的增加,输出功率先增加至最大值,然后下降。在不同的 ZBLAN 光纤长度  $L$  下,均存在最优  $R_{\text{out}}^2$  使拉曼激光器的输出功率达到最大,最优反射率范围是 42%~60%。在  $L=2$  m,  $R_{\text{out}}^2=46.8\%$  时,最大输出功率可达 3.14 W。

依据上述对 ZBLAN 光纤长度  $L$  和输出镜反射率  $R_{\text{out}}^2$  的优化设计,选取  $L=2.2\text{m}$ 、 $R_{\text{out}}^2=50\%$  这对参数,以获得最大的拉曼输出功率;选取  $L=2.5$  m、 $R_{\text{out}}^2=95\%$  这对参数,以获得最低的拉曼阈值。图 13 给出了相应的输入输出功率关系曲线。由图可知,  $L=2.2$  m、 $R_{\text{out}}^2=50\%$  时,可以获得最大的输出功率 3.15 W,转换效率达 34.06%;  $L=2.5\text{m}$ 、 $R_{\text{out}}^2=95\%$  时,可以获得最低的拉曼阈值 6.90 W。相比 3.27  $\mu\text{m}$  一级拉曼激光,二级拉曼激光转换效率明显降低,其主要原因是:1) 二级拉曼激光(4.035  $\mu\text{m}$ )是由一级拉曼激光(3.27  $\mu\text{m}$ )抽运进而产生的,故此过程存在量子亏损;2) ZBLAN 光纤在一级拉曼波长(3.27  $\mu\text{m}$ )的损耗要远小于在二级拉曼波长(4.035  $\mu\text{m}$ )的损耗。

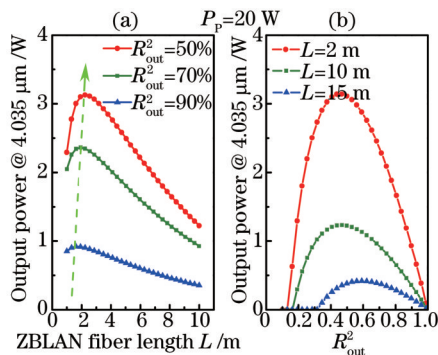


图 12 4.035  $\mu\text{m}$  二级拉曼输出功率随 (a) ZBLAN 光纤长度  $L$  及 (b) 输出镜反射率  $R_{\text{out}}^2$  的变化

Fig.12 4.035  $\mu\text{m}$  2nd-order Raman output power as a function of (a) ZBLAN fiber length  $L$  and (b) the output-mirror reflectivity  $R_{\text{out}}^2$

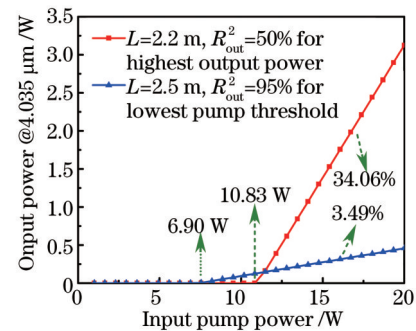


图 13 4.035  $\mu\text{m}$  二级拉曼激光输入输出功率关系曲线  
Fig.13 4.035  $\mu\text{m}$  2nd-order Raman output power versus input pump power

## 5 结 论

提出并数值研究了 3~5  $\mu\text{m}$  中红外 ZBLAN 光纤拉曼激光器。在 2.75  $\mu\text{m}$  掺 Er 激光抽运 ZBLAN 拉曼光纤情况下,通过一级/二级拉曼转换,可以分别获得 3.27  $\mu\text{m}$  和 4.035  $\mu\text{m}$  拉曼激光。通过 Newton-Raphson 算法求解非线性拉曼耦合方程组,对中红外 ZBLAN 光纤一级/二级拉曼激光器进行数值模拟及优化。结果表明,ZBLAN 光纤长度和输出镜反射率等参数对拉曼激光的阈值及输出功率均有较大的影响。在一级拉曼激光情况下,拉曼激光阈值随输出镜反射率增加而减小,存在最佳 ZBLAN 光纤长度范围 30~50 m,可获得最小拉曼阈值为 4.15 W;为获得最高拉曼输出功率,最优 ZBLAN 光纤长度应在 6.7~8.9 m 范围,最优输出镜反射率应在 84%~98% 范围,此时,最高斜率效率达 72.36%。在二级拉曼激光情况下,拉曼激光阈值也随输出镜反射率增加而减小,存在最佳 ZBLAN 光纤长度范围 2~6 m;为获得最高拉曼输出功率,最优 ZBLAN 光纤长度为 1.5~2.4 m,最优输出镜反射率为 42%~60%,此时,最高斜率效率达 34.06%。上述研究工作在一定程度上可为实验研究此类中红外拉曼激光器提供理论指导。

## 参 考 文 献

- 1 Dignonnet M J F. Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers[M]. Second Edition, Revised and Expanded. New

- York : Marcel Dekker, 2001.
- 2 Qi Wei, Liu Peng, Lu Helin, *et al.*. 1270 nm hybrid cascaded phosphosilicate fiber Raman laser[J]. Chinese J lasers, 2013, 40(3): 0302008.  
漆伟, 刘鹏, 卢和林, 等. 1270 nm 混合级联掺磷光纤拉曼激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0302008.
  - 3 Huang Chaohong, Wei Dong, Lin Jiali, *et al.*. High power 1.48  $\mu\text{m}$  home-made phosphosilicate fiber cascaded Raman laser[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(s2): 33-36.  
黄朝红, 魏栋, 林佳丽, 等. 高功率 1.48  $\mu\text{m}$  国产掺磷光纤级联拉曼激光器[J]. 中国激光, 2008, 35(s2): 33-36.
  - 4 Qin Zujun, Zhou Xiaojun, Wu Haocheng, *et al.*. Design of multi-wavelength cascaded Raman fiber lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 244-248.  
秦祖军, 周晓军, 伍浩成, 等. 多波长级联拉曼光纤激光器的设计[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 244-248.
  - 5 Luo Z Q, Ye C C, Fu H Y, *et al.*. Raman fiber laser harmonically mode-locked by exploiting the intermodal beating of CW multimode pump source[J]. Opt Express, 2012, 20(18): 19905-19911.
  - 6 IPG Photonics. Mid-infrared lasers[OL]. <http://www.ipgphotonics.com>. 2013-9-2.
  - 7 Ehrenreich T, Leveille R, Majid I, *et al.*. 1-kW, all-glass Tm: fiber laser[C]. SPIE, 2010, 7580: 758016.
  - 8 Bian J, Nie J, Sun X. Mid-infrared laser technology and its progress[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(S3): 188-193.
  - 9 Meng Wang, Lixia Yi, Liyan Zhang, *et al.*. 2  $\mu\text{m}$  fluorescence and Raman spectra in high and low  $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$  content fluorophosphate glasses doped with Er-Tm-Ho[J]. Chin Opt Lett, 2009, 7(11): 1035-1037.
  - 10 H Többen. Room temperature cw fibre laser at 3.5  $\mu\text{m}$  in  $\text{Er}^{3+}$ -doped ZBLAN glass[J]. Electron Lett, 1992, 28(14): 1361-1362.
  - 11 Fortin V, Bernier M, Faucher D, *et al.*. 3.7 W fluoride glass Raman fiber laser operating at 2231 nm[J]. Opt Express, 2012, 20(17): 19412-19419.
  - 12 Fortin V, Bernier M, Carrier J, *et al.*. Fluoride glass Raman fiber laser at 2185 nm[J]. Opt Lett, 2011, 36(21): 4152-4154.
  - 13 Bernier M, Fortin V, Caron N, *et al.*. Mid-infrared chalcogenide glass Raman fiber laser[J]. Opt Lett, 2013, 38(2): 127-129.
  - 14 Jackson S. High-power and highly efficient diode-cladding-pumped holmium-doped fluoride fiber laser operating at 2.94  $\mu\text{m}$  [J]. Opt Lett, 2009, 34(15): 2327-2329.
  - 15 Jackson S. Continuous wave 2.9  $\mu\text{m}$  dysprosium-doped fluoride fiber laser[J]. Appl Phys Lett, 2003, 83(7): 1316-1318.
  - 16 Li J, Hudson D D, Jackson S D, *et al.*. High-power diode-pumped fiber laser operating at 3  $\mu\text{m}$  [J]. Opt Lett, 2011, 36(18): 3642-3644.
  - 17 Jackson S, Sánchez G A. Chalcogenide glass Raman fiber laser[J]. Appl Phys Lett, 2006, 88(22): 221106.
  - 18 Fiber Labs. ZBLAN fiber for NIR/IR spectroscopy[OL]. [http://fiberlabs-inc.com/fiber\\_technology.htm](http://fiberlabs-inc.com/fiber_technology.htm). 2013-9-2.
  - 19 Tokita S, Murakami M, Shimizu S, *et al.*. Liquid-cooled 24 W mid-infrared Er:ZBLAN fiber laser[J]. Opt Lett, 2009, 34(20): 3062-3064.
  - 20 Tokita S, Hirokane M, Murakami M, *et al.*. Stable 10 W Er:ZBLAN fiber laser operating at 2.71~2.88  $\mu\text{m}$  [J]. Opt Lett, 2010, 35(23): 3943-3945.
  - 21 Tokita S, Murakami M, Shimizu S, *et al.*. 12 W Q-switched Er:ZBLAN fiber laser at 2.8  $\mu\text{m}$  [J]. Opt Lett, 2011, 36(15): 2812-2814.
  - 22 Wei C, Zhu X, Norwood R, *et al.*. Passively Q-switched 2.8  $\mu\text{m}$  nanosecond fiber laser[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2012, 24(19): 1741-1744.
  - 23 Li Jianfeng, Ou Zhonghua, Dai Zhiyong, *et al.*. Theoretical analysis and design of mid-infrared ZBLAN fiber Raman laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(8): 1432-1437.  
李剑峰, 欧中华, 代志勇, 等. 中红外 ZBLAN 光纤拉曼激光器的理论分析与设计[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(8): 1432-1437.
  - 24 Luo H, Li J F. Numerical modeling and optimization of mid-infrared fluoride glass Raman fiber lasers pumped by  $\text{Tm}^{3+}$ -doped fiber laser[J]. IEEE Photonics Journal, 2011, 5(2): 2700211.
  - 25 Qin G, Huang S, Feng H. Power scaling of  $\text{Tm}^{3+}$  doped ZBLAN blue upconversion fiber lasers modeling and experiments [J]. J Appl Phys, 2006, B(82): 65-70.
  - 26 M Rini, I Cristiani, V Degiorgio. Numerical modeling and optimization of cascaded CW raman fiber lasers[J]. IEEE Quantum Electron, 2000, 36(10): 1117-1122.
  - 27 Huang Jiafu, Huang Chaohong, Cai Zhiping, *et al.*. Numerical simulation and optimization for the bilateral pumping P-doped Raman fiber laser[J]. Journal of Xiamen University, 2008, 47(2): 164-168.  
黄嘉福, 黄朝红, 蔡志平, 等. 双端抽运掺磷光纤拉曼激光器的数值模拟及优化[J]. 厦门大学学报, 2008, 47(2): 164-168.