

·测试、试验与仿真·

## 一种基于相移光栅的光纤激光器的仿真分析

贾曼, 刘超, 吴良英

(北京交通大学 全光网与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

**摘要:**相移光栅作为窄带宽透射型滤波器件在光纤激光器设计中有很高的应用价值。研究了基于啁啾相移光栅的环形腔掺铒光纤激光器的仿真模型。利用传输矩阵法仿真了啁啾相移光栅的传输谱,并对行波速率方程进行数值化模拟,得到了激光器工作时,掺铒光纤上能级粒子数、输出激光功率时域变化以及输出激光频谱。仿真采用功率为0.3 W的980 nm泵浦源得到了输出约为0.078 W,带宽为0.02 nm的连续光输出。同时,详细分析了输出激光功率随泵浦功率和输出耦合比的变化情况。仿真结果表明,输出激光功率随泵浦功率呈线性变化,存在一个最优的输出耦合比值使输出光功率值最大。

**关键词:**啁啾相移光栅;环形腔掺铒光纤激光器;行波速率方程

中图分类号:TN248 文献标识码:A 文章编号:1673-1255(2015)-05-0063-04

## Simulation Analysis of Fiber Laser Based on Phase Shifted Grating

JIA Man, LIU Chao, WU Liang-ying

(Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

**Abstract:** The simulation model of a ring Er-doped fiber laser based on chirped phase shifted fiber Bragg grating (CPSFBG) is researched. The transmission spectrum of CPSFBG is obtained through transmission matrix method and traveling wave rate equation is performed numerically to obtain Er-doped fiber up-level particle number, output laser power time domain variation and output laser spectrum during laser operation. The pumping source with 0.3 W power and 980 nm is used to obtain the continuous laser output with 0.078 W output and 0.02 nm bandwidth. The output laser power linearly changing with the ratio of pumping power and output coupling is analyzed in detail. Simulation results show that output laser power changes linearly with pumping laser power and there is an optimal output coupling ratio to realize the maximum laser power.

**Key words:** chirped phase shifted fiber Bragg grating; Er-doped ring fiber laser; traveling wave rate equation

为满足未来光通信中对光源线宽及频率稳定性要求,能够输出窄线宽的光纤激光器一直为人们所追求。采用光纤光栅元件组成谐振腔进行选频和反馈,得到的输出光单色性好,线宽窄。近年来,相移光栅由于其出色的选频作用得到越来越多的关注。2010年,南京邮电大学的蔡晓峰设计了一种基于相移光栅的保偏光纤激光器,实现了单频单偏振及具有开关性能的双波长输出<sup>[1]</sup>。2011年,北京交通大学的闫东川利用一个均匀布拉格光栅和一

个相移光纤光栅组成滤波器制作了一种新型环形腔光纤激光器<sup>[2]</sup>。2012年,天津理工大学的姜俊英利用一对光纤光栅等效为相移光栅,直接将其刻写在掺铒光纤上得到了DFB光纤激光器<sup>[3]</sup>。同时,也有许多新的制作相移光栅的方法<sup>[4-5]</sup>得到研究,日本静冈大学博士X Chen等人提出在线性啁啾布拉格光栅上黏贴压电陶瓷片,通过在压电陶瓷片上施加电压得到具有稳定、可调谐相移的啁啾相移光栅<sup>[6-7]</sup>,并利用其制作出了环形腔单纵模光纤激光

收稿日期:2015-09-11

作者简介:贾曼(1989-),女,河北省石家庄人,北京交通大学在读硕士研究生,主要研究方向为光纤激光器。

器。线性啁啾布拉格光栅比相移光栅具有更宽的带宽,其反射谱中可容纳更多的透射峰,更加适用在多波长滤波的场景中<sup>[8-9]</sup>。

对基于单相移点啁啾相移光栅的环形腔掺铒光纤激光器开展了理论与仿真研究,分析了1550 nm激光产生过程中掺铒光纤中上能级粒子密度、信号光功率时域变化情况、输出激光频谱及泵浦光功率和输出耦合比对输出激光的影响。

## 1 仿真模型及原理

图1给出了基于啁啾相移光栅的掺铒光纤激光器结构。该激光器由980 nm的泵浦源激励,增益介质是掺铒光纤,窄带滤波器由均匀布拉格光栅和啁啾相移光栅组合而成,利用隔离器在仿真时可以忽略反向自发辐射场。因为环形器的作用,只有波长在啁啾相移光栅的透射带与均匀布拉格光栅的反射带重叠部分的信号光才能继续在腔内传输。

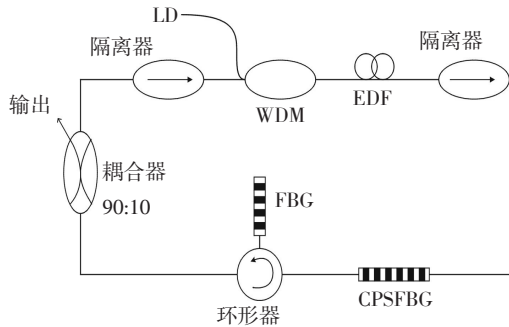


图1 掺铒光纤激光器结构图

图2a给出了在长度为1 cm的线性啁啾布拉格光栅中心处引入相移为 $\pi$ 的相移点后,啁啾相移光栅的传输谱。仿真波长范围在1548 nm与1552 nm之间,在1550 nm处光栅出现了明显的透射带,这说明引入了相移点的线性啁啾布拉格光栅具有了相移光栅的性质,并可作为滤波器进行选频工作,将啁啾相移光栅和均匀布拉格光栅组合可得到更窄的透射带。图2b给出了均匀布拉格光栅的传输谱,它具有很宽的反射谱。两光栅的纤芯有效折射率均为1.465。

图2c给出了以上两个光栅传输特性组合后得到的复合滤波器传输谱,经过均匀布拉格光栅的过滤,得到了边带影响较小的,透射带中心波长为1550 nm,3 dB带宽为0.15 nm的滤波器,这说明该复合滤波器理论上具有对频谱较窄的选频作用。

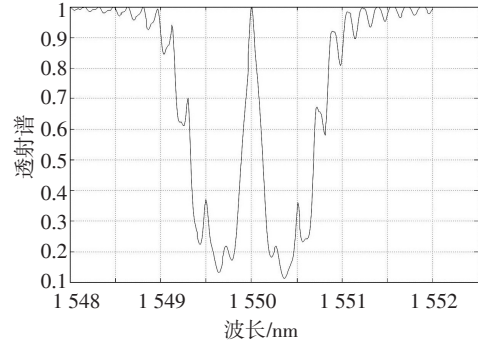


图2(a) 啁啾相移光栅的透射谱图

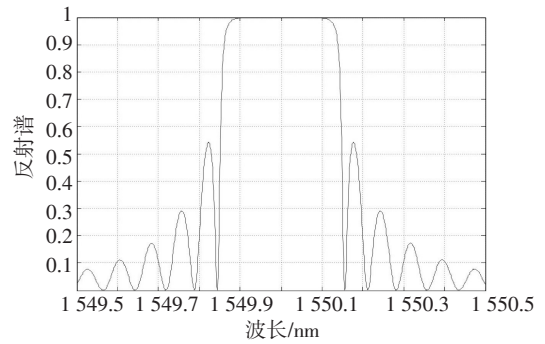


图2(b) 均匀布拉格光栅的反射谱

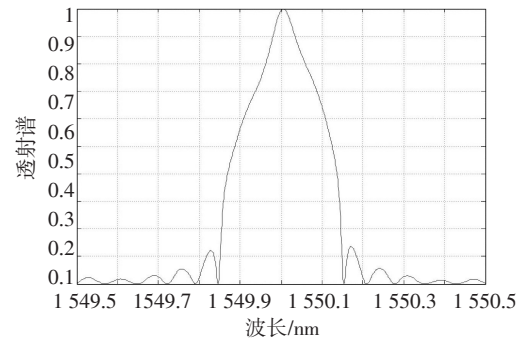


图2(c) 复合滤波器的传输谱

在波长为980 nm泵浦下,掺铒光纤激光器是三能级结构,且在980 nm波长处无受激吸收。文中采用分段迭代法对激光器时域进行仿真,思路如下。

将长度为 $L_{er}$ 的掺铒光纤平均分为 $K$ 段,每一段上的能级粒子数视为不变,每一段长度有: $\Delta z = L_{er}/K$ ,能级粒子数为 $n_{2,k}(t)$  ( $k=1,2\dots K$ )。

对掺铒光纤中自发辐射噪声(ASE)以间隔 $\Delta t = \Delta z/v_s$  取样,记为 $t_i = (i-1)\Delta t$ , ( $i=1,2\dots I$ )。在 $t=0$ 时刻,掺铒光纤的起点处有 $P_{(p,0)} = P_p$ ,每一圈结束后,泵浦功率仍赋值为 $P_p$ ,信号光 $P_{s,0} = P_{s,k}(1-\zeta) \cdot (1-cpration)$ ;  $\zeta$ 表示整个环形腔内的损耗; $cpration$

为耦合器输出分光比。

频域上,将谱宽均分为  $M$  个相等的频率间隔  $\Delta\nu$ , 所以对于第  $k$  段掺铒光纤, 在第  $i$  时刻, 上能级粒子数记为  $n_{2,k,i}$ , 泵浦功率为  $P_{p,(k-1),i}$ , 第  $m$  个频率间隔内 ASE 功率可记为:  $P_{ASE,(k-1),i,m}^*$  ( $k=1,2,\dots,K, i=1, \dots, I, m=1,2,\dots,M$ )。

从掺铒光纤输出的 ASE 场及泵浦光要经过隔离器、复合滤波器、耦合器, 一部分光从耦合器输出; 另一部分光在环形腔中循环多次而产生激光。

确定了掺铒光纤的初始值即可通过迭代的方法得到各时刻的场和功率的值。激光器的行波速率方程数值化<sup>[10]</sup>如下

$$n_{2,k,i+1} = n_{2,k,i} + \left[ W_{p,k,i}(n - n_{2,k,i}) - g_{k,i,m}W_{s,k,i} - \sum_{m=1}^M g_{k,i,m}W_{ASE,k,i,m} - \frac{n_{2,k,i}}{\tau} \right] \Delta t \quad (1)$$

$$P_{p,k+1,i+1} = P_{p,k,i} \times e^{-\Gamma_p \sigma_{pa}(N - N_{2,k,i}) \Delta z} \quad (2)$$

$$P_{s,k+1,i+1} = P_{s,k,i} \times e^{g_{k,i,s} \Delta z} \quad (3)$$

$$P_{ASE,k+1,i+1,m} = P_{ASE,k,i,m} \times e^{g_{k,i,m} \Delta z} + 2n_{sp,k,i,m} h\nu_m (e^{g_{k,i,m} \Delta z} - 1) \Delta\nu \quad (4)$$

$t=0$  时刻的初始条件为:  $n_{2,k1}=0$ ,  $P_{s,k1}=0$ ,  $P_{p,k1}=0$ ,  $P_{ASE,k1}=0$  ( $k=1,2,\dots,K$ )。

其中,

$$W_p = \frac{\Gamma_p \sigma_{pa}}{Ah\nu_p} \frac{P_{p,k-1,i} + P_{p,k,i}}{2} \quad (5)$$

$$W_{s,k,i} = \frac{1}{Ah\nu_s} \frac{P_{s,k-1,i} + P_{p,k,i}}{2} \quad (6)$$

$$W_{ASE,k,i,m} = \frac{1}{Ah\nu_m} \sum_{\xi=\pm} \frac{P_{ASE,k-1,i,m}^{\xi} + P_{ASE,k,i,m}^{\xi}}{2} \quad (7)$$

$$g_{k,i,m} = \Gamma_s \sigma_{se}(v_m) \{ [1 + \mu(v_m)] n_{2,k,i} - \mu(v_m) n \} \quad (8)$$

$\mu(v_m) = \frac{\sigma_{sa}(v_m)}{\sigma_{se}(v_m)}$ ;  $\Gamma_p$ 、 $\Gamma_s$  分别为泵浦和信号光功率重叠因子;  $\sigma_{pa}$  为泵浦光吸收面积;  $\sigma_{se}$ 、 $\sigma_{as}$  分别为信号光受激辐射面积和吸收截面面积;  $v_p$ 、 $v_s$  分别为泵浦光和信号光工作频率。仿真中,  $P_p=0.3 \text{ W}$ ;  $L_{er}=15 \text{ m}$ ;  $\Gamma_p=0.625$ ;  $\Gamma_s=0.5$ ;  $\sigma_{pa}=2 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ ;  $\sigma_{se}$ 、 $\sigma_{as}$  根据掺铒光纤中信号光波长决定; 掺铒光纤单位长度损耗  $2 \text{ db/km}$ ; 耦合器插入损耗为  $0.5 \text{ db}$ ,  $cpration=0.1$ ; 仿真时间  $2 \text{ ms}$ 。

## 2 仿真结果及分析

因为滤波器的透射窗口在波长  $1550 \text{ nm}$  附近, 决定了激光器的输出波长也应在  $1550 \text{ nm}$  附近, 因此图 3 给出了波长为  $1550 \text{ nm}$  的激光随时间的变化情况。图 3 表明, 在激光器输出激光的初段, 输出功率不稳定, 曲线呈阻尼震荡形状, 大约在  $t=1.3 \text{ ms}$  时, 激光才慢慢达到大小为  $0.078 \text{ W}$  稳定状态。这说明, 基于文中的激光器结构在理论上可输出激光, 并且从激光器开始运行到实现稳定输出是需要一定时间, 因此仿真时间的设定值一定要大于这个时间才能保证得到的功率是准确的。

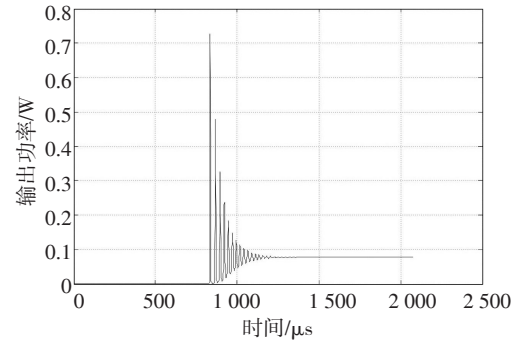


图 3 1550 nm 输出光功率随时间的变化

图 4 给出了激光产生过程中整段掺铒光纤中上能级粒子数密度  $n_2$  随时间的变化情况。  $n_2$  在掺铒光纤受到激励后的初始阶段, 线性增加。随后与输出功率一样出现弛豫振荡现象。图 3 和图 4 说明了激光的产生过程, 在  $t=0$  时, 上能级粒子数密度为 0, 泵浦光源不断地注入掺铒光纤中, 处于基态的铒离子因受激吸收不断地跃迁到上能级, 对应于图 4 的  $n_2$  线性变化区间与图 3 的无激光输出阶段, 随着上能级粒子数不断累积, 与基态之间形成粒子数反转, 反转达到一定程度, 处在上能级的粒子因受激辐射跃迁输出光, 且输出光越来越强的同时消耗上能级粒子数, 导致反转粒子数减少, 进而光强增加速度降低, 但同时又由于泵浦光的不断地注入, 反转粒子数又增加, 对应于图 4 中  $n_2$  及图 3 中激光功率的振荡过程。  $n_2$  经过一段时间的弛豫后, 最后大约在  $t=1.3 \text{ ms}$  时, 达到了稳定状态大约为  $9.84 \times 10^{23} / \text{m}^3$ , 同时实现了稳定的激光输出。

图 5 给出了激光器在稳定后激光输出功率频谱。图 5 说明, 文中的激光器结构在理论上可得到中心波长为  $1550 \text{ nm}$ , 线宽约为  $0.02 \text{ nm}$  的激光。

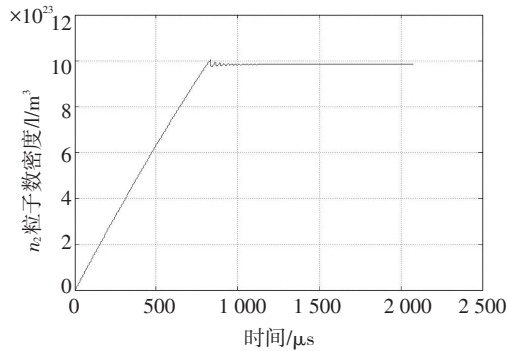
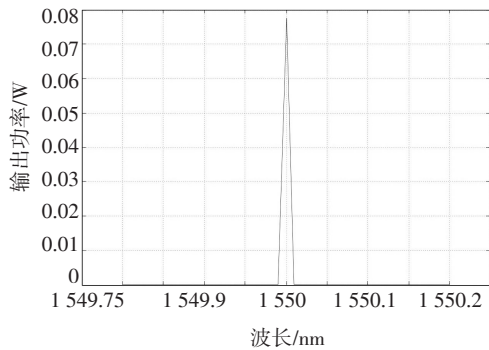
图4  $n_2$ 粒子数密度对时间的变化

图5 输出光功率随频率的变化

### 3 系统优化

为了得到文中激光器结构的最优输出结果,分析了泵浦功率以及输出耦合比对输出激光功率的影响,以便在实际制作中进行相应的调整。图6给出了在输出耦合比为0.1时,输出激光功率随泵浦功率的变化情况。在泵浦功率从0.3 W增加到2 W的变化过程中,输出激光功率与泵浦光功率基本呈线性关系。这是因为,激光器的斜率效率是由其基本结构决定的,斜率效率与泵浦功率没有关系。所以,在实际应用中,一般可以通过适当地提高泵浦功率来增加输出功率,但是由于泵浦光源本身以及光纤器件的功率限制,泵浦功率也不可无限增加。

图7给出了在泵浦功率为0.3 W时,输出激光功率随输出耦合比的变化情况。当输出耦合比在0.1~0.5之间增加时,输出光功率也随之增加,但增加的速率越来越慢,这是因为经过耦合器后,大部分信号光再次进入环形腔中循环产生激光,使得激光的功率得以增加。当输出耦合比从0.5增加到1的过

程中,输出功率随输出耦合比的增加而减小直至为0,且减小的速度越来越快,这是因为在环形腔中产生的激光大部分通过耦合器输出,剩下进入环形腔循环产生激光的信号光减少,使得输出激光的功率也降低了。这说明在激光器结构中存在着一个最佳

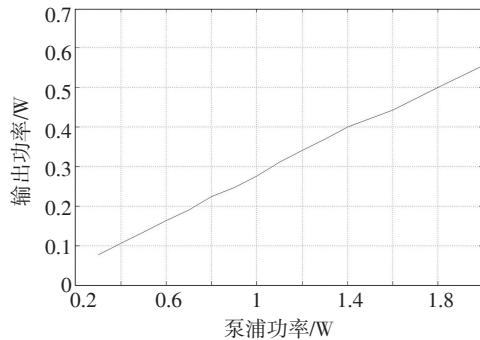


图6 输出激光功率随泵浦功率的变化

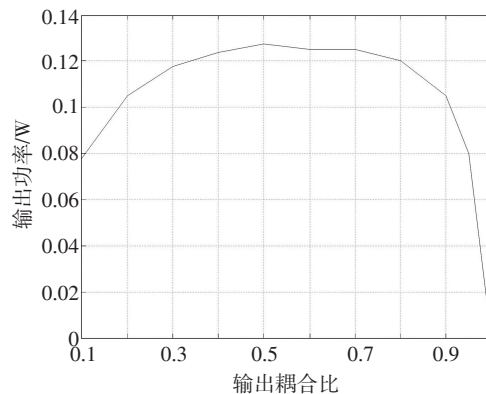


图7 输出功率随输出耦合比的变化

的输出耦合比,使得输出光功率达到最大。

### 4 结论

在线性啁啾布拉格光栅中心处引入 $\pi$ 相移,利用传输矩阵法仿真得到了具有窄透射带的啁啾相移光栅,并以此啁啾相移光栅为基础构成了光纤激光器。对光纤激光器仿真得到带宽为0.02 nm的连续激光输出。同时,对泵浦功率和输出耦合比对输出激光的影响说明,输出激光功率随泵浦光功率呈线性变化,且存在一个最优的输出耦合比使输出激光功率值最大。文中的研究对于以后制作基于啁啾相移光纤光栅的环形腔多波长光纤激光器的设计和制作提供了参考。

(下转第78页)

## 参考文献

- [1] 肖静,张彬. 光学元件污染对红外光学系统信噪比的影响分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 1010-1016.
- [2] 孙腾飞,张骏,吕海兵,等. 光学镜面污染对激光传输特性的影响[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1444-1448.
- [3] 孙腾飞,曹增辉,郑田甜,等. 镜面颗粒影响激光散射特性的模拟仿真[J]. 光电技术应用, 2013, 28(5): 69-72.
- [4] SUN Teng-fei, ZHANG Jun, LV Hai-bing, et al. Influence of optical mirror surface cleanliness levels on laser transmission characteristics[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(3): 1-5.
- [5] Mcguire A F, Hapke B W. An experimental study of light scattering by large irregular particles[J]. Icarus, 1995, 113(1): 134-155.
- [6] SPYAK P R, WOLFE W L. Scattering from particulate-contaminated mirrors. Part 1: theory and experiment for polystyrene spheres and  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$  [J]. Optical Engineering, 1992, 31(8): 1746-1756.
- [7] SPYAK P R, WOLFE W L. Scattering from particulate-contaminated mirrors. Part 2: theory and experiment for dust and  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$  [J]. Optical Engineering, 1992, 31(8): 1757-1763.
- [8] SPYAK P R, WOLFE W L. Scattering from particulate-contaminated mirrors. Part 3: theory and experiment for dust and  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$  [J]. Optical Engineering, 1992, 31(8): 1764-1774.
- [9] SPYAK P R, WOLFE W L. Scattering from particulate-contaminated mirrors. Part 4: properties of scatter from dust for visible to far-infrared wavelengths[J]. Optical Engineering, 1992, 31(8): 1775-1784.
- [10] Yong R P. Low-scatter degradation by particle contamination[J]. Optical Engineering, 1976, 15(6): 516-520.
- [11] KERKER M. The scattering of light and other electromagnetic radiation[M]. Academic Press, New York, 1969.
- [12] Bohren C F, Huffman D R. Absorption and scattering of light by small particles[M]. New York: John Wiley & Sons, 1983.

(上接第66页)

## 参考文献

- [1] 蔡晓峰. 基于相移光栅的掺铒光纤的掺铒光纤激光器研究[D]. 南京:南京邮电大学, 2010.
- [2] 闫东川. 基于相移光栅的掺铒光纤激光器研究[D]. 北京:北京交通大学, 2011.
- [3] 姜俊英. 基于相移光栅双波长窄线宽光纤激光器的研究[D]. 天津:天津理工大学, 2012.
- [4] 朱清,陈小宝,陈建平. 相位掩模板移动法制作DFB光纤激光器[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2006, 1(1): 17-21.
- [5] 王利,陈柏,陈嘉琳. 一种制作掺Yb相移光纤光栅激光器的实验方法[J]. 中国激光, 2007, 12(34): 1617-1620.
- [6] CHEN Xu-xing, Painchaud Yves. Phase shifts induced by the piezoelectric transducers attached to a linearly chirped fiber Bragg grating[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(14): 2017-2022.
- [7] XIAN Lun-lun, LI Hong-pu. Calibration of a phase-shift formed in a linearly chirped fiber Bragg grating and its thermal effect[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(8): 1185-1190.
- [8] LU S H, XU O, FENG S, et al. Design and application of optical filters based on chirped phase-shifted fiber gratings [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(9): 1675-1680.
- [9] L Shao-hua, X Ou, D Xiao-wei, et al. Analysis for the reflective spectrum characteristics of chirped phase-shifted fiber gratings[J]. Chinese J. Lasers, 2008, 35(4): 577-581.
- [10] 陈根祥. 光纤通信技术基础[M]. 北京:高等教育出版社, 2010: 234.

## 本刊声明

《光电技术应用》期刊因故通信地址变更为天津市空港经济区纬五道9号, 300000。因相关手续正在办理中, 现暂用旧的通信地址和邮发代号, 即辽宁省锦州市31号信箱19分箱, 121000, 原邮发代号8-314。

特此声明。

《光电技术应用》编辑部