

文章编号: 1001-3806(2010)03-0339-04

高功率轴快流 CO₂ 激光器的数值模拟进展

李 晴, 王又青*, 黄鸿雁

(华中科技大学 光电子科学与工程学院 激光加工国家工程研究中心, 武汉 430074)

摘要: 综述了国内外高功率轴快流 CO₂ 激光器数值模拟的研究进展。分别从理论方程、计算方法、计算结果 3 方面对已有的数值模拟进行了比较和分析, 重点探讨了理论模型的组成形式、物理意义和近似条件, 分析了不同计算方法的优缺点, 列举了不同计算结果得出的激光器性能和参量之间的关系。最新结果表明, 轴快流激光器的性能和输出与放电管的结构, 电极结构, 管内的温度场、速度场、压力场和湍流状态等参量分布都有关。依据轴快流 CO₂ 激光器和计算机技术的发展, 提出了轴快流 CO₂ 激光器数值模拟未来需要改进的方向, 进而对基于新的计算平台的数值模拟结果在激光器的优化和设计方面的应用前景进行了展望。

关键词: 激光器; 模拟; 数值计算; CO₂; 轴快流

中图分类号: TN248.2⁺2

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.03.015

Progress of numerical simulation of high power fast-axial-flow CO₂ lasers

LI Qing, WANG You-qing, HUANG Hong-yan

(National Engineering Research Center of Laser Processing, College of Optoelectronic Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The research and development of the numerical simulation of fast axial flow CO₂ lasers, and the main purposes, methods results and application meanings of the numerical simulation were reviewed. The comparison and analysis of the numerical simulation were made on three points as theory equations, numerical method and computation results. The forms, physical meanings and approximations of theory model were discussed, the advantages and disadvantages of different numerical methods were analyzed, and the different computational results about the relation between the parameters and performances of lasers were listed. The latest results showed that the discharge characteristics and laser output were relative with structures of discharge tubes and electrodes, distribution of velocity, temperature, pressure, turbulent status and other parameters. According to the development of fast-axial-flow CO₂ lasers and the computer technology, the improving direction of the numerical simulation was proposed and the application prospects of modeling results under new computing platform were made for design and optimization of lasers.

Key words: lasers; modeling; numerical simulation; CO₂; fast-axial-flow

引 言

在过去几十年内,对高功率 CO₂ 激光器的数值模拟一直在不断的研究和改进,希望借此能对这个复杂系统得到一个最真实具体的描述。其中,轴快流 CO₂ 激光器以其优良的光束质量和超高的功率在工业上得到了广泛应用,针对此类激光器的数值模拟也成为了主要研究方向。随着科技水平的提高和计算机技术的发展,对此类激光器的数值模拟也更加接近于实际情况。

对高功率轴快流 CO₂ 激光器进行模拟的目的就

在于尽量在多种边界条件下使用最少的输入数据。放电区内部过程的模拟更是数值模拟的主要研究内容。由于激光器内部工作物质的相互作用的复杂性,早期的研究主要集中在理论模型的建立上;随着基础理论模型逐渐完善后,接着的研究重点又放在了模型的简化和近似上,发展出了针对激光工作物质不同物理量的各具特色的数值模拟的实例;近期的研究重点是针对寻求不同的数值计算方法来进行数值模拟,借助计算机技术得到关于激光器内部的更多真实信息,依此可对激光器进行改进和优化。

例如早在 1978 年,美国的 SMITH 和 THOMSON 就发表了关于气体激光器模拟的专著^[1],此专著为气体激光器模拟奠定了基础,提供了描述 CO₂ 激光器内部过程的基础理论模型。之后有许多从事于气体激光

作者简介:李 晴(1983-),女,博士研究生,现主要从事高功率轴快流 CO₂ 激光器数值模拟的研究。

* 通讯联系人。E-mail: YQWang13@163.com

收稿日期:2009-03-20;收到修改稿日期:2009-04-28

模拟研究的科研人员都是在此理论的基础上进行的。如 JACOBY 在给定电子密度的情况下,解出了描述气体激光器系统的 1 维方程。MULLER 和 UHLENBUSCH 则通过线性代数近似的方法,将湍流和热传导对激光功率输出的影响写入了差分方程组中^[2]。BAEVA 和 ATANASOV 则对带有螺旋运动的轴快流直流激励的 CO₂ 激光器进行了研究^[3]。BEVERLY 对工作物质是 CO₂, N₂, He 以及 Xe 的混合物的气体激光器进行了模拟,且分别在直流激励和射频激励两种情况下,利用麦斯威尔分布函数求解电子能量平衡方程^[4]。

鉴于高功率轴快流 CO₂ 激光器的数值模拟工作,将对今后 CO₂ 激光器的理论研究的重要意义以及对激光器的改进和优化的现实应用意义,作者对高功率轴快流 CO₂ 激光器的数值模拟的理论模型建立和数值计算方法等关键问题进行了系统的分析和综述。

1 已有数值模拟的比较和分析

1.1 理论模型

过去 CO₂ 激光器理论模型基本都是基于一系列描述其内部过程的微分方程。其中包括稳态流体力学方程、气体分子的能级振动能量方程、电子密度方程、粒子碰撞方程以及光轴向传播稳态方程等多组数学方程来描述其内部的复杂过程。

单对轴快流 CO₂ 激光器而言,其中又包括多种情况。比如管内轴向直流激励或射频激励;在平常的 CO₂-N₂-He 气体混合物中加入了 CO, O₂ 或 Xe 等其它成分的;扩散冷却或对流冷却;单管或气体流向平行的多放电管系统等等。德国的 RUDOLPH 和 HARENDT 等人就针对 CO₂ 激光器的不同激励方式给出了不同的电子密度方程^[5]。TOEBAERT 和 MUYS 等人也给出了轴快流激光器 CO₂ 数值模型的控制方程^[6]。下面给出的是模型方程的一般形式。

(1) 稳态流体力学方程

$$\begin{cases} \frac{d}{dz} \rho v = 0 \\ \rho v \frac{dv}{dz} = -\frac{dp}{dz} - \frac{f}{2d_r} \rho v^2 \\ \rho v c_p \frac{dT}{dz} + \rho v^2 \frac{dv}{dz} = \varepsilon - \gamma I - \frac{f}{2d_r} \rho v^3 - \varepsilon_w \\ \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz} - \frac{1}{T} \frac{dT}{dz} - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, ρ 指混合气体密度, v 是气体流速, z 为气体流动方向的坐标值, d_r 指流道半径, 是为了区别光束直径 d_s , c_p 为混合气体比定压热容, T 是气体温度, f 为壁面

摩擦系数。能量平衡方程中, $\varepsilon = \varepsilon(z)$ 代表注入到放电区 $z_{on} \leq z \leq z_{off}$ 的特定欧姆功率, 随瞬时光功率损失 γ, I 减少, 其中, $\gamma = \gamma(z)$ 和 $I = I(z)$ 分别是增益以及光强度。 ε_w 表示由湍流对管道壁面的冷却带来的另外的功率损失。

(2) 能级振动能量方程

振动能级基于 SMITH 和 THOMSON 的 6 温度模型^[1]。所有的振动模式 (CO₂ 3 个, N₂ 1 个, CO 1 个) 都被看作是简谐振子。速率方程系统描述了每个分子 q_i 的粒子密度的变化, q_i 是关于激光轴向坐标 z 的函数:

$$q_i = \frac{\exp(-\varepsilon_i/k_B T_i)}{1 - \exp(-\varepsilon_i/k_B T_i)}, \quad (i = 1, \dots, 5) \quad (2)$$

式中, $\varepsilon_1 = \varepsilon_{100, CO_2}$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_{010, CO_2}$, $\varepsilon_3 = \varepsilon_{001, CO_2}$, $\varepsilon_4 = \varepsilon_{1, N_2}$, $\varepsilon_5 = \varepsilon_{1, CO}$ 分别是不同分子振动能级的能量:

$$\begin{cases} v \frac{dq_1}{dz} = S_{1,e} - R_{v-v}^{12} + R_{v-v}^{321} + N_{CO} R_{v-v}^{521} - R_{v-t}^{10} + \frac{\gamma I}{N_{CO_2} h \nu_1} \\ v \frac{dq_2}{dz} = S_{2,e} + R_{v-v}^{12} + \frac{1}{2} R_{v-v}^{321} + \frac{1}{2} N_{CO} R_{v-v}^{521} - R_{v-t}^{20} \\ v \frac{dq_3}{dz} = S_{3,e} - R_{v-v}^{321} + N_{N_2} R_{v-v}^{43} + N_{CO} R_{v-v}^{53} - \frac{\gamma I}{N_{CO_2} h \nu_1} \\ v \frac{dq_4}{dz} = S_{4,e} - N_{CO_2} R_{v-v}^{43} + N_{CO} R_{v-v}^{54} \\ v \frac{dq_5}{dz} = S_{5,e} - N_{CO_2} R_{v-v}^{521} - N_{CO_2} R_{v-v}^{53} - N_{N_2} R_{v-v}^{54} \end{cases} \quad (3)$$

式中, 源项 $S_{i,e}$ 代表振动能级电子碰撞激发的作用, 与电子碰撞激发速率有关, N_l 表示各个不同气体成分 l 的粒子数。其它项 R_{v-v} 和 R_{v-t} 的描述的是不同的振动能级之间 $v-v$ 和 $v-t$ 相互作用过程, 其中包括费米共振激发等过程。 h 为普朗克常数, ν_1 为激光频率。

(3) 电子密度方程

为了获得电子-分子碰撞速率的振动激发系数, 电离系数和电子复合速率以及电子能量, 电子漂移速度, 通常使用了基于均匀稳态玻尔兹曼方程的法则进行计算。计算方法可见参考文献[3]和参考文献[5]。

(4) 轴流系统光传输方程

平面腔内的辐射场决定于 z_+ 和 z_- 方向上的辐射度 I_+ 和 I_- 的差分方程:

$$\begin{cases} \frac{dI_+}{dz} = [\gamma(z) - a] I_+ dz \\ \frac{dI_-}{dz} = -[\gamma(z) - a] I_- dz \end{cases} \quad (4)$$

式中, a 是由衍射、吸收和散射作用造成的非饱和损失; $\gamma(z)$ 是大信号增益, 与振动粒子密度 q_i 有关, 其计

算方法参见参考文献[5]。

r_1, r_2 是镜子的反射率,通常 $r_2 = 1$ 。此时腔内的光强可由下式给出:

$$I = I_+ + I_- \quad (5)$$

但是当光束(输出镜)直径 $d_s \leq d_r$ 已给定时,输出激光功率由下式计算:

$$P_{\text{out}} = \frac{\pi}{4} d_s^2 I_{\text{out}} = \frac{\pi}{4} d_s^2 I_-(0) (1 - r_1) \quad (6)$$

并不是所有的 CO₂ 激光器的数值模型都要运用到描述所有过程的方程组。因为激光器工作时工作气体的内部过程过于复杂,进行建模的时候不可能考虑所有的物理过程。为了保证数值模型的完备性和科学性以及数值计算的可行性,通常会针对所模拟的激光器的特点对模型方程进行简化,忽略分子能级跃迁过程中一些次要的物理过程,或是把部分物理过程的贡献合并进入主要的方程中。如 SAZHIN 和 WILD 等人则将振动能级方程的 6 温度模型简化为 3 温度模型后进行了数值计算,而 BAEVA 和 ATANASOV 就将扩散和对流的作用加入粒子速率方程中进行求解^[7-9]。

这些假设和近似都是有理论或实验根据的,作为模型成立的条件,一般在介绍理论方程之前就会给出。比如 BEVERLY 以及 SHARIF 和 KHEIR 等其他研究者发表的文章中都有把所用的假设和近似列举出来^[4,10]。这些假设和近似一般是针对研究者所认为的实际中有发生但基本不会影响激光器内部状态的项。这些假设通常有:(a) 模内振动弛豫比模间振动弛豫时间要短得多,所以每个模式都可以用一个特征温度来描述;(b) 动力学温度为 T 的 CO₂ 气体内平动和转动能级分布符合玻尔兹曼规律;(c) 假设 CO₂ 对称振动能级(100)温度和弯曲振动能级(010)处于玻尔兹曼平衡分布,两个模式的特征温度相等;(d) 假设受激辐射仅发生在谱带 001→100 之间的跃迁;(e) 忽略自发辐射对激光的贡献;(f) 电场和电流对工作气体的作用将以与电流和电场成正比的加热项加入模型能量方程中;(g) 放电管中的气压,速度和温度在稳定工作时不随时变,只计算其空间 1 维分布;(h) 忽视分子裂解的作用。

过去的模型都没有考虑进等离子体内部的化学作用,即假设放电过程都是均匀的化学过程。这种假设在真实情况下并不一定合理,因为要达到稳态状态的特征时间比转移时间要大得多(几百个毫秒相对几个毫秒)。所以模型有两点限制,对流体入口处的气体混合物来说气体组成成分是近似稳态的,对放电结构来说工作气体是一个确定结构的流体,这样才能保证是化学上是一个近似均匀的气体混合物。

1.2 计算方法

对于由一系列差分方程组组成的数值模型,其计算方法可分两种,第 1 种是借助 C 平台或其它开发平台,用一些数值迭代方法编写代码进行计算,如 4 阶龙格-库塔方法,欧拉方法,牛顿迭代法。这种方法形式比较自由,可按具体方程设计代码,适合激光器的复杂过程,但计算精度较低,得到的信息量较少;第 2 种是利用现有的一些数值仿真软件,对数值模型设置边界条件并进行迭代计算,如 MATLAB, ANSYS, FLUENT 等软件^[11]。这种方法计算精度高,还可利用软件的强大后处理功能得到直观的可视化结果。但由于早期软件本身的功能有限且适用范围小,因此建立的模型并不完善。但随着计算机技术的发展,软件不断更新升级已改进很多,适用范围越来越广,这些局限性已逐渐得到改善。

1.3 计算结果

模型建立和数值计算之后,可得到关于工作气体特性以及激光器性能的大量数据,然后和实验数据相比较,可证明其数值模拟的正确性,还可得到放电区内部的各个物理量的分布,进一步可掌握激光器输入参量与输出功率之间的关系。如 BEVERLY 就给出了分别在小信号增益条件下和稳定振荡条件下的 6 温度模型中气体分子振动能级的特征温度沿气流方向的 1 维分布图,还给出了小信号增益在不同压强下随注入电功率增大而增大的范围,尤其指出了小信号增益对 H₂O 和 CO 的浓度大小很敏感^[4]。BAEVA 和 ATANASOV 则给出了有考虑湍流扩散作用情况下的激光输出计算结果,并和实验值进行了比较,结果证明,气体流速和温度在管内是呈线性上升趋势的,当入口速度减小时,温升是增加的,气体压强减小时,温升也同样会增大,且考虑湍流扩散作用时的数值模拟结果更接近实际情况^[3,9]。GALEEV 求解控制方程得到的结果与实验值一致,并得到了激光输出功率与电流和气流速度的关系以及不同气流方向时电子、离子密度和电场沿轴向的分布^[12]。JELVANI 和 SAEEDI 运用 Newton-Raphson 方法编程计算简化的 3 温度模型的控制方程的数值解,得到了放电管内工作气体的温度,激光上能级分子振动温度和小信号增益在不同放电电流,放电管直径,气体流速和气压时的分布,得出了气体温升会随气流速度的降低,气压的增高或放电管直径的增大而增大,CO₂ 分子反对称振动能级温度会随放电电流的增大而线性上升,且在气体流速,气压和放电管直径减小时会升高。小信号增益在压强和放电管直径增大时会更迅速的饱和,但不随一定范围内变化的速度值而变化^[13]。显然这些数值模拟结果对全面了解

和掌握气体激光器的动力学特征和预测激光器的性能表现有重要意义。

2 轴快流 CO₂ 激光器数值模拟发展方向

国内外的激光器数值模拟的研究成果显然起了很好的提示和借鉴作用,为今后的工作奠定了理论基础。这些数值模型都各有特点,也都初步得到了一些输入参量在激光器中起的作用或者和激光输出的关系。这些方法和计算结果无疑对将来高功率轴快流 CO₂ 激光器的改进和优化有指导作用,但之前的模拟计算大部分都是在 1 维和 2 维空间进行的模拟,将复杂的放电区域结构过于简化,且并没有提出过对激光器改进的具体意见和优化应用后的结果^[14-16]。随着轴快流 CO₂ 激光器的日益发展,更需要新的适用如今的新型高功率轴快流 CO₂ 激光器的数值模拟方法,和应用于实践的例子。加上如今计算机硬软件的飞速更新和对激光等离子体的研究的新进展和也促使我们发展更新更接近实际情况的 3 维模型来帮助高功率轴快流 CO₂ 激光器的开发和设计。未来的目标旨在发展和完善高功率轴快流 CO₂ 激光器的数值模拟方法,使得数值模拟无论是在定性或是定量上都能对此类激光器的设计和提高提供可靠的方法和依据,并对具体的激光器提出改进方案并付诸实践,得到实际有效的优化设计。

2.1 进一步完善理论模型

针对理论方程的建立,应将致力于在几乎没有信息损失的情况下,将描述 CO₂ 激光器工作物质状态的稳态流体力学方程和气体分子的能级振动能量方程等方程组成的传统理论模型进行尽可能少的近似和简化,使计算区域接近真实的放电结构,并考虑对流和扩散的影响,湍流的影响以及电流热效应和冷却方式的影响,将这些因素以经验公式的形式加入理论方程中,再进行数值计算。CO₂ 激光器的理论基础在这几十年内已经发展得比较完善了,因此,数值模型的建立将根据被模拟激光器的特点出发,在前人的基础上加以修改以得到适合于被模拟的激光器的理论模型。因为主要关注的是 CO₂ 激光器内部工作气体流体力学特性分布以及 CO₂ 分子激光上下能级的分布,理论模型可以 CO₂ 激光器的温度模型为基础,和质量守恒方程、动量守恒方程、连续性方程一起以耦合的方式求解,电场或磁场的作用可加入相关方程的源项中^[17]。

2.2 尝试新的计算平台

根据 CO₂ 激光器运行时的工作物质是高速混合气体流的特点,新模型将以计算流体力学仿真软件 FLUENT 为平台,用 1 组差分方程加以描述,利用计算流体力学仿真计算方法来实现对一系列 3 维的非离子

化气体流体的数值模拟^[18]。FLUENT 流体仿真计算软件已经被证实可用于一些成分确定的可压缩 3 维流体的计算^[19]。国外已有研究者尝试用它来进行 CO₂ 激光器的数值模拟,如 SAZHIN 和 WILD^[7-8]。FLUENT 是用基于有限体积法的技术来解传输方程的。将每一个有限体积元上的差分方程综合在一起,然后转化为代数方程进行数值求解,并且可利用其自定义功能接口将传统的模型中的振动能量传输方程的解决方案合并进数值计算软件 FLUENT 的运算法则中。这样既能利用利用软件本身对流体动力仿真的功能优势,又不受其局限性,可以计算关于能级粒子分布的状态,并可以利用其强大的后处理功能将计算结果转为直观的 3 维分布图,可了解到关于激光器放电区的多个参量的变化趋势。

2.3 计算结果的应用前景

未来的数值模型的计算区域,将采用 3 维的几何结构,尽量保持原有的放电区结构,包括阳极、阴极和流道形状。将计算结果和实验结果比较后,可得到关于增益介质的流体力学所有参数的 3 维分布,根据这些计算结果和实验数据,可分析影响气体流速的因素和优化措施;以及湍流对放电过程的影响究竟体现在哪些方面;高速工作气体的流场分布对放电稳定性和光束质量的关系^[17]。探索气流速度及状态对气体温度场分布的影响;放电状态和稳定性与温度分布的关系;温度分布对光电转化效率和激光模式的影响。放电状态及放电稳定性与光电转化效率的关系;稳定辉光放电的影响因素;不稳定丝状放电的抑制方法;放电状态对光电转化效率的影响等等。

根据这些计算结果反馈的影响因素对激光器的贡献,可对放电管结构,电极结构,激光器工作参量进行调整和改进,使激光器工作性能的输出达到更优,也为激光器的关键部件的设计提供了新方法。

3 结 论

高功率轴快流 CO₂ 激光器的数值模拟发展至今已经形成了一套比较系统的理论和计算方法,但随着 CO₂ 激光器本身和计算科学的不断更新和发展,其数值模拟也在随之发展和更新。进一步完善理论模型和选择合适的仿真计算软件可从计算结果中得到更多关于激光器内部的信息,不仅节省了实验成本,更对激光器的优化和设计有重要指导意义。

参 考 文 献

- [1] SMITH K, THOMSON J K. Computer modeling of gas lasers [M]. New York: Plenum Press, 1978: 1-87.

(下转第 376 页)

1600nm,通过光谱仪测量出抽运关闭时的信噪比分别为17.0dB,18.2dB,17.2dB。抽运源开启时,信噪比为25dB,28.6dB和26.8dB。通过对采集的数据进行处理、计算,得到噪声指数分别为-1.67dB,-1.96dB和-1.92dB。

3 结论

通过实验实现了C+L波段的宽带分布式光纤喇曼放大器,该放大器具有很好的增益平坦特性及噪声特性。测试中采用覆盖C+L波段的波分复用信号源,信号经50km光纤传输后,获得平均开关增益为10.7dB,增益平坦度小于1.5dB,偏振相关增益小于0.4dB,偏振模式色散小于0.18ps,最大等效噪声指数为-1.96dB。

参考文献

- [1] MEI J J, LIU D M, HUANG D X. Analysis of power conversion efficiency of fiber Raman amplifiers [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(4):350-351 (in Chinese).
- [2] LING J, LI K, KONG F M, *et al.* Simplified model design and pump optimization of multi-pumped fiber Raman amplifiers [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(3):334-336 (in Chinese).
- [3] WU B, LI K, KONG F M, *et al.* A study of the simulation algorithm for multi-pumped broadband Raman amplifier [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(4):411-413 (in Chinese).
- [4] JIANG H M, WANG Y F. Study on the gain of forward pumped Raman fiber amplifier by numerical simulation [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(4):377-378 (in Chinese).
- [5] HANSEN P B, ESKILDSEN L, GRUBB S G, *et al.* Capacity upgrades of transmission systems by Raman amplifier [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, 9(2):262-264.
- [6] KAO M S, WU J. Extending transmission distance high-density WDM systems using post transmitter fiber Raman amplifiers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1991, 9(3):394-399.
- [7] ROTTWITT K, NISSOV M, KERFOOT F. Detailed analysis of Raman amplifiers long haul transmission [C]//*Optical Fiber Communication Conference and Exhibit*, 1998. San Jose: IEEE, 1998:30-31.
- [8] ORCHARD D A, HOLLINS R C. A high pulse repetition rate helium-xenon laser [J]. *SPIE*, 1997, 3092:82-85.
- [9] EL-OSEALY M A, JITSUNO T, NAKATSUKA M, *et al.* Co-axially excited gas lasers toward vacuum ultra violet region [J]. *SPIE*, 2000, 3889:774-779.
- [10] KOCH F, CHERNIKOV S V, LEWIS S A E, *et al.* Characterisation of single stage, dual-pumped Raman fiber amplifiers for different gain fiber lengths [J]. *Electron Lett*, 2000, 36(4):347-348.
- [11] JIANG H M, WANG Y F. Study on the gain of forward pumped Raman fiber amplifier by numerical simulation [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(4):377-378 (in Chinese).
- [12] MULLER S, UHLENBUSCH J. Influence of turbulence and convection on the output of a high-power CO₂ laser with a fast axial flow [J]. *J Phys*, 1987, D20(6):697-708.
- [13] BAEVA M G, ATANASOV P A. Numerical investigation of CW CO₂ laser with a fast turbulent flow [J]. *J Phys*, 1993, D26(4):546-551.
- [14] BEVERLY R E. Kinetic modeling of a fast-axial-flow CO₂ laser [J]. *Opt & Quant Electron*, 1982, 14(1):25-40.
- [15] RUDOLPH R, HARENDT A, BISIN P, *et al.* Numerical modeling of fast-flow CO₂ lasers I: the model [J]. *J Phys*, 1993, D26(4):552-559.
- [16] TOEBAERT D, MUYS P, DESOPPERE E. Theoretical study of the properties of a modulated fast-flow CO₂ laser [J]. *Infrared Physics & Technology*, 1997, 38(6):337-355.
- [17] SAZHIN S, WILD P, LEYS C, *et al.* The three temperature model for the fast-axial-flow CO₂ laser [J]. *J Phys*, 1993, D26(11):1872-1883.
- [18] SAZHIN S, WILD P, LEYS C, *et al.* Three-dimensional modeling of processes in the fast-axial-flow CO₂ laser [J]. *J Phys*, 1994, D27(3):464-469.
- [19] BAEVA M G, ATANASOV P A. Numerical model of an fast-axial-flow CO₂ laser with controlled turbulence [J]. *Proc SPIE*, 1993, 1018:109-112.
- [20] SHARIF A H, KHEIR A M. Numerical modeling of a fast-axial-flow CW-CO₂ laser [J]. *Opt & Laser Technol*, 2007, 39(3):610-615.
- [21] HAN Y Zh, LI G Y, XIONG Zh W, *et al.* Application of ANSYS on the analysis of temperature field in the way of flowing gas in HP TF CO₂ laser [J]. *Laser Magazine*, 2005, 26(4):44-45 (in Chinese).
- [22] GALEEV R S. Numerical simulation of fast axial flow CO₂-laser [J]. *SPIE*, 1994, 2117:205-213.
- [23] JELVANI S, SAEEDI H. Numerical investigation of a fast-axial-flow CW CO₂ laser [J]. *Opt & Laser Technol*, 2008, 40(3):459-465.
- [24] PENG X Y, LI Sh M, XU L. Numerical modeling on pulse discharge of a high power fast-axial-flow CO₂ laser [J]. *SPIE*, 1997, 2989:245-249.
- [25] STANGHINI M, BASSO M, GENESIO R, *et al.* A new three-equation model for the CO₂ laser [J]. *IEEE J Q E*, 1996, 32(7):1126-1131.
- [26] WESTER R, SEIWERT S. Numerical modeling of RF excited CO₂ laser discharges [J]. *J Phys*, 1991, D24(8):1371-1375.
- [27] LI Q, WANG Y Q, HUANG H Y, *et al.* A CFD model for fast-axial-flow laser [J]. *Proc SPIE*, 2008, 7276:72760H1-72760H7.
- [28] ZHOU S Y, LIU S Q, TAO X Y. Simulation of density solitons and self-generated magnetic field in laser plasma [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(1):8-11 (in Chinese).
- [29] WANG F J, LI Y J, CONG G H, *et al.* CFD simulation of 3-D flow in large-bore axial flow pump with half-elbow suction sump [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2006, B18(2):243-247.

(上接第342页)