

ArF 准分子激光系统的能量效率特性

王倩 赵江山 罗时文 左都罗 周翊

Energy efficiency analysis of ArF excimer laser system

Wang Qian Zhao Jiang-Shan Luo Shi-Wen Zuo Du-Luo Zhou Yi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 214205 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.214205

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.214205>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I21>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

半导体抽运铯蒸气激光器阈值特性分析

[Analysis on threshold characteristics of a diode-pumped Cs vapor laser](#)

物理学报.2014, 63(17): 174201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.174201>

脉冲激光晶化超薄非晶硅膜的分子动力学研究

[Molecular dynamics simulations of pulsed laser crystallization of amorphous silicon ultrathin films](#)

物理学报.2010, 59(8): 5681-5686 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.59.5681>

高压氦气平行极板击穿电压实验研究

[Experimental study on breakdown voltage between parallel plates in high-pressure helium](#)

物理学报.2015, 64(10): 105101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.105101>

磁控溅射辉光放电特性的模拟研究

[Computer simulation of the glow discharge characteristics in magnetron sputtering](#)

物理学报.2012, 61(16): 165101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.165101>

外磁场对介质表面次级电子倍增效应的影响

[Effects of an external magnetic field on multipactor on a dielectric surface](#)

物理学报.2012, 61(7): 075101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.075101>

ArF 准分子激光系统的能量效率特性*

王倩¹⁾²⁾³⁾ 赵江山¹⁾²⁾ 罗时文⁴⁾ 左都罗⁴⁾ 周翊^{1)2)†}

1)(中国科学院光电研究院, 北京 100094)

2)(北京市准分子激光工程技术研究中心, 北京 100094)

3)(中国科学院大学, 北京 100049)

4)(华中科技大学, 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

(2016年6月4日收到; 2016年6月23日收到修改稿)

为深入理解 ArF 准分子激光系统的运转机制, 进而获得优化 ArF 准分子激光系统设计的理论及方向性指导, 利用一维流体模型, 以气体高压放电等离子体深紫外激光辐射过程为主要对象, 研究了放电抽运 ArF 准分子激光系统的动力学特性, 梳理了 ArF 准分子激光系统的能量传递过程, 深入研究了等离子体放电机理, 从能量沉积效率、ArF* 粒子形成过程、激光输出三个方面, 分析了动力学过程中影响能量效率的主要因素, 提出了相应的改进优化措施. 仿真结果表明, 氟气及相关粒子在系统运转过程中有重要作用, 工作气体中氟气的组分比例对能量效率影响较大, 偏离最佳点会导致激光系统能量效率的下降. 相关结论为 ArF 准分子激光系统的优化设计和稳定可靠运转提供了重要的理论参考依据.

关键词: ArF 准分子激光, 能量效率, 流体模型, 电子密度

PACS: 42.55.Lt, 51.50.+v, 52.80.-s

DOI: 10.7498/aps.65.214205

1 引言

目前, ArF 准分子激光系统是国际半导体光刻机的主流光源^[1], 由于激光系统的能量效率直接关系到激光器的整体输出性能, 因而对 ArF 准分子激光系统的能量效率特性进行综合分析非常重要. 通过数值模拟, 探讨准分子激光系统的放电动力学过程, 深化理解能量转移过程及能量利用效率, 明确关键影响因素, 可对准分子激光系统的结构特性优化提供方向性判断和设计指导, 提高系统运转相关实验验证的准确性和可靠性.

国外对 ArF 准分子激光系统放电动力学研究起步较早, Johnson 等^[2]最早研究了电子束抽运准分子激光器的放电动力学特性, Akashi 等^[3]研究了 ArF 准分子激光系统中光电离对电场的影响, Xiong 和 Kushner^[4]研究了光触发放电抽运 ArF 激

光系统的电场分布情况. 国内对放电抽运 ArF 准分子激光系统的研究较少, 主要工作集中在准分子激光系统的应用、准分子激光系统放电动力学特性的初步探索、大气压下介质阻挡放电及空心阴极放电等方面. 罗时文等^[5]研究了放电参数对激光输出的影响, 张增辉等^[6,7]进行了大气压介质阻挡辉光放电的仿真研究. 对于准分子激光系统的能量转移过程及能量效率分析的相关报道较少.

本文以 ArF 准分子激光系统及其核心系统运转物理机制——气体高压放电等离子体深紫外激光辐射过程为主要研究对象, 针对相关放电动力学过程进行典型分析, 参考国际相关领域通用的模型及算法, 通过参数优化改进和比对分析, 系统研究了准分子激光系统放电的动力学特性, 深入探讨了 ArF 准分子激光系统的能量利用效率的相关影响因素, 同时提出了相应的优化改进措施.

* 中国科学院光电研究院创新基金 (批准号: Y50B16A12Y) 和国家科技重大专项 (批准号: 2013ZX02202) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhouyi@aoe.ac.cn

2 理论模型

光刻用ArF准分子激光系统工作气体为F₂/Ar/Ne混合气体, 常规工作气压约为3—5 bar (1 bar = 10⁵ Pa), 通过高压放电激励, 建立等离子体运转模式, 最终实现深紫外波段(中心波长193 nm)的激光辐射.

准分子激光系统动力学仿真的计算方法主要有粒子算法^[8,9]和流体算法^[2,3]. 粒子算法考虑带电粒子从电场中获得能量以及碰撞损失能量, 从微观的角度模拟带电粒子, 靠随机数理统计方法处理粒子的行为, 因此, 要想得到满意的统计结果, 必须跟踪大量粒子, 需要较长的计算时间, 适用于低工作气压、短放电间距的放电等离子体系统. 流体模型将等离子体粒子作为流体来处理, 由分别描述激光振荡的光子传输方程, 描述电子、离子运动的连续性方程, 描述电子能量分布的玻尔兹曼方程, 以及描述电场分布的泊松方程耦合而成^[10]. 该模型既解决了场自洽的问题, 也考虑到了带电粒子的非平衡问题, 能够反映出等离子体的主要宏观性质, 一般适用于高工作气压的等离子体放电系统. 因此, 在工作气压3—5 bar的情况下, 通常采用流体算法进行仿真模拟计算. ArF准分子激光系统主要

由抽运电源、储能系统、激光气室和光学谐振腔组成, 如图1所示. 在模拟仿真过程中, 初级储能系统主要为电容储能(如图5中C₁), 通过抽运电源向激光气室中注入能量. 激光气室中的混合气体吸收、沉积能量, 在外加高压电场的作用下, 电极间气体进行动力学反应, 通过离化-激发-复合-碰撞等过程形成离子及激发态粒子, 激发态粒子通过能级跃迁释放出光子形成激光输出. 具体过程如图2所示.

电能通过电极注入工作气体, 工作气体通过离化、激发等反应形成Ar*, Ar⁺, Ar₂⁺, Ne*, Ne⁺, F⁻等粒子, 工作气体在强电场作用下被击穿, 内部电场及带电粒子迁移形成电流. 在这个过程中工作气体将电极释放的能量储存, 用于后续化学动力学反应的发生, 这一过程称为等离子体能量沉积过程.

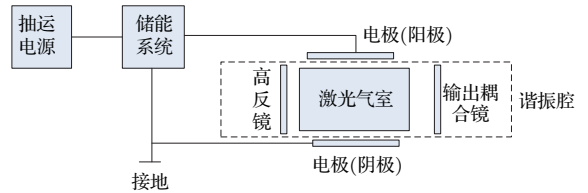


图1 ArF准分子激光系统结构示意图

Fig. 1. The structure of ArF excimer laser system.

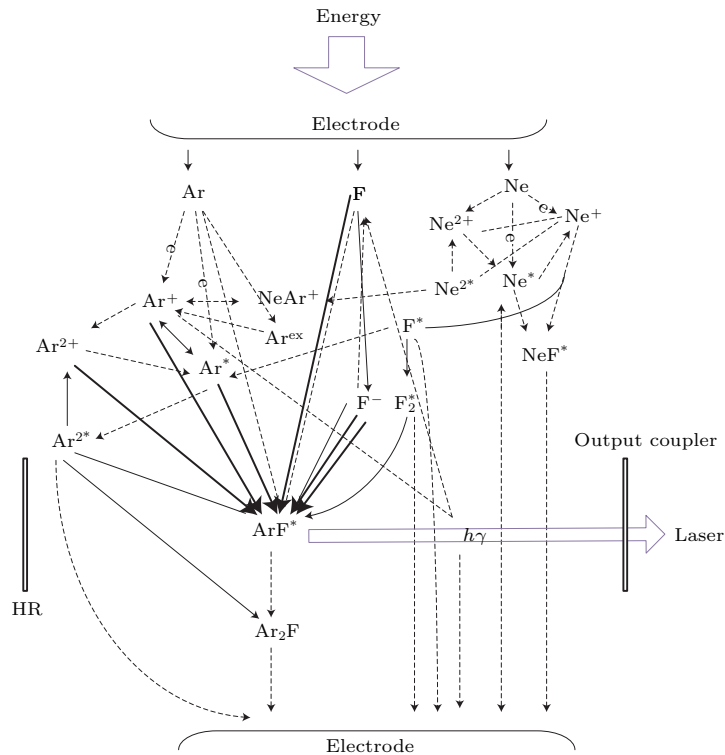


图2 ArF准分子激光系统放电力学过程示意图

Fig. 2. The discharge dynamics process of ArF excimer laser system.

形成的离子、激发态粒子中 Ar^* , Ar^+ , Ar_2^+ , F^- 是形成 ArF^* 的主要粒子, 粒子间相互反应形成 ArF^* 的过程称为激发态准分子 ArF^* 形成过程. 图 2 中实线表明的三种 ArF^* 形成通道为 ArF^* 形成的主要通道 [11]. ArF^* 经受激辐射释放出光子, 光子形成后在激光腔内反复振荡, 增益放大, 最终形成激光输出. 但并非所有的 ArF^* 都能够发生受激辐射释放出光子, 部分 ArF^* 还会与工作气体反应而淬灭; 同时, 光子在激光腔内振荡的过程中会被其他粒子吸附而损耗, 从而降低激光输出功率. 抑制 ArF^* 淬灭及光子吸附通道可以提高系统能量效率. ArF^* 形成后发生受激辐射、淬灭及光子振荡增益、吸收的过程成为激光能量输出过程. 由此可见, 等离子体能量沉积过程、 ArF^* 形成过程、激光能量输出过程共同决定了系统的输出能量, 其中任何一个过程效率上的变化都会影响系统整体的能量输出特性.

下文将针对等离子体能量沉积过程、激发态准分子 ArF^* 形成过程以及激光能量输出过程进行综合分析, 明确影响每个过程的关键因素, 优化气体配比, 提高 ArF 准分子系统能量利用效率.

采用一维流体模型进行计算 [12], 图 3 和图 4 为一维流体计算方法与流程. 流体模型通过玻尔兹曼方程描述电子能量的变化, 通过粒子连续方程描述放电过程中各种粒子数密度的变化, 通过泊松方程描述工作气体内部电场的变化, 通过速率方程描述激发态粒子受激辐射形成激光输出的过程. 计算过程采用迭代法, 在设定的时间步长内, 首先依据电路结构参数和上一时刻各粒子数密度, 求解工作气体内部的电场分布情况, 根据工作气体内部的电场分布情况求解玻尔兹曼方程得到电子温度. 电子温度影响与电子有关反应的反应系数, 反应系数表征了反应发生的难易程度. 反应系数与发生反应的粒子数密度乘积为反应速率. 根据各反应系数及粒子连续方程可以得到本时刻各种粒子密度. 至此一个时间步长内的计算结束, 在下一时间步长内计算重复以上流程.

图 5 为 ArF 准分子激光系统放电电路 [5]. 计算过程中使用参数为: 电感 L_1 约为 100 nH, 电感 L_2 约为 10 nH, 电容 C_1 , C_2 均约为 10 nF. L_1 为末级磁开关压缩回路的磁开关饱和电感与回路电感和, L_2 为放电腔内放电电路的回路电感, C_1 为末级磁开关的储能电容, C_2 为峰化电容. 开关 S_1 闭合前,

能量由抽运电源转移到电容 C_1 中, 开关 S_1 闭合后 (磁开关饱和后), C_1 中的能量经回路 LC 振荡转移到峰化电容 C_2 中, C_2 中的能量经电极放电注入工作气体. $\text{F}_2/\text{Ar}/\text{Ne}$ 混合气体的比例约为 1 : 14 : 650, 激光谐振腔输出耦合镜反射率约 4%. 计算过程中考虑的等离子体形成过程见表 1. 其中, 加粗显

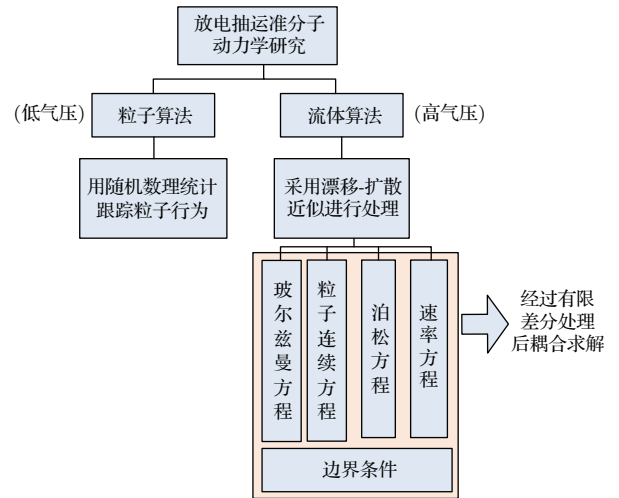


图 3 准分子动力学仿真计算方法

Fig. 3. Simulation method of excimer discharge dynamics.

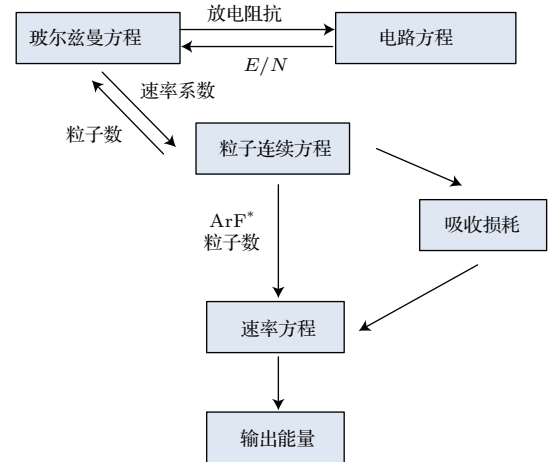


图 4 高压下准分子动力学仿真计算流程

Fig. 4. Simulation process of excimer discharge dynamics under high pressure condition.

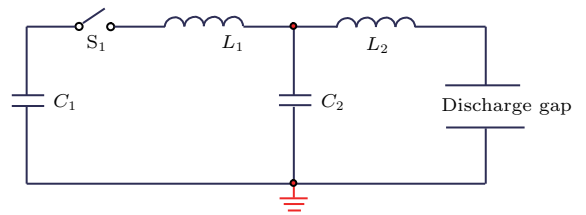


图 5 放电电路

Fig. 5. Discharge circuit.

表1 ArF 准分子激光器等离子体反应过程
Table 1. Plasma reaction processes of ArF excimer laser system.

反应类型	反应过程	反应系数	文献
电子碰撞反应	$\text{Ar} + \text{e} \rightarrow \text{Ar}^+ + 2\text{e}$	求解玻尔兹曼方程得到	
	$\text{Ar} + \text{e} \rightarrow \text{Ar}^{\text{ex}} + \text{e}$	求解玻尔兹曼方程得到	
	$\text{Ar} + \text{e} \rightarrow \text{Ar}^* + \text{e}$	求解玻尔兹曼方程得到	
	$\text{Ar}^* + \text{e} \rightarrow \text{Ar}^+ + 2\text{e}$	求解玻尔兹曼方程得到	
	$\text{F}_2 + \text{e} \rightarrow \text{F}^- + \text{F}$	求解玻尔兹曼方程得到	
	$\text{Ne}^* + \text{e} \rightarrow \text{Ne}^+ + 2\text{e}$	求解玻尔兹曼方程得到	
	$\text{Ne} + \text{e} \rightarrow \text{Ne}^+ + 2\text{e}$	求解玻尔兹曼方程得到	
	$\text{Ne} + \text{e} \rightarrow \text{Ne}^* + \text{e}$	求解玻尔兹曼方程得到	
中性粒子碰撞反应	$\text{Ne}_2^* + \text{e} \rightarrow 2\text{e} + \text{Ne}_2^+$	$9.75 \times 10^{-9} T_e^{0.71} \exp(-3.4/T_e)$	[13]
	$\text{Ne}_2^+ + \text{e} \rightarrow \text{Ne}^* + \text{Ne}$	$3.7 \times 10^{-8} T_e^{-0.43}$	[13]
	$\text{Ar}^+ + 2\text{Ar} \rightarrow \text{Ar}_2^+ + \text{Ar}$	$2.5 \times 10^{-31} \text{ cm}^6 \cdot \text{s}^{-1}$	[3]
	$\text{Ar}^+ + \text{F}^- \rightarrow \text{ArF}^*$	$1 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	[3]
	$\text{Ar}_2^+ + \text{F}^- \rightarrow \text{ArF}^* + \text{Ar}$	$1 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	[3]
	$\text{Ar}^{\text{ex}} \rightarrow \text{Ar} + h\gamma'$	1.0 ns	[3]
	$\text{Ar}^* + \text{F}_2 \rightarrow \text{ArF}^* + \text{F}$	$8 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	[3]
	$2\text{Ne}^* \rightarrow \text{Ne}^+ + \text{Ne} + \text{e}$	$5 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	[14]
	$\text{Ne}^+ + 2\text{Ne} \rightarrow \text{Ne}_2^+ + \text{Ne}$	$4.4 \times 10^{-32} \text{ cm}^6 \cdot \text{s}^{-1}$	[14]
	$\text{Ne}^* + \text{Ne} + \text{Ne} \rightarrow \text{Ne}_2^* + \text{Ne}$	$4 \times 10^{-34} \text{ cm}^6 \cdot \text{s}^{-1}$	[14]
	$\text{Ar} + \text{ArF}^* \rightarrow 2\text{Ar} + \text{F}$	$9 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	[14]
	$\text{Ne} + \text{ArF}^* \rightarrow \text{Ar} + \text{Ne} + \text{F}$	$1 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	[14]
$\text{F}_2 + \text{ArF}^* \rightarrow \text{Ar} + 3\text{F}$	$1.9 \times 10^{-9} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	[14]	
受激辐射	$\text{ArF}^* + h\gamma \rightarrow \text{ArF} + 2h\gamma$	$4 \times 10^{-16} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	[14]
光子吸附损耗	$h\gamma + \text{F}^- \rightarrow \text{F} + \text{e}$	$1 \times 10^{-17} \text{ cm}^3$	[3]
	$\text{Ar}^{\text{ex}} + h\gamma \rightarrow \text{Ar}^+ + \text{e}$	$1 \times 10^{-18} \text{ cm}^3$	[3]

示的反应为主要反应. 与电子有关的反应速率都与电子能量分布有关, 需要求解玻尔兹曼方程得到. 从反应系数来看, 形成 ArF* 的三个主要通道中 $\text{Ar}^+ + \text{F}^- \rightarrow \text{ArF}^*$ 和 $\text{Ar}_2^+ + \text{F}^- \rightarrow \text{ArF}^* + \text{Ar}$ 较容易发生, 在放电过程中是否这两个通道占主导地位还要根据 Ar^+ , F^- , Ar_2^+ 的粒子数密度综合分析.

3 能量沉积效率分析

目前, 光刻用 ArF 准分子系统激励方式主要为放电抽运, 放电电路如图 5 所示, 通过对电容充电, 将能量储存, 之后经过电极放电将能量注入到激光工作气体中. 电容 C_1 中储存的能量称为注入能量

Q (公式中 C 为电容值, U 为电容两端的电压值),

$$Q = \frac{1}{2}CU^2.$$

工作气体吸收的能量称为沉积能量 Q' ,

$$Q' = \int U' I dt,$$

其中, U' , I 为工作气体内部电压、电流值, Q 与 Q' 的比值 η 为能量沉积效率. 沉积的能量值是工作气体进行动力学反应能够利用的最多能量值. 能量沉积效率的高低直接影响后续动力学反应能否顺利进行, 以下为单次电脉冲抽运情况下的计算仿真情况.

通过仿真计算可知, 充电电压为 22 kV 时, C_1

储能 $Q = 1.96 \text{ J}$. 当 $\text{F}_2/\text{Ar}/\text{Ne}$ 混合气体的比例约为 $1 : 14 : 650$ 时, 等离子体能量沉积为 1.20 J , 能量沉积效率为 61.12% . 工作气体内部电压、电流及光子数密度随时间的变化如图 6 所示. 从图 6 可以看出, 等离子体首次击穿时间发生在 $100\text{--}150 \text{ ns}$ 之间, 电压峰值为 23000 V , 电流峰值为 1500 A . 此后, 等离子体间电压不断振荡. 等离子体间电压不断振荡说明等离子体并没有完全吸收注入能量, 调节气体配比, 可以改变能量沉积效率. 保持充电电压为 22 kV 不变, 改变 F_2 , Ar 在混合气体中的比例, 可以得到不同气体配比情况下的能量沉积效率曲线, 如图 7 和图 8 所示. 图 7 和图 8 数据显示, 能量沉积效率随 F_2 的配比变化先增大后减小, Ar 的对比对能量沉积效率影响不大. 这是由于 F_2 与电子的附着反应消耗能量较少, 电子优先与 F_2 迅速反应形成 F^- . F_2 比例较低时, 没有足够的 F^- 粒子,

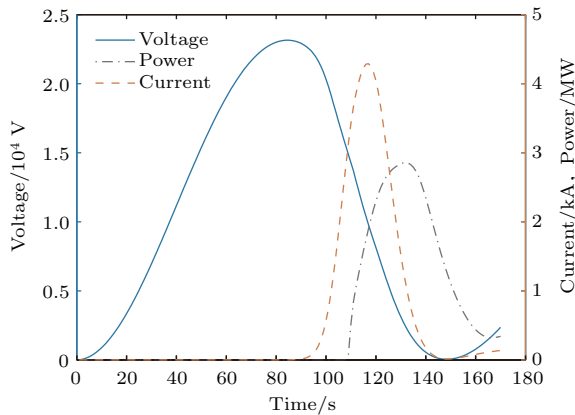


图 6 工作气体内部电压、电流随及输出光功率随时间的变化
Fig. 6. Waveforms of discharge voltage, current and laser power.

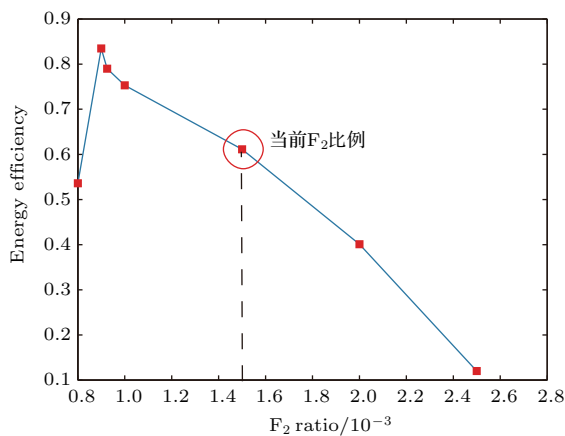


图 7 不同 F_2 配比情况下, 能量沉积效率曲线
Fig. 7. Energy deposition efficiency under different F_2 ratio values.

不能支持后续化学动力学反应的发生, 因此能量沉积效率较低. 随着 F_2 比例增大, F^- 粒子数量增多, 大量电子被消耗, 等离子体间由带电粒子移动形成的电流减小, 导致等离子体沉积能量迅速下降. 另外, F_2 非弹性碰撞截面较大, 使得能量损失较为严重, 这也导致等离子体沉积能量迅速下降^[15]. 因此, F_2 对能量沉积效率影响较大, 存在最优的 F_2 配比值, 在实际 ArF 准分子系统设计过程中可以通过优化 F_2 配比提升系统能量沉积效率. 在目前的气体配比情况下, 减少 F_2 比例, 可以提高系统能量沉积效率, 改变 Ar 配比, 系统能量沉积效率变化不大.

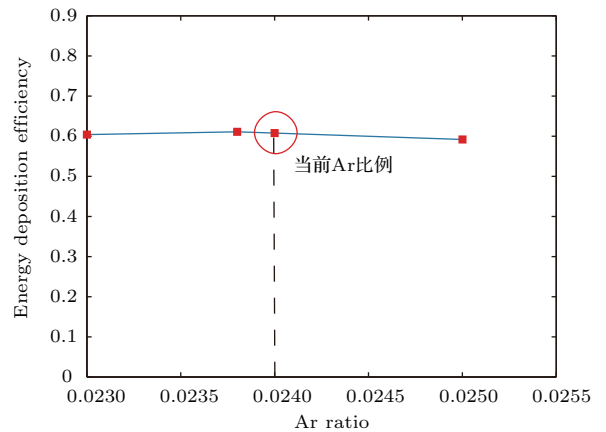


图 8 不同 Ar 配比情况下等离子体能量沉积效率曲线
Fig. 8. Energy deposition efficiency under different Ar ratio values.

4 ArF^* 形成过程分析

ArF 准分子激光系统的激光输出主要依赖于 ArF^* 的受激辐射, ArF^* 形成过程效率的高低直接影响系统输出能量.

综合表 1 及 ArF 准分子激光放电力过程特点, ArF^* 的形成通道主要有三个:

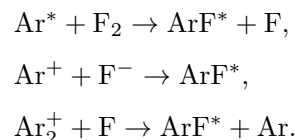


图 9 为 ArF^* 形成通道的反应速率随时间的变化. 从图 9 可以看出, $\text{Ar}^* + \text{F}_2 \rightarrow \text{ArF}^* + \text{F}$ 反应速率最大, 是 ArF^* 生成的主要通道, 改变 F_2 组分将对 ArF^* 的形成产生影响. $\text{Ar}^* + \text{F}_2 \rightarrow \text{ArF}^* + \text{F}$ 的反应速率随 F_2 配比变化情况如图 10 所示. 从图 10 可以看出, 在一定范围内 $\text{Ar}^* + \text{F}_2 \rightarrow \text{ArF}^*$

+F 的反应速率随 F₂ 组分的增加而增加, 适当地增加混合气体中 F₂ 比例, 有助于 ArF* 的生成.

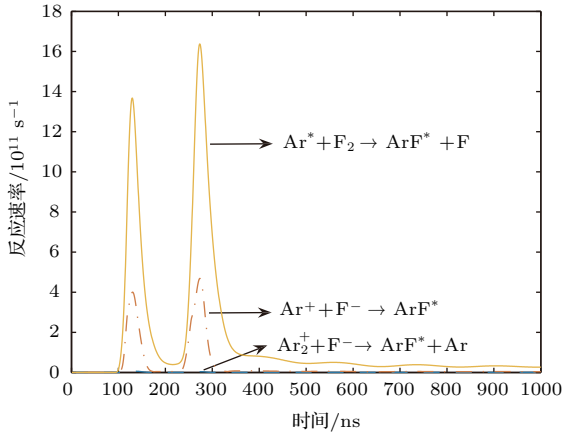


图9 ArF* 形成通道反应速率随时间的变化

Fig. 9. ArF* formation rate curves.

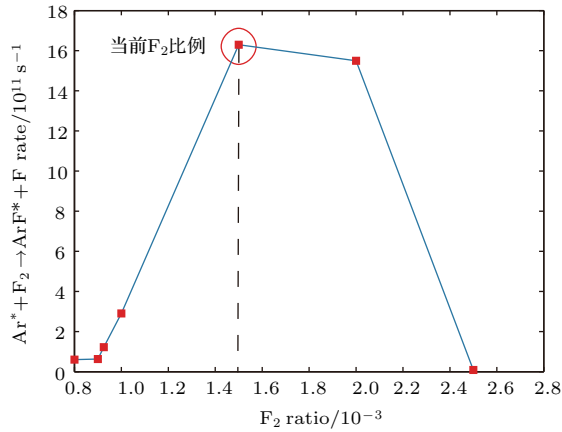


图10 ArF* 形成通道反应速率随气体组分的变化

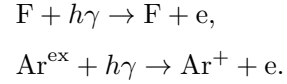
Fig. 10. ArF* formation rate under different gas components.

5 激光能量输出效率分析

ArF* 除伴随能级跃迁产生光子外, 还会与混合气体中的 Ar, F₂, Ne 反应淬灭, 仿真计算 ArF* 与 Ar, F₂, Ne 的反应速率如图 11 所示. 从图 11 可以看出, Ne 与 ArF* 反应为 ArF* 淬灭的主要通道. Ne, Ar 与 ArF* 的反应系数几乎相等, 但混合气体中 Ne 占绝大部分, 虽然 F₂ 与 ArF* 的反应系数较大, 但 F₂ 比例较小, 因此 Ne 与 ArF* 的反应成为 ArF* 淬灭的主要通道.

ArF* 的受激辐射产生光子, 但光子在混合气体中也可能被其他粒子吸收, 形成损耗. 除散射以

及激光腔内损耗外, 光子损耗的主要途径为



两种途径的反应速率随时间变化仿真情况如图 12 所示. 从图 12 可以得出, F⁻ 对光子的消耗起主要作用, 随着光脉冲的产生及光子数密度的增大, 这种消耗作用也会有显著增长. 这也正是系统输出能量会随着 F₂ 在混合气体中的比例增大而下降的原因 [15].

总体来说, F₂, F⁻ 对激光能量输出效率影响较大, 混合气体中 F₂ 比例过少不能形成足够的 ArF*, 影响激光输出效率, 但过多的 F₂ 会使光子损耗严重, 也不利于激光能量的输出, 存在满足系统激光输出效能的最佳 F₂ 组分比例值, 仿真结果已在相关文献中得到实验验证.

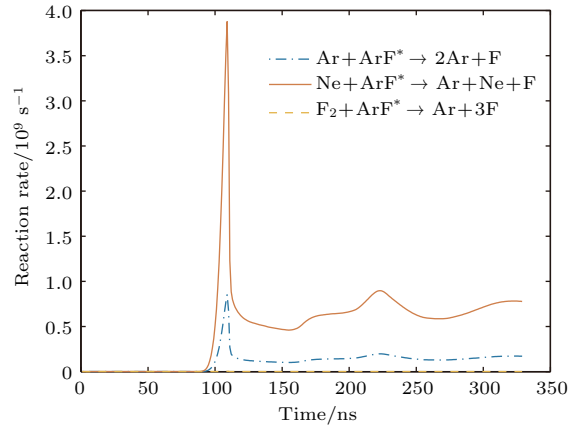


图11 ArF* 淬灭反应速率随时间的变化

Fig. 11. ArF* quenching rate curves.

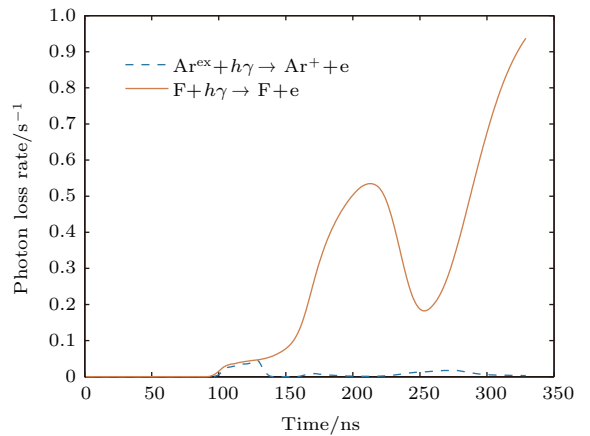


图12 光子损耗通道反应速率随时间的变化

Fig. 12. Photon quenching rate curves.

6 结 论

通过一维流体模型对 ArF 准分子激光系统放电过程进行了仿真模拟, 深入研究了高气压等离子体放电机理, 分析了混合气体的配比对准分子激光器能量利用效率的作用; 同时研究了 F₂ 组分比例变化对系统能量利用效率的影响, 相关仿真计算结果对于 ArF 准分子激光系统研究有一定的帮助, 部分仿真结果已在相关文献中得到实验验证^[15], 相关工作的开展对于深入研究 ArF 准分子激光系统放电力过程, 优化系统气体高压放电结构特性具有重要的工程应用价值.

参考文献

- [1] Vladimir F, Slava R, Robert B, Hong Y, Kevin O, Robert J, Fedor T, Efrain F, Theodore C, Daniel B, William P 2008 *Proc. SPIE* **6924** 69241R
- [2] Johnson T, Palumbo L, Hunter A 1979 *IEEE J. Quantum Electron.* **15** 289
- [3] Akashi H, Sakai Y, Tagashira H 1995 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **28** 445
- [4] Xiong Z, Kushner M J 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 083304
- [5] Luo S W, Zuo D L, Wang X B 2015 *High Power Laser and Particle Beam* **27** 081006 (in Chinese) [罗时文, 左都罗, 王新兵 2015 强激光与粒子束 **27** 081006]
- [6] Zhang Z H, Zhang G J, Peng X J, Chang Z S, Peng Z Y, Xu H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 245205 (in Chinese) [张增辉, 张冠军, 邵先军, 常正实, 彭兆裕, 许昊 2012 物理学报 **61** 245205]
- [7] Zhang Z J, Shao X J, Zhang G J, Li Y X, Peng Z Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 045205 (in Chinese) [张增辉, 邵先军, 张冠军, 李娅西, 彭兆裕 2012 物理学报 **61** 045205]
- [8] Yang C G 2013 *Ph. D. Dissertation* (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology) (in Chinese) [杨晨光 2013 博士学位论文 (武汉: 华中科技大学)]
- [9] Shi F 2008 *M. S. Dissertation* (Dalian: Dalian University of Technology) (in Chinese) [石锋 2008 硕士学位论文 (大连: 大连理工大学)]
- [10] Zhou B K, Gao Y Z, Chen T R, Chen J H 2009 *Theory of Laser* (Beijing: National Defense Industry Press) p147 (in Chinese) [周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 陈家骅 2009 激光原理 (北京: 国防工业出版社) 第 147 页]
- [11] Mieko O, Minoru O 1988 *J. Appl. Phys.* **63** 1306
- [12] Kulikovskiy A A 1994 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **27** 2556
- [13] Rauf S, Kushner M J 1999 *J. Appl. Phys.* **85** 3460
- [14] Razhev A M, Shchedrin A I, Kalyuzhnaya A G, Zhupikov A A 2005 *Quantum Electron.* **35** 799
- [15] Nagai S, Masahiro S, Hideo F, Akihiro K, Toshio G, Yoshiyuki U 1998 *IEEE J. Quantum Electron.* **34** 40

Energy efficiency analysis of ArF excimer laser system*

Wang Qian¹⁾²⁾³⁾ Zhao Jiang-Shan¹⁾²⁾ Luo Shi-Wen⁴⁾ Zuo Du-Luo⁴⁾ Zhou Yi^{1)2)†}

1) (*Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China*)

2) (*Beijing Excimer Laser Technology and Engineering Center, Beijing 100094, China*)

3) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

4) (*Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

(Received 4 June 2016; revised manuscript received 23 June 2016)

Abstract

The reliable functioning and continual optimizing of ArF excimer laser system is of importance when it comes to productization into the market from a laboratory test machine. The analysis of dynamic characteristics of the system is vital to understanding its operating mechanism and optimizing the design theoretically. In this article, one-dimensional fluid model is used to analyze the excimer laser discharge mechanism, and the content ratio of fluorine gas, argon gas, and neon gas, which constitute a gas mixture, is studied in a simulated ArF excimer laser system. Particles are treated as a fluid, which significantly reduces the computing cost in fluid model, and therefore is suitable for high-pressure situation. Four equations are included in one-dimensional fluid model, i.e., Boltzmann equation that describes electron energy distribution, ion continue equation that illustrates ion number density, Poisson's equation that shows the distribution of electric field, and photon rate equation that demonstrates laser outputting process. By combining these four equations, high pressure plasma discharge process and particles stimulated radiation process are studied, and calculation continues from one time step to another until the end of discharging process. The result of the calculation presents energy transfer process from three aspects: energy deposition efficiency, ArF* formation, and laser outputting. In the energy deposition process, the energy deposition efficiency is sensitive to the change of fluorine gas ratio while the variation of the content ratio of other two gases has a less influence on this process. In addition, there exists an optimal fluorine gas ratio that causes the highest energy deposition efficiency. In the ArF* formation process, the reaction between excited argon ions and fluorine gas is the main channel that generates ArF*. The proper increasing of fluorine gas ratio helps form ArF*. In the laser outputting process, photon loss is mainly because of the reaction between fluorine negative ions and photons. Therefore superfluous fluorine gas in the mixture leads to less photons, which eventually results in low energy efficiency of laser. By summarizing the three aspects of energy transfer process, the fluorine gas ratio in the gas mixture plays a significant role in determining the energy efficiency of ArF excimer laser system. This theory is verified by experiments, showing that the deviation of the optimized fluorine gas ratio severely reduces energy efficiency. This conclusion can guide us in optimizing the design and steady reliable function of ArF excimer laser system.

Keywords: ArF excimer laser, energy efficiency, fluid model, electron density

PACS: 42.55.Lt, 51.50.+v, 52.80.-s

DOI: 10.7498/aps.65.214205

* Project supported by the Innovation Program of Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences (Grant No. Y50B16A12Y) and the National Science and Technology Infrastructure Program of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2013ZX02202).

† Corresponding author. E-mail: zhouyi@aoe.ac.cn