

非链式脉冲氟化氙激光器的动力学模拟和实验研究

阮 鹏^{1,2} 谢冀江¹ 张来明¹ 杨贵龙¹ 李殿军¹ 李世明¹ 潘其坤^{1,2}
孟范江¹ 谭改娟^{1,2} 郭 劲¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 依据非链式脉冲氟化氙(DF)激光器的反应机理,采用速率方程理论,建立了非链式脉冲 DF 激光器动力学模型。采用 Runge-Kutta 法对该模型进行数值计算,得到了最佳气体比例和最佳输出镜反射率参数。采用紫外预电离放电引发方式,对非链式脉冲 DF 激光器进行了实验研究,得到了激光器输出的主要技术参数,实验结果与理论计算结果相吻合。理论分析和实验结果均表明,可以通过优化工作气体比例和输出镜反射率参数来改善激光器的输出性能。在工作气体分压比为 10:1、输出镜反射率为 30% 时,激光器输出性能最佳,此时实验得到的单脉冲激光能量为 4.95 J,脉冲宽度为 148.8 ns,峰值功率为 33.27 MW。

关键词 激光器;脉冲 DF 激光器;动力学模型;速率方程;数值分析

中图分类号 TN248.5 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0702002

Dynamical Simulation and Experimental Study of Non-Chain Pulsed DF Laser

Ruan Peng^{1,2} Xie Jijiang¹ Zhang Laiming¹ Yang Guilong¹ Li Dianjun¹
Li Shiming¹ Pan Qikun^{1,2} Meng Fanjiang¹ Tan Gaijuan^{1,2} Guo Jin¹

¹ State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract According to the reaction mechanism in non-chain pulsed DF lasers, a dynamical model for this kind of laser is presented by using rate equations theory. The optimum gas ratio and reflectance of output mirror are obtained by numerical calculation with this model using the Runge-Kutta method. The experiment is done based on UV-preionized discharge method. The main output parameters of non-chain pulsed DF laser gained from experiment agree well with the theoretical calculation. The theoretical analysis and experimental results both show that the output performance of non-chain pulsed DF laser can be improved by optimizing the parameters of working gas pressure ratio and the reflectance of output mirror. The laser has the best output performance when the working gas ratio is 10:1 and the reflectance of output mirror is 30%. The single pulse energy of 4.95 J, pulse duration of 148.8 ns and peak power of 33.27 MW are achieved under above conditions.

Key words lasers; pulsed DF laser; dynamical model; rate equations; numerical calculation

OCIS codes 140.3460; 140.1550; 140.3430; 140.3470

1 引 言

3~5 μm 中红外波段不仅是衰减最小的大气红

外窗口,而且还覆盖了众多原子及分子吸收峰,因此该波段激光在光谱学、激光雷达、大气监测及军

收稿日期: 2012-12-10; 收到修改稿日期: 2013-01-29

基金项目: 科技部国际合作专项基金(2011DFR10320)资助课题。

作者简介: 阮 鹏(1985—),女,博士研究生,主要从事化学激光器及其应用技术方面的研究。

E-mail: eagle_laser@163.com

导师简介: 谢冀江(1959—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光器及其应用技术等方面的研究

E-mail: laserxjj@163.com(通信联系人)

事等诸多领域都有重要的应用价值和前景^[1~3]。目前,能产生中红外波段光源的主要途径有:光参量振荡(OPO)非线性光学变换技术、CO₂气体激光倍频技术、泛频CO激光器以及氟化氙(DF)化学激光器。其中OPO光学变换技术和CO₂激光倍频技术受限于光学晶体的性能,获得的激光输出能量和功率都很低,无法满足应用需求;泛频CO激光器需要对基频光进行抑制且室温运行存在很大困难,因而技术相对复杂;相比之下,中心波长为3.8 μm的非链式脉冲DF化学激光器具有光束质量好、结构紧凑、操作简单,易于实现小型化和工程化等优点,并能实现高功率和高能量激光输出,因而近年来在国内外受到广泛关注^[4~8]。

DF分子的反应动力学特性与氟化氢(HF)分子相似,但二者在振动弛豫及受激跃迁特性方面存在很大差别。目前研究重点主要集中在HF激光器动力学特性上^[9~11],尚未发现专门关于DF激光器动力学模拟的研究报道。本文将在非链式脉冲HF激光器动力学模型的基础上,根据二者在反应动力学上的相似性采用速率方程理论建立能够准确描述

非链式脉冲DF激光器动力学特性的数学模型。采用Matlab软件对非链式脉冲DF激光器的动力学模型进行数值计算,得到了激光器主要输出参数,并就工作气体比例、输出镜反射率对腔内光子数密度、激光输出能量、激光功率的影响进行了分析。为了验证理论计算结果,对紫外预电离放电引发非链式脉冲DF激光器进行了实验研究,理论与实验得到的最佳气体比例及输出镜反射率参数一致。

2 非链式脉冲DF激光器的理论模型

根据非链式脉冲DF激光反应机理和速率方程理论建立了描述非链式脉冲DF激光器动力学过程的数学模型。在模型建立过程中只考虑振动能级间的跃迁而忽略了转动过程,并假设:1)工作物质在增益区混合均匀;2)在电子碰撞作用下,SF₆分子的解离是获得F原子的唯一来源;3)F原子在放电的瞬间产生且在增益区分布均匀;4)受激辐射跃迁过程中气体温度保持不变。

根据上述理论和假设,放电引发非链式脉冲DF激光器的速率方程可表示为

$$\frac{d[\text{SF}_6]}{dt} = -k_e n_e [\text{SF}_6], \quad (1)$$

$$\frac{d[\text{F}]}{dt} = k_e n_e [\text{SF}_6] - k[\text{D}_2][\text{F}], \quad (2)$$

$$\frac{d[\text{D}_2]}{dt} = -k[\text{D}_2][\text{F}], \quad (3)$$

$$\frac{d[\text{D}]}{dt} = k[\text{D}_2][\text{F}], \quad (4)$$

$$\frac{d[\text{DF}(4)]}{dt} = k_4[\text{D}_2][\text{F}] - \sigma_4 c \{ [\text{DF}(4)] - [\text{DF}(3)] \} q_4 - \sum_{i=1}^{i=4} k_{4i} [\text{DF}(4)][\text{M}_i], \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{d[\text{DF}(3)]}{dt} = & k_3[\text{D}_2][\text{F}] + \sigma_4 c \{ [\text{DF}(4)] - [\text{DF}(3)] \} q_4 + \sum_{i=1}^{i=4} k_{4i} [\text{DF}(4)][\text{M}_i] - \\ & \sigma_3 c \{ [\text{DF}(3)] - [\text{DF}(2)] \} q_3 - \sum_{i=1}^{i=4} k_{3i} [\text{DF}(3)][\text{M}_i], \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{d[\text{DF}(2)]}{dt} = & k_2[\text{D}_2][\text{F}] + \sigma_3 c \{ [\text{DF}(3)] - [\text{DF}(2)] \} q_3 + \sum_{i=1}^{i=4} k_{3i} [\text{DF}(3)][\text{M}_i] - \\ & \sigma_2 c \{ [\text{DF}(2)] - [\text{DF}(1)] \} q_2 - \sum_{i=1}^{i=4} k_{2i} [\text{DF}(2)][\text{M}_i], \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{d[\text{DF}(1)]}{dt} = & k_1[\text{D}_2][\text{F}] + \sigma_2 c \{ [\text{DF}(2)] - [\text{DF}(1)] \} q_2 + \sum_{i=1}^{i=4} k_{2i} [\text{DF}(2)][\text{M}_i] - \\ & \sigma_1 c \{ [\text{DF}(1)] - [\text{DF}(0)] \} q_1 - \sum_{i=1}^{i=4} k_{1i} [\text{DF}(1)][\text{M}_i], \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{d[\text{DF}(0)]}{dt} = k_0 [\text{D}_2] [\text{F}] + \sigma_1 c \{ [\text{DF}(1)] - [\text{DF}(0)] \} q_1 + \sum_{i=1}^4 k_{1i} [\text{DF}(1)] [M_i], \quad (9)$$

$$\frac{dq_v}{dt} = A_{v,v-1} [\text{DF}(v)] + \sigma_v c \{ [\text{DF}(v)] - [\text{DF}(v-1)] \} q_v + \frac{c \ln R}{2L} q_v, \quad (10)$$

式中 $[\cdot]$ 表示相应的粒子数密度, k_e 为电子碰撞 SF_6 分子生成F原子的速率系数,其数值为 $0.15 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{s}^{[12]}$ 。 k 为F原子与 D_2 反应生成DF分子的总反应速率系数, $k_v(0 \leq v \leq 4)$ 为F原子与 D_2 反应生成 v 振动能级DF分子[用 $\text{DF}(v)$ 表示]的速率系数,且 $k = k_0 + k_1 + k_2 + k_3 + k_4$ 。 $M_i(i=1, 2, 3, 4)$ 依次为引起激发态DF分子振动弛豫的基态DF分子、 D_2 分子、D原子和F原子, k_{1i} 为第 i 种粒子 M_i 引起 v 能级DF分子振动弛豫的速率系数。DF分子的生成及振动弛豫速率系数采用Perry和Polanyi给出的公式计算^[13]。 σ_v 为 v 能级DF分子受激发射截面,其取值范围为 $10^{-18} \sim 10^{-16} \text{ cm}^2$ ^[14]。 $A_{v,v-1}$ 为 v 能级DF分子自发辐射系数,且 $A_{4,3} = 155.1, A_{3,2} = 131.5, A_{2,1} = 98.1, A_{1,0} = 54.5$,单位为 s^{-1} ^[15]。 n_e 为电子数密度,采用的电子数密度经验公式为^[16]

$$n_e(t) = N_0 [1 - \exp(-t)] \exp(-2t), \quad (11)$$

式中 N_0 取 3.985×10^{13} , n_e 的最大值可以达到 $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 。

q_v 为 v 能级DF分子受激辐射到光腔中的光子数密度,则光腔中总的光子数密度为

$$q = \sum_{v=1}^4 q_v. \quad (12)$$

激光输出功率为

$$P_{\text{out}} = -\frac{S}{2} h\nu q c \ln R. \quad (13)$$

激光单脉冲能量为

$$E = h\nu \iint \frac{c \ln R}{2L} q dV dt, \quad (14)$$

式中 h 为普朗克常量, ν 为激光的中心频率, c 为光速, R 为输出镜的反射率, L 为激光器腔长, S 为激光器增益截面, V 为激光增益体积。工作气体分压是比较容易测量的参数,设 SF_6 和 D_2 的分压分别为 p_1, p_2 ,则可以通过 $n(0) = p \times N_A / (8.31 \times T)$ 计算出 SF_6, D_2 粒子数密度的初始值,其中 N_A 为阿伏伽德罗常数, T 为腔内气体绝对温度,计算时 T 取300 K,其他粒子数密度的初始值均为0。将非链式脉冲DF激光器的相关参数代入上述公式中,采用Runge-Kutta法进行数值计算,可以得到腔内光子数密度 q 及激光器输出参数随时间的变化情况。

3 理论计算与实验结果对比分析

3.1 理论计算结果

3.1.1 气体比例对腔内光子数密度的影响

工作气体比例是影响化学激光器输出性能的重要因素之一,因而采用上述动力学模型研究了 SF_6 与 D_2 比例对腔内光子数密度的影响。计算时保持 SF_6 分压为10 kPa,在工作气体分压比为4:1、6:1、8:1、10:1、12:1、15:1时,分别计算了DF激光器腔内光子数密度随时间的变化关系,计算结果如图1所示。

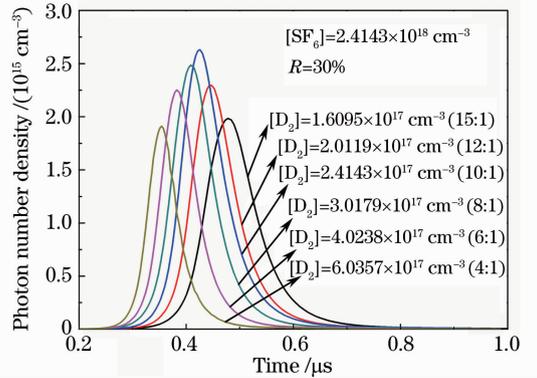


图1 不同气体比例下光子数密度随时间的变化关系

Fig. 1 Photon number density in the laser cavity versus time at different mixture ratios

计算结果显示:腔内光子数密度随 D_2 密度的增加先增大后减小,并在 D_2 密度为 $2.4143 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时,即 $p_1:p_2=10:1$,腔内光子数密度达到最大值。在同一放电条件下, SF_6 分子解离出的F原子数目为定值,低密度的 D_2 不足以使腔内的F原子完全反应导致生成的DF分子数密度较低。此外多余的F原子对激发态DF分子的消激发作用会引起已有的反转粒子数密度降低,从而导致腔内光子数密度较低。随着 D_2 含量逐渐增加,反应生成的激发态DF分子数密度也增加,同时F原子对激发态的DF分子的消激发作用减弱,因而腔内的光子数密度增加。当 D_2 含量过多时,虽然反应生成的激发态DF分子数密度增加,但是过量的 D_2 及反应生成的D原子对激发态DF分子的消激发作用也增强,因而反转粒子数密度反而减小。当气体分压比为10:1时, D_2 和F原子含量相匹配,激发态DF分子生成速率与消激发速率的差值达到最大,因此腔内光

子数密度也达到最大值。

3.1.2 输出镜反射率对激光器输出参数的影响

输出镜反射率是影响激光器输出性能的重要因素,运用上述模型在最佳气体比例条件下($p_1:p_2=10:1$),计算了腔内光子数密度和激光输出功率随输出镜反射率的变化规律。计算选取的输出镜反射率依次为10%、20%、30%、40%、50%和60%,计算结果如图2,3所示。

从图2可以看出,随着输出镜反射率的升高,腔内光子数密度逐渐增加,激光脉冲建立时间不断缩短。这与激光器增益损耗比有关,即输出镜反射率越大增益损耗比越大,激光脉冲的建立时间越短。

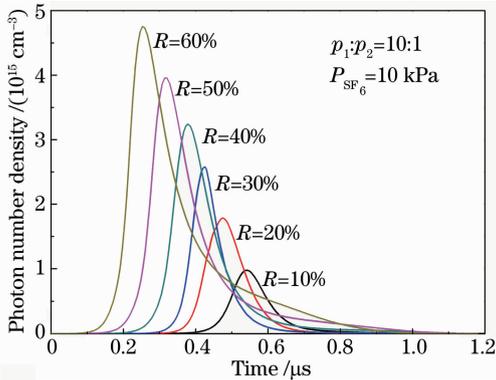


图2 不同反射率时的腔内光子数密度与时间的关系

Fig. 2 Photon number density in the laser cavity versus time at different reflectivities

图3为计算得到的激光器输出功率随输出镜反射率的变化关系。在气体参数等其他条件保持不变的情况下,输出镜反射率对激光器输出功率影响明显,当输出镜反射率为30%时激光器输出功率取得最大值。计算结果为优化激光器参数提供了参考。

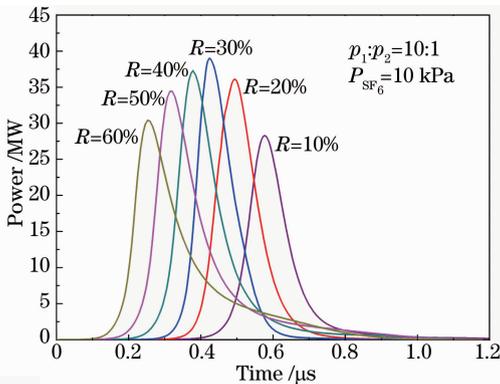


图3 不同反射率时输出功率与时间的关系

Fig. 3 Output power versus time at different reflectivities

3.2 实验装置

实验所用DF激光器由经过改造的横向放电激励大气压(TEA)CO₂激光器构成,主要包括高压储

能放电系统、控制系统、气体循环系统和光学谐振腔,图4为实验装置示意图。激光器采用紫外光预电离横向放电结构,主电极为长120 cm、宽4 cm对称放置的改进型Chang氏不锈钢电极,电极间距4 cm,预电离电极由双侧火花针阵列组成,光学谐振腔由反射率为99%的凹面镀金反射镜和CaF₂平面输出耦合镜组成,腔长为2.2 m。激光输出后由分束镜将激光分为两束:一束由能量计测量单脉冲能量;另一束由PC型室温HgCdTe探测器进行探测,探测信号经放大器放大后由带宽为500 MHz的TDS3052B型示波器显示,整个测量过程在屏蔽室中进行。

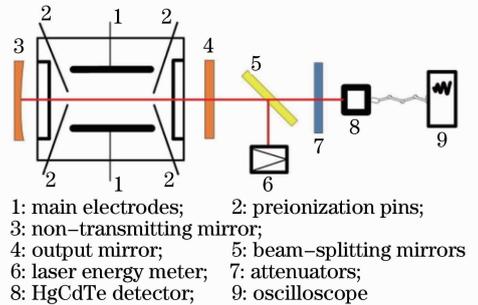


图4 非链式脉冲DF激光器实验装置示意图

Fig. 4 Diagram of experimental setup for non-chain pulsed DF laser

3.3 实验结果与分析

实验中保持SF₆分压为10 kPa,在充电电压为39 kV条件下,输出镜反射率为30%时,分别测量了工作气体比例为4:1、6:1、8:1、10:1、12:1、15:1时的单脉冲能量。进而分别对测量值和理论计算值进行数值拟合,得到的DF激光脉冲能量随D₂密度的变化关系如图5所示。可以看出,实验测量值与理论计算值的拟合曲线走势一致:二者均是随D₂密度的增加呈现出先变大再减小的变化趋势,且在D₂

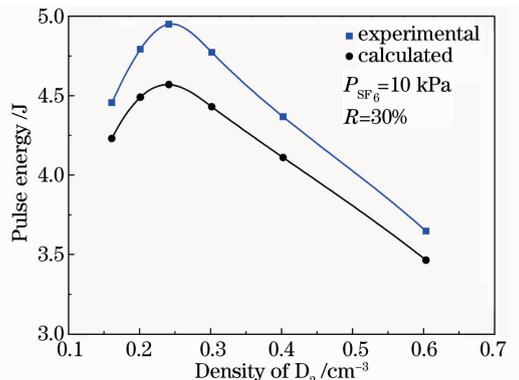


图5 激光器单脉冲输出能量与D₂密度的拟合曲线

Fig. 5 Laser pulse energy versus the density of D₂

分子数密度为 $2.4143 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ($p_1:p_2=10:1$) 时单脉冲能量达到最大值。理论与实验均表明存在最佳工作气体比例使激光器输出能量达到最大值。在每个气体比例下,实验测量结果均比理论计算结果高出 10% 左右,引起这种偏差的主要原因为本模型的电子数密度公式采用了经验公式,它只是增益区电子数密度的一种近似,无法精确描述实验条件下电子数密度变化情况。为了得到较准确的理论计算值,应将单脉冲能量的理论计算结果乘上 1.12 的修正系数。经修正后的计算模型能够正确描述非链式脉冲 DF 激光器动力学过程。

在最佳工作气体比例下,充电电压仍为 39 kV 时,实验研究了输出镜反射率对激光器输出能量的影响。选用的 CaF_2 输出镜镀膜后的反射率分别为 10%、20%、30%、40%、50% 和 60%,分别对不同输出镜反射率下的实验测量结果和理论计算结果进行曲线拟合,结果如图 6 所示。对比两条拟合曲线可知,实验结果与速率方程模型理论计算结果基本相符,二者能量值间的差别仍由采用的经验电子数密度与其真实值间的偏差引起。实验中得到的最佳输出镜反射率为 30%,即激光器输出镜存在最佳反射

率参数使得激光器的输出能量取得最大值。该实验结果验证了速率方程理论模型的正确性。

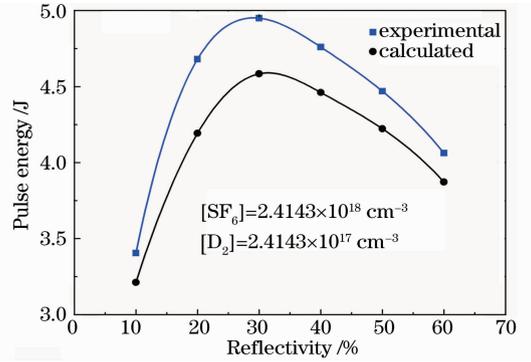


图 6 激光器单脉冲能量与输出镜反射率的拟合曲线
Fig. 6 Laser pulse energy versus output mirror reflectivity

在工作气体比例和输出镜反射率均为最佳条件下 ($p_1:p_2=10:1, R=30\%$),对激光脉冲波形进行了测量,结果如图 7(a) 所示。实验测得的 DF 激光器输出激光脉冲宽度为 148.8 ns,对应的激光单脉冲能量为 4.95 J,由此可得脉冲峰值功率为 33.27 MW。图 7(b) 为理论计算得到的激光器输出功率随时间的变化曲线,脉冲宽度为 120 ns,脉冲峰值功率为 37.83 MW。比较图 7(a), (b) 可知,实验测量与理论计算所得的脉冲波形相符。

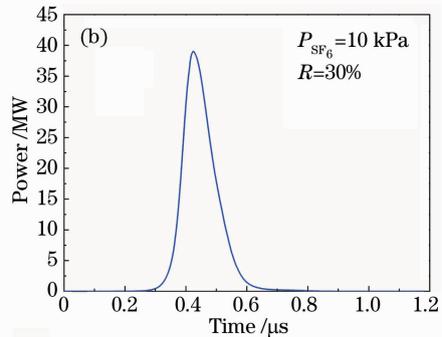
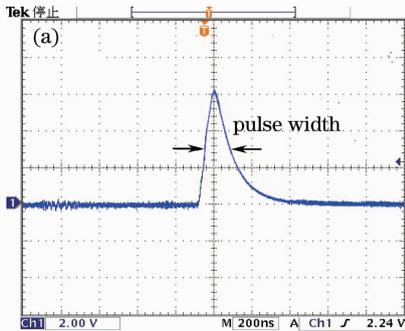


图 7 激光器脉冲波形。(a) 实验测量结果;(b) 速率方程理论计算结果

Fig. 7 Laser pulse shape. (a) Experimental result; (b) calculated result of rate equations

4 结 论

根据非链式脉冲 DF 激光器的反应机理和速率方程理论建立的动力学模型可较好地解释脉冲 DF 激光器的动力学过程。工作气体比例是影响非链式脉冲 DF 激光器输出能量的一个重要因素,理论计算和实验测量均表明,放电引发非链式脉冲 DF 激光器的混合气体 SF_6 与 D_2 的最佳分压比例为 10:1。输出镜反射率对激光器输出参数影响较大,可以通过优化输出镜反射率参数实现非链式脉冲 DF 激光器高能量、高峰值功率输出。非链式脉冲

DF 激光器的最佳输出镜反射率为 30%,在此条件下得到的激光脉冲波形和单脉冲能量与速率方程理论模型的计算结果相吻合。速率方程理论模型可以为非链式脉冲 DF 激光器的优化设计提供理论参考。

参 考 文 献

- 1 C. H. Bair, F. Allario. Analysis of Differential Absorption Lidar Technique for Measurements of Anhydrous Hydrogen Chloride from Solid Rocket Motors Using a Deuterium Fluorine Laser[R]. Hampton, 1977
- 2 A. A. Serafetinides, K. R. Rickwood, A. D. Papadopoulos.

- Performance studies of novel design atmospheric pressure pulsed HF/DF laser[J]. *Appl. Phys.*, 1991, **52**(1): 46~54
- 3 H. L. Moore. Laser technology update: pulsed impulsive kill laser[C]. NDIA 2000 Joint Services Small Arms Symposium, 2000. 18~25
- 4 V. F. Tarasenko, A. N. Panchenko. Efficient discharge-pumped non-chain HF and DF lasers [C]. *SPIE*, 2006, **6101**: 610119
- 5 V. V. Apollonov, A. A. Belevtsev, K. N. Firsov *et al.*. Advanced studies on powerful wide-aperture non-chain HF (DF) lasers with a self-sustained volume discharge to initiate chemical reaction[C]. *SPIE*, 2003, **5120**: 529~541
- 6 V. P. Borisov, V. V. Burtsev, S. D. Velikanov *et al.*. Electric-discharge DF laser with a pulsed energy of the order of 10 J[J]. *Quantum Electronics*, 2000, **30**(3): 225~228
- 7 Ke Changjun, Li Chen, Tan Rongqing *et al.*. Experimental research on electric-discharge non-chain pulsed DF lasers[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2010, **21**(2): 172~174
柯常军, 李 晨, 谭荣清 等. 电引发非链式脉冲 DF 激光器实验研究[J]. *光电子 • 激光*, 2010, **21**(2): 172~174
- 8 Luo Wei, Li Wenyu, Wang Hongyan *et al.*. A novel method of measuring fluorine atom flow rate for discharge driver HF/DF chemical laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1407~1410
罗 威, 李文煜, 王红岩 等. 用于电激励 HF/DF 化学激光器的 F 原子流量检测新方法 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1407~1410
- 9 R. L. Kerber, G. Emanuel, J. S. Whittier. Computer Modeling and Parametric Study for a Pulsed $H_2 + F_2$ Laser [R]. Technical Report TR-0172 (2753)-3, The Aerospace Corporation, El Segundo, [1972-06-06]
- 10 R. L. Kerber, J. S. Whittier. Simple Model of a Chain-Reaction Pulsed HF Laser [R]. Technical Report AD-A043319, The Aerospace Corporation, El Segundo, 1977
- 11 J. L. Lyman. Computer model of the SF_6-H_2 electrical discharge chemical laser[J]. *Appl. Opt.*, 1973, **12**(11): 2736~2747
- 12 A. N. Panchenko, V. M. Orlovski, V. F. Tarasenko *et al.*. Efficient operation modes of a non-chain HF laser pumped by self-sustained discharge[C]. *SPIE*, 2003, **5137**: 303~310
- 13 D. S. Perry, J. C. Polanyi. Energy distribution among reaction products, IX. $F + H_2$, HF, and D[J]. *J. Chem. Phys.*, 1972, **57**: 1574~1586
- 14 K. L. Kompa. Chemical Lasers[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1973
- 15 E. Arunan, D. W. Setser. Vibration-rotational Einstein coefficients for HF/DF and HCL/DCL[J]. *J. Chem. Phys.*, 1992, **97**(3): 1734~1741
- 16 Cheng Li. Research on Mechanism of Producing Iodine Laser by Discharge Alkyl Iodide [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. 44~46
程 丽. 电激励烷基碘化物产生碘激光机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007. 44~46

栏目编辑:何卓铭