

·激光技术·

## JW20120826 光纤光栅激光器的优化设计

邴 亮, 宁提纲, 张 帆

(北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

**摘 要:**输出功率和斜率效率是衡量光纤激光器输出特性的两个重要的参数,它们反映了光纤激光器的光—光转换能力。利用matlab仿真工具对双包层DBR掺镱( $\text{Yb}^{3+}$ )激光器的结构参数对激光输出特性的影响进行了数值模拟,得出光纤长度、腔镜反射率和激光器的输出特性之间的关系,并对激光器的参数选择提出了优化说明。

**关键词:**双包层掺镱激光器;输出功率;斜率效率

中图分类号:TN248

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2012)05-0022-05

## Optimization Design of JW20120826 Fiber Grating Laser

BING Liang, NING Ti-gang, ZHANG Fan

(Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Output power and slop efficiency are two important parameters of fiber laser output characteristics, which presents the light to light transfer characteristic of fiber laser. Parameters of double cladding DBR doped Yttrium laser influenced on the laser output characteristics are numerically simulated by matlab. The relationship among fiber length, cavity mirrors reflectivity and laser output characteristics are obtained. And optimization scheme of laser parameter selection is proposed.

**Key words:** double cladding doped yttrium laser; output power; slope efficiency

光纤激光器是光纤通信中具有发展前景的一种光源。与其他传统的激光器相比,光纤激光器具有许多独特的优点<sup>[1,2]</sup>。光纤激光器和其他类型的激光器一样,由工作物质、泵浦源和光学谐振腔三部分组成。其中,光纤激光器的工作物质是同时起着波导作用的掺杂光纤。一般情况下,光纤激光器的泵浦方式为光泵浦。泵浦光通过光学耦合系统进入光纤,被掺杂光纤内的增益介质吸收,形成增益介质的粒子数反转,进而产生自发辐射,这种自发辐射在光纤激光器的光学谐振腔作用下最终变成稳定而持续的受激辐射而输出激光。光纤激光器的谐振腔一般是由布喇格光纤光栅(fiber bragg grating, FBG)构成腔镜,所产生的激光信号在谐振

腔中以导波模式传输<sup>[3]</sup>。光纤激光器有着巨大的优势:输出光束质量好、体积小、无需冷却或是冷却结构简单、能量转化效率高,这大大降低了运行成本,使其获得了飞速发展<sup>[4]</sup>。

### 1 双包层掺镱激光器

激光的产生是一个放大的过程。在这个过程中受激辐射所占的比例远大于自发辐射。最初诱发受激辐射的光子源于自发辐射,当存在增益条件的时候,受激辐射所产生的光子继续诱发受激辐射,使受激辐射光不断增强。对于激光波长,流出光纤激光器介质的光子流要大于进入这段光纤的

收稿日期:2012-08-13

基金项目:高等学校博士学科点新教师专项科研基金(20100009120002)

作者简介:邴亮(1986-),男,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,研究方向为光纤激光器。

光子流,即实现了光放大<sup>[5]</sup>。

目前所应用的光纤激光器主要采用掺杂稀土元素的光纤作为增益介质,当采用合适的泵浦源进行泵浦时,掺杂光纤中的稀土离子会吸收泵浦光的能量而产生能级跃迁,实现粒子数反转,反转后的粒子经过弛豫后以辐射的形式从激发态跃迁回到基态,同时释放一个光子。因此在适当加入反馈回路(构成谐振腔)便可形成激光振荡<sup>[6]</sup>,从而达到输出激光的目的。

现在大多数光纤激光器都采用双包层结构的

光纤作为传输介质。双包层光纤激光器的典型结构如图1所示<sup>[7]</sup>。在双包层光纤激光器中,内包层与掺稀土离子的纤芯构成单模光纤,同时它又与外包层构成了传输泵浦光的多模光波导<sup>[8,9]</sup>。因此,泵浦光不必直接耦合进入纤芯中,而只要先耦合进入到包围在纤芯外部的内包层中,而后在沿着双包层光纤传输过程中,泵浦光能够从多模的内包层多次穿越纤芯,被纤芯中的掺稀土元素吸收,从而得到稳定的激光输出。

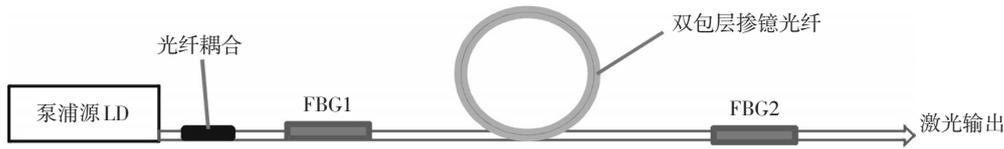


图1 双包层掺镜激光器的结构

如图1所示,由泵浦源产生波长较短,频率较高的泵浦光通过耦合系统进入到双包层光纤的前端,经过光纤前端的第一光纤光栅(FBG1)进入有着大数值孔径的内包层,并沿着双包层光纤传输,在传输过程中激发掺杂纤芯中的Yb<sup>3+</sup>离子产生受激跃迁,并形成粒子数反转,在达到形成激光振荡所需要的条件后,从光纤的另一端经过第二光纤光栅(FBG2)输出激光。第一光纤光栅用于将后向的激光反射回光纤中去,因此,需要比较高的反射率,一般在95%以上,第二光纤光栅的作用是把剩余的泵浦激光反射回到光纤包层中去继续参与泵浦,并反射部分信号激光回到光纤纤芯继续参与激光振荡,进行谐振放大,并输出特定波长激光,因此需要比较低的反射率。第一、第二光栅均为布喇格光纤光栅。

对于掺Yb<sup>3+</sup>光纤激光器,泵浦LD的中心波长一般为915 nm或975 nm。915 nm处的吸收谱较宽,对LD的波长控制要求不严格,但是,915 nm处的吸收截面小,同时产生激光的量子效率相对较低;975 nm处的吸收谱比较窄,对LD波长的要求较高。但是975 nm的吸收截面大约是915 nm吸收截

面的3倍,激光器的量子效率也相对较高。因此,目前大多采用975 nm的LD作为泵浦源<sup>[8]</sup>。

## 2 速率方程

激光器的速率方程是表征激光器谐振腔内光子数和工作物质各有关能级上的原子数随时间变化的微分方程组。激光的输出特性可以通过速率方程得到。目前光纤激光器均采用LD作泵浦源,因此只考虑泵浦光和激光输出线宽均很窄的情况。对于如图2所示的掺Yb<sup>3+</sup>端面泵浦双包层光纤激光器,其速率方程可以简化为如下形式

$$\frac{dP_p^+(z)}{dz} = -\Gamma_p [\sigma_{ap} N - (\sigma_{ap} + \sigma_{ep}) N_2(z)] \cdot P_p^+(z) - \alpha_p P_p^+(z) \quad (1)$$

$$\frac{dP_p^-(z)}{dz} = \Gamma_p [\sigma_{ap} N - (\sigma_{ap} + \sigma_{ep}) N_2(z)] \cdot P_p^-(z) + \alpha_p P_p^-(z) \quad (2)$$

$$\frac{dP_s^+(z)}{dz} = \Gamma_s [(\sigma_{es} + \sigma_{as}) N_2(z) - \sigma_{as} N] P_s^+(z) + \Gamma_s \sigma_{es} N_2(z) P_0 - \alpha_s P_s^+(z) \quad (3)$$



图2 端面泵浦光纤激光器示意图

$$\frac{dP_s^-(z)}{dz} = -\Gamma_s [(\sigma_{es} + \sigma_{as})N_2(z) - \sigma_{as}N]. \quad (4)$$

$$P_s^-(z) - \Gamma_s \sigma_{es} N_2(z) P_0 - \alpha_s P_s^-(z) = \frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)]\sigma_{ap}\Gamma_p}{h\nu_p A_c} + \frac{[P_s^+(z) + P_s^-(z)]\Gamma_s \sigma_{as}}{h\nu_s A_c} - \frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)](\sigma_{ap} + \sigma_{ep})\Gamma_p}{h\nu_p A_c} + \frac{1}{\tau} + \frac{[P_s^+(z) + P_s^-(z)](\sigma_{es} + \sigma_{as})\Gamma_s}{h\nu_s A_c} \quad (5)$$

对式(5)进一步处理

$$\frac{N_2(z)}{N} = \frac{\frac{P_p^+(z) + P_p^-(z)}{P_{p,sat}} \cdot \frac{\sigma_{ap}}{\sigma_{ap} + \sigma_{ep}} + \frac{P_s^+(z) + P_s^-(z)}{P_{s,sat}} \cdot \frac{\sigma_{as}}{\sigma_{es} + \sigma_{as}}}{\frac{P_p^+(z) + P_p^-(z)}{P_{p,sat}} + 1 + \frac{P_s^+(z) + P_s^-(z)}{P_{s,sat}}} \quad (6)$$

式(1)~式(4)分别描述了光纤不同位置处前后向泵浦光功率  $P_p^+(z)$ 、 $P_p^-(z)$  以及前后向传输激光功率  $P_s^+(z)$ 、 $P_s^-(z)$  的变化规律。式(6)描述光纤不同位置处增益介质  $\text{Yb}^{3+}$  的上能级粒子浓度  $N_2(z)$  和前、后向泵浦光功率  $P_p^+(z)$ 、 $P_p^-(z)$  以及前、后向传输激光功率  $P_s^+(z)$ 、 $P_s^-(z)$  之间的关系。其中,  $N$  为纤芯中增益介质  $\text{Yb}^{3+}$  的掺杂浓度;  $A_c$  为纤芯横截面积;  $\Gamma_p$  和  $\Gamma_s$  分别是掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤对泵浦光和激光的功率填充因子。  $\sigma_{ap}$  和  $\sigma_{ep}$  分别是泵浦光的吸收截面和发射截面,  $\sigma_{as}$  和  $\sigma_{es}$  是激光的吸收截面和发射截面,  $\tau$  是  $\text{Yb}^{3+}$  离子上能级平均寿命,  $h$  是普朗克常数,  $\nu_p$  和  $\nu_s$  分别是泵浦光和激光的频率,  $\alpha_p$  和  $\alpha_s$  分别是双包层光纤对泵浦光和激光的散射损耗,  $P_{s,sat} = h\nu_s A_c [\tau \Gamma_s (\sigma_{es} + \sigma_{as})]$  为饱和激光输出功率,  $P_{p,sat} = h\nu_p A_c [\tau \Gamma_p (\sigma_{ep} + \sigma_{ap})]$  为饱和泵浦功率。

由式(1)~式(2)可以得到

$$\frac{dP_p^+(z)}{P_p^+(z)} = [-\Gamma_p \sigma_{ap} N + \Gamma_p (\sigma_{ap} + \sigma_{ep}) N_2(z) - \alpha_p] dz \quad (7)$$

$$\frac{dP_p^-(z)}{P_p^-(z)} = [\Gamma_p \sigma_{ap} N - \Gamma_p (\sigma_{ap} + \sigma_{ep}) N_2(z) + \alpha_p] dz \quad (8)$$

由式(3)~式(4)可以得到激光器的增益

$$G_s = (\sigma_{es} + \sigma_{as}) \Gamma_s \int_0^L N_2(z) dz - (\sigma_{as} \Gamma_s N + \alpha_s) L \quad (9)$$

对式(7)和式(8)两边分别在谐振腔长度  $L$  上积分

$$\ln \left( \frac{P_p^+(L)}{P_p^+(0)} \right) = \ln \left( \frac{P_p^-(L)}{P_p^-(0)} \right) = -N \Gamma_p \sigma_{ap} L + (\sigma_{ap} + \sigma_{ep}) \int_0^L N_2(z) dz - \alpha_p L \quad (10)$$

对于线性腔激光器稳定输出条件为

$$R_1 R_2 \exp(2G_s) = 1 \quad (11)$$

式中,  $R_1$ 、 $R_2$  分别为 FBG1、FBG2 对激光的反射率。现定义

$$-\psi = \ln \left( \frac{P_p^+(L)}{P_p^+(0)} \right) = \ln \left( \frac{P_p^-(L)}{P_p^-(0)} \right) \quad (12)$$

由式(9)~式(11)可以得到

$$-\psi = \frac{(\sigma_{ap} + \sigma_{ep}) \Gamma_p}{(\sigma_{as} + \sigma_{es}) \Gamma_s} \left[ (N \Gamma_s \sigma_{as} + \alpha_s) L + \ln \left( \frac{1}{R_1 R_2} \right) \right] - (N \Gamma_p \sigma_{ap} + \alpha_p) L \quad (13)$$

考虑线性谐振腔的边界条件为

$$P_p^+(0) = P_p^l \quad (14)$$

$$P_p^-(L) = P_p^r \quad (15)$$

$$P_s^+(0) = R_1 P_s^-(0) \quad (16)$$

$$P_s^-(L) = R_2 P_s^+(L) \quad (17)$$

式中,  $P_p^l$ 、 $P_p^r$  分别是前、后两个端面注入双包层光纤内包层的泵浦功率。由上述算式联立,并在激光器谐振腔的长度  $L$  上积分,可以得到

$$P_s^+(L) = \frac{\sqrt{R_1} \cdot P_{s,sat}}{(1-R_1)\sqrt{R_2} + (1-R_2)\sqrt{R_1}} \cdot \left[ (1 - \exp(-\psi)) \frac{\nu_s}{\nu_p} \cdot \frac{P_p^+(0) + P_p^-(L)}{P_{s,sat}} - (N \Gamma_s \sigma_{as} + \alpha_s) L - \ln \left( \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}} \right) \right] \quad (18)$$

因此激光器的输出功率为

$$P_{out} = \frac{(1-R_2)\sqrt{R_1} P_{s,sat}}{(1-R_1)\sqrt{R_2} + (1-R_2)\sqrt{R_1}} \cdot \left[ \frac{\nu_s}{\nu_p} \cdot (1 - \exp(-\psi)) \frac{P_p^+(0) + P_p^-(L)}{P_{s,sat}} - (N \Gamma_s \sigma_{as} + \alpha_s) L - \ln \left( \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}} \right) \right] \quad (19)$$

光纤激光器的斜率效率  $\eta_s$  和阈值功率  $P_{th}$  可由下式计算得到

$$\eta_s = \frac{(1-R_2)\sqrt{R_1}}{(1-R_1)\sqrt{R_2} + (1-R_2)\sqrt{R_1}} \cdot \frac{\nu_s \cdot (1 - \exp(-\psi))}{\nu_p} \quad (20)$$

$$P_{th} = \frac{(NF_s\sigma_{as} + \alpha_s)L + \ln\left(\frac{1}{\sqrt{R_1R_2}}\right)}{1 - \exp(-\psi)} \cdot \frac{\nu_s}{\nu_p} \cdot P_{s,sat} \quad (21)$$

### 3 实验仿真

图3是采用泵浦光功率为5W,泵浦波长为975nm的前向泵浦方式,FBG1反射率为1,FBG2的反射率为0.2,光纤长度为20m,输出激光波长为1100nm时的光纤激光器输出特性曲线。

如图3所示,分别是光纤激光器中不同位置的光功率分布和粒子数反转分布。

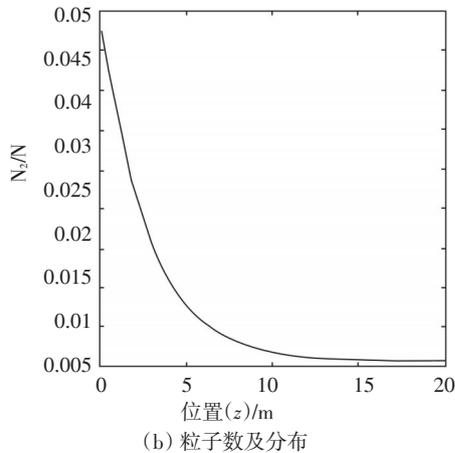
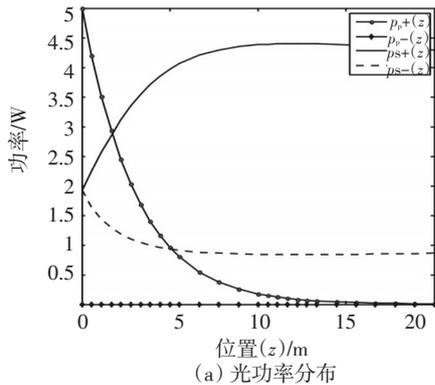


图3 光纤激光器的输出特性

(1)第二光纤光栅反射率对激光器特性的影响

设置参数如下:  $P_p^l = 5\text{ W}$ ,  $R_1 = 1$ ,  $L = 20\text{ m}$ , 改变上述光纤激光器的FBG2对激光的反射率  $R_2$ ,

可以得到在不同的  $R_2$  时激光器的输出功率和斜率效率,如图4所示。

由图4可知,在泵浦光功率和光纤长度不变的情况下,FBG2对激光反射率  $R_2$  的不同会导致激光输出功率的不同。当  $R_2$  较小时 ( $R_2 < 0.2$ ),激光器

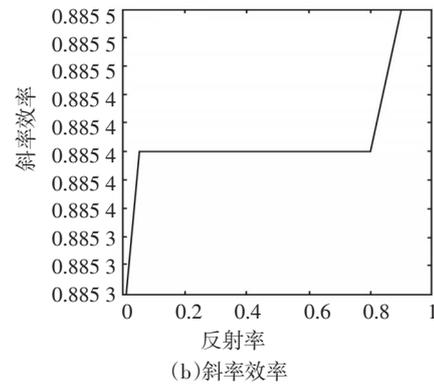
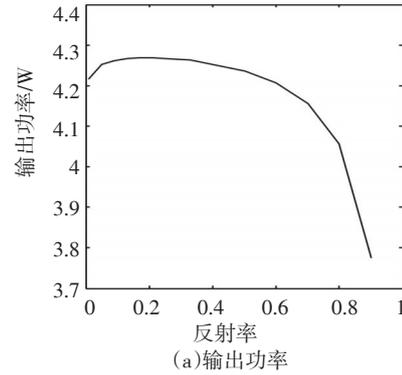


图4 不同光栅反射率的激光器输出特性

的输出功率随着  $R_2$  的增大而增大;当  $R_2$  较大 ( $R_2 > 0.2$ )时,激光器的输出功率随着  $R_2$  的增大而减小。在  $R_2 = 0.2$  时,激光器的输出功率达到最大值,此时的最大输出功率  $P_{max} = 4.2683\text{ W}$ ,此时,激光器的斜率效率  $\eta_s = 88.54\%$ 。但是随着  $R_2$  的增大,激光器的斜率效率基本保持不变,为  $88.54\%$  左右,始终保持较高的水平。由此可见,改变  $R_2$  的大小,只会影响到激光器的输出功率,并不会影响其斜率效率。根据以上分析,在确定腔镜对激光的反射率  $R_2$  的时候,只需要保证其输出功率最大,而可以忽略其对斜率效率的影响。

(2)双包层光纤长度对激光器特性的影响

设置参数如下  $P_p^l = 5\text{ W}$ ,  $R_1 = 1$ ,  $R_2 = 0.4$ , 改变上述光纤激光器的双包层掺杂光纤的长度,可以得到在不同的双包层光纤长度下,激光器的输出功率和斜率效率,如图5所示。

由图5可知,在泵浦光功率和光栅反射率  $R_2$  不

变的情况下,双包层光纤长度的不同会导致输出激光功率和斜率效率的不同。在光纤长度较短( $L < 15\text{ m}$ )时,激光器的输出功率随着双包层光纤长度的增加逐渐增大,并且变化明显;在光纤长度较长( $L > 15\text{ m}$ )时,输出功率随光纤长度的增加而逐渐变小;在 $L = 15\text{ m}$ 时,激光器的输出功率达到最大值。此时,最大输出功率 $P_{\max} = 4.2463\text{ W}$ ,激光

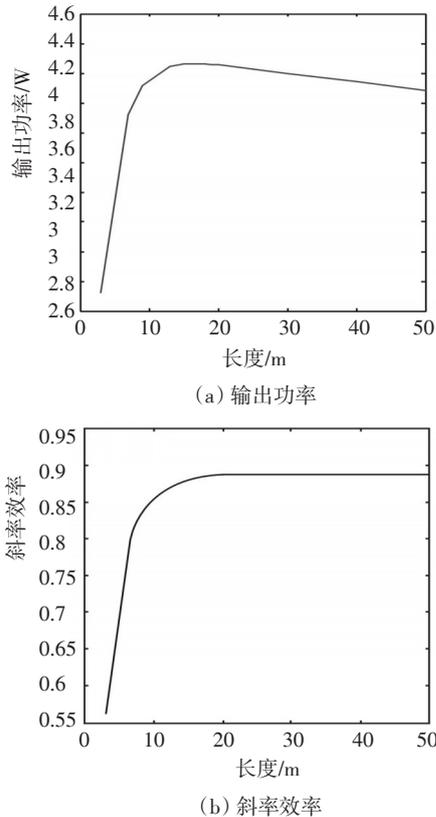


图5 不同光纤长度的激光器的输出特性

器的斜率效率 $\eta_s = 88.12\%$ 。从图5中还可以看到,在光纤长度较短时 $L < 20\text{ m}$ ,激光器的斜率效率随着双包层光纤长度的增加逐渐增大,并且变化明显;在 $L = 20\text{ m}$ 时达到最大值, $\eta_s = 88.63\%$ ;在 $L > 20\text{ m}$ 的情况下,随着双包层光纤的长度的增长,斜率效率不再变化,始终维持在最大值不变。根据以上分析,在选择光纤长度的时候,不能保证输出功率和斜率效率同时最大,但是在光纤长度 $15\text{ m} < L < 20\text{ m}$ 时,光纤长度的增长对斜率效率的增长影响很小。这样在参数选择的时候,就可以通过牺牲一小部分斜率效率来使激光器达到最大的功率输出。

## 4 结束语

利用matlab仿真工具,通过数值仿真的方法分别得到了双包层激光器的输出功率和斜率效率随FBG2的反射率 $R_2$ 和掺杂光纤长度 $L$ 之间的关系,对光纤激光器的参数选择做了优化说明。得到以下数据:在泵浦光功率和掺杂光纤长度一定的条件下,输出光功率随 $R_2$ 的增大先增大后减小。在 $R_2 = 0.2$ 时,激光器的输出功率达到最大值,此时的最大输出功率 $P_{\max} = 4.2683\text{ W}$ ,激光器的斜率效率 $\eta_s = 88.54\%$ 。在泵浦光功率和 $R_2$ 一定的条件下,激光输出功率随光纤长度的增长而变大,最后趋于不变,在 $L = 15\text{ m}$ 时,输出功率最大, $P_{\max} = 4.2463\text{ W}$ ;在 $L = 20\text{ m}$ 时斜率效率最大, $\eta_s = 88.63\%$ 。最后可以得出结论:对于光纤激光器来说,输出功率与腔镜反射率 $R_2$ 和光纤长度 $L$ 并不是线性的关系,而是存在一个最大值。在选择激光器参数的时候,就需要考虑主要因素,忽略次要因素,进行优化选择,才能使激光器工作在最佳状态。

## 参考文献

- [1] 申人升,张玉书,杜国同.光纤激光器研究进展[J]. 半导体光电,2009,30(1):1-5.
- [2] 谢玉彬,霍佳雨.光纤激光器及其应用[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [3] SUN Jun qiang, YUAN Xiuhua, ZHANG Xin liang, et al. Single longitudinal mode fiber ring laser using fiber grating-based Fabry-Perot filters and variable saturable absorbers [J]. Optics Communications, 2006, 267(1): 177-181.
- [4] Joseph C Palas. Fiber Optic Communication[M]. 5版.北京:电子工业出版社,2006.
- [6] 冯素春.多波长、单纵模光纤激光器的研究[D].北京:北京交通大学,2010.
- [7] 张自嘉,王昌明.光纤光栅传输矩阵研究[J]. 光子学报, 2007, 36(6): 1073-1076.
- [8] 赵尚弘,占生宝,石磊.高功率光纤激光技术[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [9] 高林柱.大功率光纤激光器研究进展[J]. 光通信技术, 2011(9):22-24.
- [10] 侯蓝田,韩颖.光纤激光器的发展与应用[J]. 燕山大学学报,2011,53(2):95-101.
- [11] 廖帮全,赵启大,冯德军,等.光纤耦合模方程及其应用[J]. 南开大学学报(自然科学),2002,35(4):71-74.
- [12] 欧攀.高等光学仿真(matlab版)[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2010.