

端面泵浦准三能级激光器的多物理场仿真研究

程 龙, 刘 洋, 赵 鸿, 丁小康, 王 珂, 王 钢
(固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

摘 要:针对准三能级板条激光器报道了一种新的多物理场仿真模型。该模型基于泵浦光的吸收特性、热力学以及激光的增益特性,对传统的准三能级计算模型进行补充。模型考虑到激光的产生对增益介质内部物理场的影响,并基于多物理场之间的耦合关系给出一种新的收敛仿真方法。该模型适用于单端、双端泵浦的激光谐振腔与放大器。

关键词:准三能级;激光器;仿真;多物理场;Yb:YAG

中图分类号:TN248.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2020.01.011

Multiphysics simulation of quasi-three-level end-pumped laser

CHENG Long, LIU Yang, ZHAO Hong, DING Xiao-kang, WANG Ke, WANG Gang
(Key Laboratory of Solid State Laser Technology, Beijing 100015, China)

Abstract: A new multi-physics simulation model for quasi-three-level slab lasers is reported in the paper. Based on the absorption characteristics of the pump light, the thermodynamics and the gain characteristics of the laser, the model complements the traditional quasi-three-level calculation model. The model considers the influence of laser generation on the internal physical field of the gain medium, and gives a new convergence simulation method based on the coupling relationship between multiple physical fields. This model is suitable for single-ended and double-ended pumped laser resonators and amplifiers.

Keywords: quasi-three-level; laser; simulation; multiphysics; Yb:YAG

1 引言

高功率固体激光器广泛应用于工业、国防等领域^[1-2],其中以Yb:YAG为增益介质的板条激光器具有能级结构简单、量子亏损小以及近似一维的热梯度分布^[3-5]的特点,在近些年受到科研人员的高度关注。对激光器工作状态的仿真不仅可以发现当前激光器的问题,避免了不必要的损失,还可用于新型激光器的设计,极大的加快了科学研究的进展。

自20世纪70年代以来,为获得精准的仿真效果,科研人员进行了大量实验与计算,并且提出了多种仿真方法。常见的仿真方法有:解析法、有限元法

等。2000年, Gilbert L. Bourdet^[6]等提出一种新的仿真模型,并对均匀泵浦的板条激光器进行了详细的计算,得到了计算输出功率密度的解析公式,并对不同变量对输出光强的影响作了分析;同年, Todd S. Rutherford^[7]等对侧面泵浦的板条激光器做了详细的分析,推导了均匀掺杂板状激光介质中的温度场、应力场分布解析公式;2001年, Gilbert L. Bourdet^[8]等提出了一种适用于连续激光应用的掺镱激光晶体的新评价方法用于评价激光器性能。2010年,国防科技大学的刘亮^[9]等对传导冷却端面泵浦激光器以及新型激光器的热效应进行了详尽的分析;2012

作者简介:程 龙(1995-),男,硕士研究生,主要从事高功率固体激光器激光器方面的研究。E-mail:476767253@qq.com

收稿日期:2019-09-11; **修订日期:**2019-10-25

年,清华大学的付星^[10]等通过有限元的方法对半导体二极管非均匀泵浦的板条激光器进行了仿真。

随着激光技术的飞速发展,传统的仿真方法已出现局限性。一方面,传统的仿真方法的周期较长,需要理论计算、三维建模、光场仿真、热力场仿真等多个过程,在设计激光器时更改的每一个参数,都意味着重新建立模型再运行一次较长时间的计算分析,而这会消耗大量的时间和精力,且忽略了物理场之间的耦合;另一方面,各种新型板条激光器的出现,如单面掺杂的表层增益介质激光器的热分布仿真问题,也对传统的仿真方式提出了考验。文章在理论工作的基础上,对准三能级增益介质内的物理场进行了详尽的分析,如温度场、功率密度场、发射与吸收截面场等,并提出了一种新的收敛仿真模型。该模型将板条分为微元,将增益介质内部的物理场以三维矩阵的形式,通过矩阵之间的运算建立多物理场之间的耦合关系,以矩阵收敛的方式进行耦合求解稳态分布。该模型具有较强的扩展性,对不同激光器的仿真仅需导入对应的矩阵即可,如单面掺杂的板条激光器只需修改其形状与掺杂浓度对应的矩阵参数即可,不需重复建模。围绕该模型对实验装置展开了一系列的仿真,并将模型仿真结果与解析法计算结果,得到相似结果,验证了该模型的可用性以及较高的扩展性。

2 理论分析

对于准三能级激光器,其激光的增益与泵浦光的损耗可写成如下形式^[6]:

$$\begin{cases} dI_l = I_l(f_{l1} + f_{u2})\sigma_l N_{Yb} \left(X_u - \frac{f_{l3}}{f_{l3} + f_{u1}} \right) dz \\ dI_p = I_p(f_{l3} + f_{u1})\sigma_p N_{Yb} \left(\frac{f_{l1}}{f_{l1} + f_{u2}} - X_u \right) dz \end{cases} \quad (1)$$

式中, I_l 与 I_p 为激光与泵浦光功率密度; f_{ui} 与 f_{lj} 是上下能级的 Boltzmann 因子; σ_p 与 σ_l 代表 Yb : YAG 晶体的吸收(940 nm)与发射截面(1030 nm); N_{Yb} 为掺杂粒子数密度; X_u 代表上能级粒子浓度比例。式(1)中两方程的物理意义分别为长度为 dz 的增益介质,对激光的增益与泵浦光的吸收。可以看出,影响增益与吸收的变量一共有五个:波尔兹曼因子、发射与吸收截面、中间变量 X_u 、晶体的掺杂浓度以及晶体的吸收长度。其中,掺杂浓度与晶体吸收长度决定了泵浦光的吸收效率。

对于 Boltzmann 因子与晶体的发射吸收截面,科研人员进行了大量的研究。Boltzmann 因子与温度之间的关系^[7]可表示为式(2):

$$\begin{cases} f_a^l = \frac{\exp(-E_a^l/k_b T)}{\sum_i \exp(-E_i/k_b T)} \\ f_b^l = \frac{\exp(-E_b^l/k_b T)}{\sum_j \exp(-E_j/k_b T)} \\ f_a^p = \frac{\exp(-E_a^p/k_b T)}{\sum_i \exp(-E_i/k_b T)} \\ f_b^p = \frac{\exp(-E_b^p/k_b T)}{\sum_j \exp(-E_j/k_b T)} \end{cases} \quad (2)$$

B. Chen 与付星等人分别给出了 Yb : YAG 晶体的受激发射截面^[11]与吸收截面^[10]随温度场分布 T 变化的公式:

$$\begin{cases} \sigma_l(\text{Yb : YAG@1030 nm}) = [0.95334 + 33.608 \exp(-T/92.82465)] \times 10^{-19} \text{ cm}^2 \\ \sigma_p(\text{Yb : YAG@941 nm}) = [2.07 + 6.37 \exp(-(T - 273.15)/288)] \times 10^{-21} \text{ cm}^2 \end{cases} \quad (3)$$

高功率激光器工作状态下产生的温度梯度,使得介质内部不同位置处激光增益与泵浦吸收不同,而吸收的泵浦光又会影响产热从而影响温度的分布。对结构如图 1 所示的增益介质来说,其温度分布可表示为:

$$T(x, z) = T_c + \frac{Q_g(x, z)t}{2H} + \left(\frac{Q_g(x, z)t^2}{8k_c} \right) (1 - x^2) \quad (4)$$

其中, k_c 为热导率; H 为介质与冷却水之间的换热系数; T_c 为冷却水温度; $Q_g(x, z)$ 代表介质内部的热源分布,可通过光热转化效率求出。

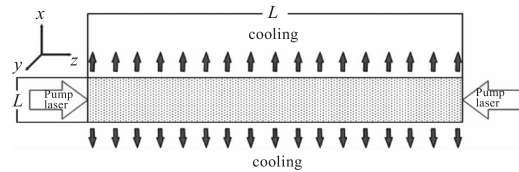


图1 二维矩形板条结构示意图

Fig.1 Schematic of two-dimensional rectangular slab structure

在温度 T 下,中间变量 X_u 可以表示为:

$$X_u(z) = \frac{f_p(T)I_p(z) + f_l(T)I_l(z)}{1 + I_p(z) + I_l(z)} \quad (5)$$

可以看出 X_u 的值随着泵浦光与激光的强度变化而变化,同时 X_u 又作为一种反馈,影响了激光的增益(dI_l)与泵浦光的吸收(dI_p)。若将板条分割为微元,则每一段微元都可以看作一个增益与吸收体,可通过迭代的方法计算出每一次经过介质后的激光增益与泵浦损耗,以及新的 $X_u(z)$ 用以下一次

增益。在不考虑温度对泵浦光分布的影响下,对于无激光状态下的反转粒子数分布求解可选择指数吸收模型如式(6)所示:

$$I_p(z) = I_{pl} \exp(-\alpha_0 z) + I_{pr} \exp(-\alpha_0(L-z)) \quad (6)$$

其中, I_{pl} 与 I_{pr} 为增益介质两侧泵浦光强度; L 为增益介质有效长度。联立方程(5)和(6)即可求出 $X_u(x, y, z)$ 。当一个光子满足了振荡的条件,由泵浦形成的反转粒子对其产生了增益。随着 I_l 不断的增加,每个微元对激光的增益也越来越小,当往返光强不再增加的时候即达到了稳定状态。

3 模型建立

实际工作状态下的板条介质内多个物理场之间互相耦合,模型建立的基础就是物理场之间的耦合关系。图2展示了部分物理场之间的耦合关系。通过耦合关系以及第2节的公式,我们可以搭建模型计算的流程图,如图3所示。

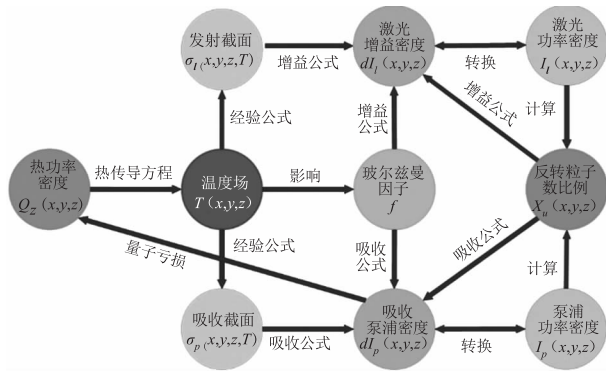


图2 多物理场耦合关系

Fig.2 Schematic of multiphysics coupling

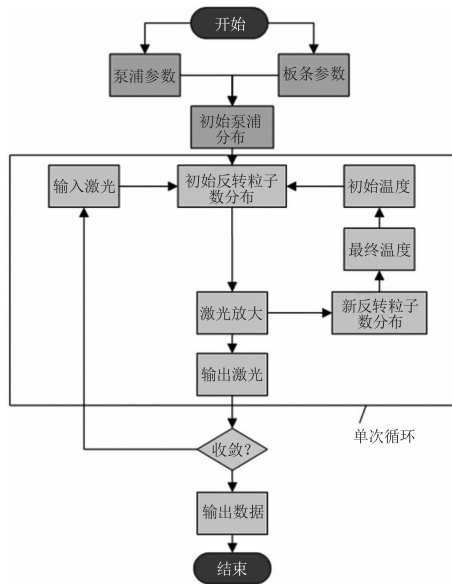


图3 模型计算流程图

Fig.3 Schematic of model calculation flow chart

为对该模型进行分析,本文未对复杂的增益结构进行分析,如引言所说,复杂的结构仅需对相应的矩阵参数进行修改即可。下面对 Gilbert L. 等人给出的边缘泵浦 Yb:YAG 激光器模型^[6]中的实验结构稍加修改,并以此为例对该模型进行说明。实验结构如图4,系统采用双端 LD 端面泵浦方式,泵浦光透过双色镜 DM1, DM2 入射到板条端面,双色镜的表面镀有 940 nm 增透膜以及 1030 nm 高反膜。增益介质为掺杂密度为 $2.2 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 的 Yb:YAG 晶体,晶体尺寸为 $8.5 \text{ mm}(x) \times 2 \text{ mm}(y) \times 30 \text{ mm}(z)$ (宽×厚×长),增益介质的两大面焊接有金属热沉,通过水冷机对温度进行控制。M1 和 M2 为谐振腔腔镜,其中 M1 为反射镜,镀有 1030 nm 的高反膜, M2 为半透半反镜,输出的激光通过功率计进行接收。

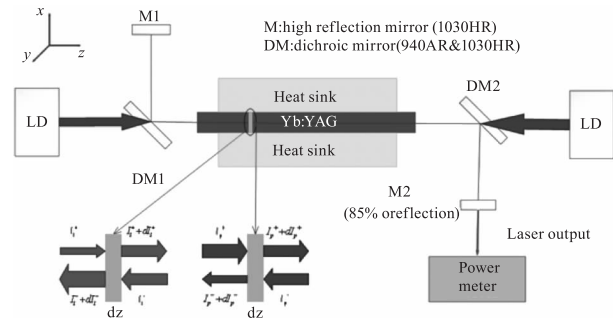


图4 系统装置图

Fig.4 Schematic of system

无激光状态下的初始反转粒子数分布已在第2节给出,不失一般性,假设在输出镜位置存在一个可以形成振荡的光子并赋予它一定的光强,该光强大小并不影响最终的仿真结果。为使结果更加精准,将板条划分为微元,通过定义三维矩阵的形式赋予每个微元物理场参数。易知微元的分割数越多,最终的仿真结果越接近板条的真实情况,相对应的计算时间也会变得很长。

在增益介质内部,该光子每经过一次微元时都会按照公式(7)进行放大,同时代表着该处物理场状态的矩阵元素也会随着迭代的过程而不断改变直至收敛;在增益介质外部,设某镜片对泵浦光与激光的反射率分别为 R_p 与 R_l ,则在该镜片处的条件如式(8),反射的泵浦光加上新补充的泵浦光作为反向泵浦光,反射的激光加腔内同方向的激光作为反向激光。当光子通过输出镜再次回到初始位置的时候即完成了一次循环。对比输出激光与输入激光,若输出有所增益,则开启下一次循环,直到输出的光强不再变化,即得到了稳态的物

理场分布。

$$\begin{cases} I_l^+(z+dz) = I_l^+(z) + dI_l^+(z) \\ I_p^+(z+dz) = I_p^+(z) + dI_p^+(z) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} I_p^+(z) = I_{pl}^+ + R_p I_p^-(z) \\ I_l^+(z) = I_{ll}^+ + R_l I_l^-(z) \end{cases} \quad (8)$$

该模型适用于激光谐振腔与放大器等多种结构,其余腔型仅需对参数进行调整。表1给出了部分结构对应的参数。值得注意的是,若所有光都不满足振荡条件,该模型仍会对物理场进行仿真,如无腔状态下,也就是无激光输出的状态下增益介质的温度分布等,这在激光器的仿真分析是十分有必要的。

表1 模型参数表

Tab.1 Table of model parameter

算例结构	左端泵浦 功率/kW	右端泵浦 功率/kW	初始激光 功率/kW	输出镜 反射率
谐振腔	左端泵浦	I_{pl}	0	任意
	双端泵浦	I_{pl}	I_{pr}	任意
放大器	I_{pl}	I_{pr}	I_{lin}	0

4 仿真分析

通过 MATLAB 软件对第三章建立的模型进行编程。运行该模型即可得到每次循环下增益介质内部的三维物理场模型,包括激光输出功率、泵浦光分布场以及温度场等。图5为不同泵浦功率下,输出功率与迭代次数关系图。可以看出输出功率在短时间内迅速增加,此时的反转粒子数充足,可以提供足够的增益;但是随着迭代次数的增加,对反转粒子数的消耗也逐渐增加,输出功率的增长逐渐平缓,最终趋于稳定。

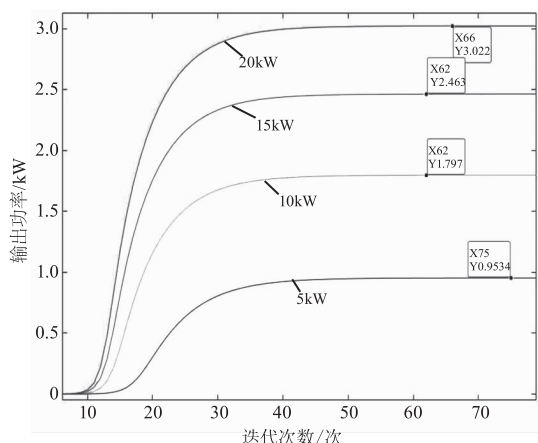


图5 输出功率与迭代次数关系图

Fig. 5 Relationship between output power and iteration number

为了验证模型仿真的准确性,尝试对 Gilbert 给出的模型进行模拟。图6为不同泵浦条件下的提取

功率曲线。在未考虑温度分布对增益介质的影响下,得到的输出功率近似线性并与 Gilbert 所求结果近似。但是随着温度特性对增益介质中各个参数影响的引入,输出功率也得到了不同程度的减少,输出功率曲线也变得不再线性,这与实际实验中观察到的现象吻合。

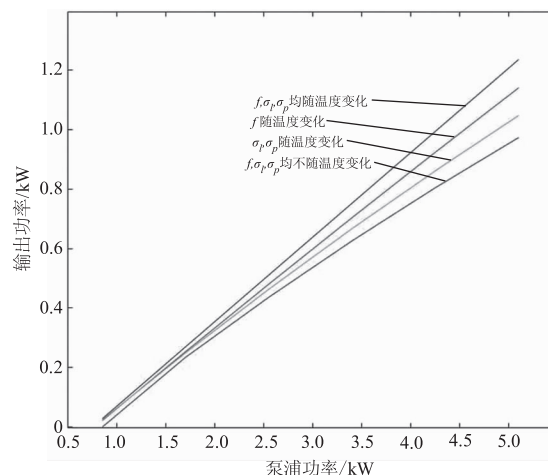


图6 提取功率曲线

Fig. 6 Extraction power curve

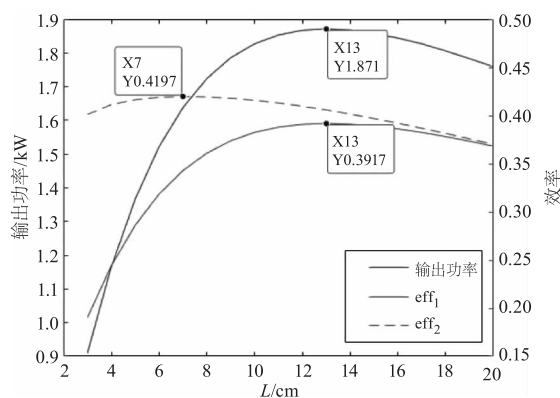


图7 输出功率、效率与板条长度L关系图

Fig. 7 Output power, efficiencies versus the length

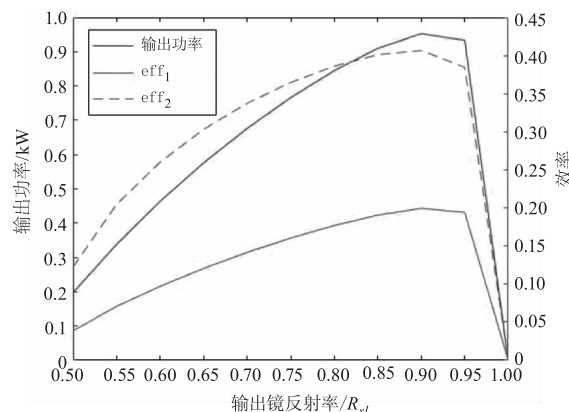


图8 输出功率、效率与输出镜反射率R_{sl}关系图

Fig. 8 Output power, efficiencies versus the reflectivity of the coupling mirror

通过将增益介质长度 L 与输出镜反射率 R_s 设为变量,我们得到输出功率关于长度与反射率的图像,如图 7 与图 8。 eff_1 定义为输出功率与总泵浦功率的比值, eff_2 定义为输出功率与吸收的泵浦功率的比值。随着 L 与 R_s 的增加,输出功率均出现了先增加后减少的现象,虽然在 $L = 7 \text{ cm}$ 的时候,泵浦光的转化效率最高,但是相对应的激光输出功率却较低。当 $L = 13 \text{ cm}$, $R_s = 0.9$ 时输出功率最大,此时的效率也较高。以此参数对该状态下的增益介质进行仿真得到输出功率为 1.855 kW ,光光转换效率为 41% 。

5 总 结

本文针对准三能级板条激光器的仿真问题进行了理论分析,并提出一种高效的仿真模型,考虑到激光的产生对泵浦的吸收与温度场分布的影响,将多物理场耦合到一起。借助 MATLAB 强大的矩阵处理能力,仿真模型仅需数秒时间。通过对传统模型的仿真,得到了更为接近实际实验的仿真结果,证明了该模型的可用性。模型的仿真结果可用于分析现有激光器以及设计新型激光器等。

该模型所涉及物理场还不充足,如应力场用以分析增益介质内部的热应力问题等,后续会加入时间项来分析温度场非稳态问题,还可更改结构矩阵参数模拟损伤,镀膜污染等情况。

参考文献:

- [1] ZHOU Shouhuan, ZHAO Hong, TANG Xiaojun. High average power laser diode pumped solid-state laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(7): 1605 - 1618. (in Chinese)
周寿桓,赵鸿,唐小军. 高平均功率全固态激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1605 - 1618.
- [2] ZHOU Shouhuan. The heat managements of the solid-state Lasers[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2005, 22(4): 497 - 498.
周寿桓. 固体激光器中的热管理[J]. 量子电子学报, 2005, 22(4): 497 - 498.
- [3] LIU Liang, GUO Shaofeng, LU Qisheng, et al. Research on thermal effect in conduction cooled end-pumped slab amplifier[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(7): 987 - 988. (in Chinese)
刘亮,郭少锋,陆启生,等. 传导冷却端面泵浦板条放大器波前畸变数值研究[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(7): 987 - 988.
- [4] LIU Yang, TANG Xiaojun, WANG Ze, et al. Laser diode end pumped Nd : YAG surface gain slab lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, (10): 25 - 30. (in Chinese)
刘洋,唐晓军,王喆,等. 激光二极管端面抽运 Nd : YAG 表层增益板条激光器[J]. 中国激光, 2016, (10): 25 - 30.
- [5] 柳强,巩马理,陆富源,等. 高功率二极管角抽运 Yb : YAG 板条激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(12): 13.
- [6] Bourdet G L. Theoretical investigation of quasi-three-level longitudinally pumped continuous wave lasers[J]. Appl Opt, 2000, 39(6): 966 - 971.
- [7] Rutherford T S, Tulloch W M, Gustafson E K, et al. Edge-pumped quasi-three-level slab lasers: design and power scaling[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2000, 36(2): 0 - 219.
- [8] Bourdet G L. New evaluation of ytterbium-doped materials for CW laser applications[J]. Optics Communications, 2001, 198(4-6): 411 - 417.
- [9] LIU Liang. Research on thermal effect in conduction cooled end-pumped slab amplifier[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010: 46 - 85. (in Chinese)
刘亮. 传导冷却端面泵浦板条放大器热效应研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2010: 46 - 85.
- [10] FU Xing. Research on slab lasers nonuniformly pumped by laser diodes[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012: 21 - 26. (in Chinese)
付星. 二极管非均匀泵浦板条激光器研究[D]. 北京:清华大学, 2012: 21 - 26.
- [11] Chen B, Dong J, Patel M, et al. Modeling of high-power solid-state slab lasers[C]// High-power Lasers & Applications, 2003: 1 - 10.