

## 优化的一维激光清理空间碎片流体力学模型

朱 殷<sup>1</sup>, 陈 浩<sup>2</sup>, 徐 融<sup>1</sup>, 赵 飞<sup>1</sup>

(1. 中国科学院光电研究院 空间系统总体室, 北京 100094;

2. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

**摘 要:** 优化了一维纳秒脉冲激光等离子体化空间碎片的流体力学模型。流体力学模型分为等离子体状态方程求解、空间碎片与激光能量耦合计算、激光推进冲量耦合系数计算三个模块。在各模块实现的基础上, 重点分析了碎片等离子体温度、速度、压强、密度的时间和空间分布规律。考虑到等离子体屏蔽效应对激光效能的影响, 提出等离子体对激光逐层吸收的计算方法, 更准确分析激光功率密度和脉宽对激光清理空间碎片效能的影响, 提出了获取最优激光效能的方法。最后与实验经验公式解相比较, 验证了优化模型的正确性。

**关键词:** 空间碎片; 等离子体; 纳秒脉冲激光; 冲量耦合系数

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.S129002

## Optimized one-dimensional fluid mechanics model for laser cleaning up space debris

Zhu Yin<sup>1</sup>, Chen Hao<sup>2</sup>, Xu Rong<sup>1</sup>, Zhao Fei<sup>1</sup>

(1. Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. Beijing Institute of Tracking and Telemetry Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The optimized fluid mechanics model was fabricated to solve the plasma of space debris excited by nanosecond pulse laser. Fluid mechanics model was divided into solution of plasma state equation, energy coupling between laser and space debris and momentum coupling coefficient. In each module implements, time and space distribution of temperature, velocity, pressure and density of debris plasma were analyzed. Considering the influence of plasma shielding effect to the laser efficiency, innovation was put forward to achieve the highest efficiency of laser to clean up space debris by the method of absorption mechanism of layer by layer. Influences of pulse width and power density to the momentum coupling coefficient were achieved. Finally, comparing the result to experimental experience data prove the verification of the simulation.

**Key words:** space debris; plasma; nanosecond pulse laser; momentum coupling coefficient

收稿日期: 2016-02-04; 修订日期: 2016-03-06

基金项目: 北京市自然科学基金(8154055)

作者简介: 朱殷(1985-), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事激光与材料相互作用方面的研究。Email: zhuyin@aoe.ac.cn

通讯作者: 赵飞(1977-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事空间目标探测与识别方面的研究。Email: zhaofei@aoe.ac.cn

## 0 引言

天基高能激光技术是主动清理空间碎片的一种有效方法,它利用高能脉冲激光与碎片物质相互作用产生的等离子体膨胀而形成的推力,将空间碎片推进到指定位置,从而达到空间轨道碎片清理的目的。因此,发展天基高能脉冲激光清理空间碎片技术能够为空间安全研究提供新的手段,这对提升我国空间军事对抗的能力具有重要作用和重大意义。

在地基激光清理空间碎片方面,1993 年美国 Sandia 国家实验室的 Monroe 提出利用核能泵浦地基激光清理近地轨道空间碎片<sup>[1]</sup>。1996 年 Phipps 等提出采用地基高能激光清理 1 500 km 轨道高度上的空间碎片的方案<sup>[2]</sup>。1999 年德国 DLR 物理研究所的 Bohn 提出一种基于高能脉冲化学氧碘激光器的空间碎片清除方法<sup>[3]</sup>。2010 年美国的 Rubenchik 等提出 "LIFE" 激光系统用于空间碎片清理,主要采用高重频的二极管泵浦技术。

在天基激光清理空间碎片方面,2002 年德国 DLR 物理研究所的 Schall 提出基于平均功率 100 kW 级的激光器可以清理相距 70 km、质量为 100 g 的铝材料碎片<sup>[4]</sup>。近年来,NASA 还提出利用装在太空望远镜上的一个中等功率激光器可使太空垃圾偏离原轨道约 200 m。

2004 年彭玉峰等人初步研究了强激光清除空间碎片的力学行为<sup>[5]</sup>。2011 年徐浩东等人重点介绍了地基激光空间碎片清除系统的组成和工作流程。2012 年金星等人分析了厘米级空间碎片的激光清除过程<sup>[6-8]</sup>。但总体而言,目前国内采取激光方式清理空间碎片更多处于理论初探和综述阶段。

强激光和空间碎片物质的相互作用物理机制是天基激光清理宇宙碎片的理论基础。20 世纪 70 年代末期,中国科学院上海光学精密机械研究所开展了激光与等离子体相互作用的研究,主要工作是在热核聚变和等离子体物理方面。国防科学技术大学开展了一些冲击波及层裂破坏的数值模拟工作。2000 年孙承纬等对激光作用于固体靶后、靶中温度场、应力波传播、靶前 LSC 波、LSD 波形成及冲量耦合等问题做了一系列研究<sup>[9]</sup>。2006 年童慧峰等考虑了等离子体状态方程以及激光与等离子体的相互作

用,但没有考虑等离子体屏蔽过程,也没有深入研究激光参数对推进效应的影响<sup>[10-11]</sup>。

综上所述,过去的工作忽略了等离子体屏蔽效应对内层等离子体与激光能量耦合的影响,缺乏以特定空间碎片材料为对象、尤其在空间环境中高能脉冲激光推进最优效能的深入研究。面向国家空间安全战略需求,以空间碎片清理为研究对象,在靶材动态烧蚀过程的基础上,研究高能脉冲激光与高温等离子体相互作用机理,确定满足任务需求的最优激光参数,探索激光空间应用的新手段,具有重大意义。

## 1 模型建立

优化流体力学模型,以空间碎片为研究对象,针对金属铝材料,充分考虑等离子体屏蔽效应对内层等离子体与激光能量耦合的影响,创新地采用逐层吸收模式,基于等离子体状态方程,模拟纳秒脉冲激光等离子体化空间碎片的物理过程,计算真空环境高温等离子体主要状态参数——电离度、温度、速度、压强等的变化过程。通过等离子体压强的计算进而获取入射激光功率密度与冲量耦合系数的数值关系,最终提出获取最优激光工作效能的方法。图 1 为一维纳秒脉冲激光等离子体化空间碎片铝材料的计算流程图。

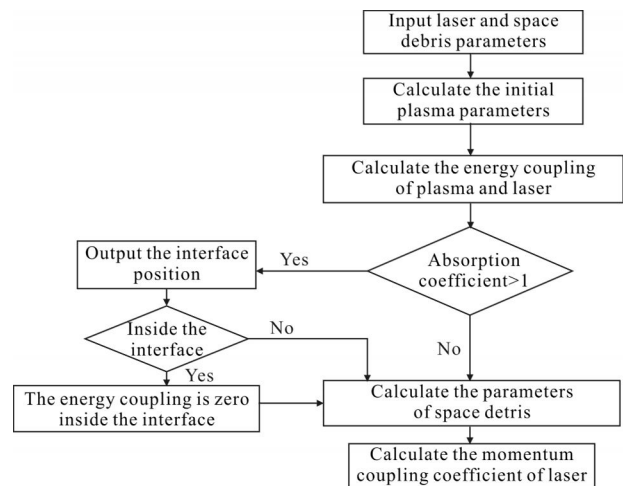


图 1 激光等离子体化空间碎片过程的计算流程图

Fig.1 Simulation flow chart of process of space debris plasma

为求解真空环境高温等离子体状态参数的动态变化,需要考虑等离子体对入射激光能量的吸收。这里将等离子体视为流体,并忽略粘性和热传导,描述靶面蒸气等离子体膨胀运动的控制方程依然可以采

用经典的一维流体动力学欧拉方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial (P + \rho u^2)}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial (e + 0.5 \rho u^2 + P)}{\partial x} + \frac{\partial (e + 0.5 \rho u^2)}{\partial t} + sI(x, t) = 0 \quad (3)$$

公式(1)~(3)分别为质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程。其中  $u$  为等离子体喷溅方向速度;  $\rho$  为密度;  $e$  为单位体积总能量;  $P$  为等离子体压强。激光与等离子体的能量耦合通过能量守恒方程中的  $sI(x, t)$  项计入方程组的计算<sup>[9]</sup>,  $I(x)$  为沿激光入射方向的激光功率密度。

等离子体对激光能量的吸收主要通过自由电子, 吸收方式涉及谱线吸收、连续吸收和散射三类。其中, 连续吸收是主要方式, 又包括逆韧致吸收和光致电离吸收两种。逆韧致吸收是指等离子体对激光能量的吸收通过等离子体中的电子实现, 电子在高频振荡的电磁场中被加速得到能量, 然后与周围电子、离子、原子等发生碰撞, 电子能量被转移到等离子体中, 再通过传导、对流、辐射等方式传递给周围工质。吸收系数和靶材、电离度、激光波长以及等离子体温度等相关。假定电子的速度服从 Maxwell 分布, 得到等离子体的逆韧致吸收系数  $(\text{cm}^{-1}) s = 0.0177 \alpha (\alpha + 1)^2 C^{-2} N_0^2 \lambda^2 T^{-1.5}$ , 其中  $\alpha$  为等离子体的电离度,  $C$  为光速,  $N_0$  为单位质量的原子数,  $\lambda$  为入射激光波长,  $T$  为等离子体的温度。

将等离子体的吸收系数表达式代入欧拉方程组, 即可求解等离子体与入射激光耦合后的状态参数。

## 2 流体运动模型优化和计算分析

初始时刻假定已经在固体靶面受激光辐照的区域形成一薄层等离子体, 称为初始等离子体区(图2中 AC 区域)。计算考察该初始等离子体在一个脉冲时间内的运动过程。

在计算获得等离子体温度和密度的空间分布的基础上, 建立如图 2 所示的等离子体对激光逐层吸收的模式: 即通过计算离子的密度和温度的时间和空间分布, 逐层计算等离子体的电离度, 进而获取等离子体对激光吸收系数的空间分布。该方法的优点在于通过等离子体温度和密度分布的逐层计算,

进而获取不同层面的电离度, 最终获得等离子体对激光吸收系数的逐层分布。当吸收系数达到 100%, 即在此层面入射激光被等离子体完全吸收, 则发生等离子体屏蔽效应。此时屏蔽界面内为等离子体无源自由扩散过程, 对激光吸收为 0, 如图 1 所示。因此优化模型能够充分考虑到等离子体屏蔽效应对激光效能的影响, 进而准确分析入射激光参数对激光清理空间碎片的效能的影响。

$x$  为等离子体的膨胀方向, 除初始等离子体域外的整个计算域的初始条件取为真空条件。计算靶材料为铝, 激光波长为 1 064 nm, 计算时间为 8 ns。假设在入射激光功率密度  $I_0$  照射下直接喷溅出等离子体, 忽略熔融和气化过程的迟滞时间。假设等离子体喷射的瞬间, 即 AC 的边界区域, 等离子体来不及膨胀, 其密度来不及改变, 即为铝材料的液体密度, 即  $\rho_0 = 2300 \text{ kg/m}^3$ 。由于等离子体的密度在喷溅后迅速减小, 故在网格化计算的过程中, 密度为  $\rho_0 = 2300 \text{ kg/m}^3$  的区域非常薄。假设在某一温度产生等离子体, 该温度下铝被电离且电离度很小, 取此时的电离度为 0.1, 可视为理想气体, 故反解得等离子体的初始温度为 0.5 eV。在此阶段, 由单原子气体分子速度的麦克斯韦统计分布公式,  $V$  为气体分子速度,  $Kb$  为玻耳兹曼常数,  $T$  为气体温度,  $m$  为气体分子的质量, 当  $T = 0.5 \text{ eV}$  时, 等离子体  $v_0 = 1500 \text{ m/s}$ 。

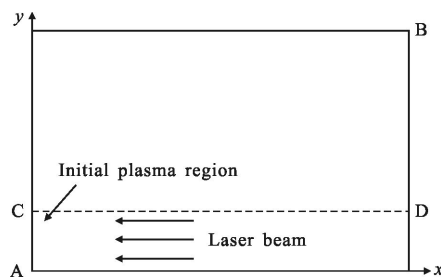


图 2 初始等离子区域示意图

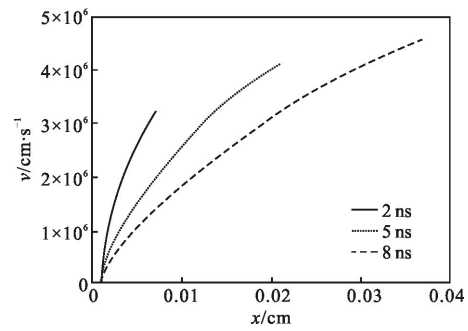
Fig.2 Schematic diagram of origin plasma

图 3(a)~(d)给出了不同时刻等离子体密度、压强、温度、速度随时间(2、5、8 ns)和空间的分布图, 其中脉冲宽度为 8 ns, 直观地模拟了等离子体膨胀运动的一维过程, 箭头方向为等离子体膨胀方向, 也是时间的推移方向。由等离子体速度和密度分布图可以看出, 在激光作用期间, 等离子体沿着逆激光入射方向( $x$  方向)迅速膨胀, 吸收入射激光能量使得其形

成沿逆激光方向传播的吸收激光能量的等离子体冲击波。等离子体的速度是与其密度有关的物理量,当密度很高时,速度较小,随等离子体的膨胀,密度迅速减小,速度增大。

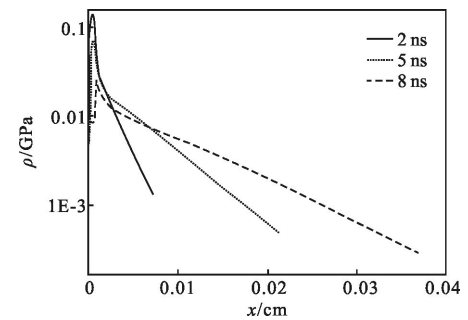
压力计算结果是计算激光推进冲量耦合系数的关键。由图 3(d)可以看出:真空环境下,高功率激光入射于固体靶表面,靶材烧蚀形成的等离子体向外喷射,气化面(烧蚀面)向靶内移动。由于流体动压力和电子热传导的作用,烧蚀面前方靶介质的压力和温度跃升,并驱动一个强冲击波向未受扰的靶介质中传播。在烧蚀面后方(朝着激光入射方向)是靶蒸气等离子体膨胀区,在等离子体区中距烧蚀面越远,其密度、压力等越小,在紧靠烧蚀面附近最高。

在激光作用下,空间碎片等离子体在临界面处完全电离,吸收绝大部分激光能量而迎着激光入射方向运动,压缩尚未完全电离的蒸气。但由于随着距碎片表面距离的增加等离子体的密度迅速减小,使得临界面的运动速度下降并很快消失,而此时又产生新的临界面。因此空间环境下碎片等离子体中不能产生稳定的激光吸收波,这与大气环境中是有本质不同的。



(c) 不同时刻等离子体速度的空间分布

(c) Spatial distribution of velocity of plasma at different time

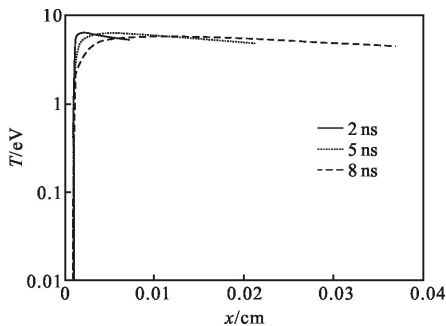


(d) 不同时刻等离子体压力的空间分布

(d) Spatial distribution of pressure of plasma at different time

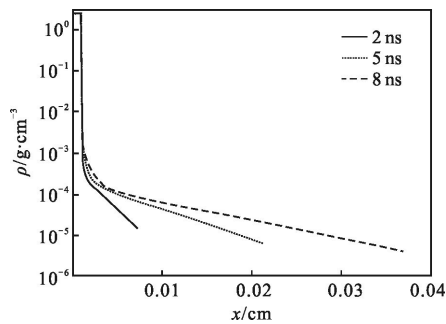
图 3 不同时刻等离子体参量的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of plasma at different times



(a) 不同时刻等离子体温度的空间分布

(a) Spatial distribution of temperature of plasma at different time



(b) 不同时刻等离子体密度的空间分布

(b) Spatial distribution of density of plasma at different time

### 3 冲量耦合系数的计算和实验比较

冲量耦合系数  $C_m$  是衡量激光推进效应的重要参数:

$$C_m = \frac{\int P(t)dt}{I(t)} \quad (4)$$

由公式(4),根据压强  $P(t)$  的仿真结果可以计算激光推进的冲量耦合系数,如表 1 和图 4 所示。分析激光功率密度对冲量耦合系数的影响,可以评估天基激光清理空间碎片的效能。Phipps 由大量的实验数据拟合得到了脉冲激光烧蚀铝材料的冲量耦合系数经验公式  $C_m = b(I\lambda\sqrt{\tau})^n$ ,其中  $b, n$  与材料有关<sup>[12]</sup>。表 1 显示了不同激光功率密度下冲量耦合系数的仿真结果和经验实验结果。

由表 1 可知,随着脉冲激光功率的增加,空间碎片获得的冲量增大,但激光冲量耦合系数却先增加后减少。随着入射激光功率密度的增加,冲量耦合系数开始增大;当入射激光功率密度到达  $2.5 \times 10^{12} \text{ W/m}^2$  时,

冲量耦合系数达到峰值 6.28 dyne/W;继续增大入射激光功率密度,冲量耦合系数却反而减少,如图 4所示。

表 1 模型仿真结果与实验经验公式解对照

Tab.1 Comparison of result between simulation and empirical formula

$I_0/W \cdot m^{-2}$	$\tau/ns$	$\lambda/nm$	Simulation $C_m$ /dyne · W <sup>-1</sup>	Empirical $C_m$ /dyne · W <sup>-1</sup>
1.5×10 <sup>12</sup>	8	1 064	5	4.8
2×10 <sup>12</sup>	8	1 064	5.8	5.5
2.3×10 <sup>12</sup>	8	1 064	6.12	6.0
2.5×10 <sup>12</sup>	8	1 064	6.28	6.1
5×10 <sup>12</sup>	8	1 064	3.48	3.3
10×10 <sup>12</sup>	8	1 064	2.96	2.8

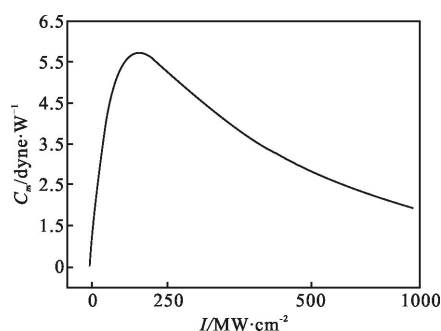


图 4 8 ns 脉宽激光功率密度对冲量耦合系数的影响

Fig.4 Effect of power density to the momentum coupling coefficient for 8 ns laser

这种现象产生的一个重要原因是空间碎片等离子体对激光的屏蔽效应。随着等离子密度的升高,吸收系数逐渐增强,等离子区对激光的吸收增大。当等离子体区域的温度和密度达到临界条件时,激光被等离子区完全吸收,等离子区形成对激光的屏蔽,称为等离子体屏蔽效应。当固体靶面等离子体区产生以后,后续入射的激光能量不能全部到达固体靶面继续产生烧蚀作用,这就减小了激光能量与靶的耦合。

激光的脉冲宽度也是影响等离子体屏蔽效应,进而影响冲量耦合系数的一个关键因素。若激光脉冲宽度低于等离子体屏蔽效应发生的时间,则不会发生等离子体屏蔽效应,因此降低激光脉冲宽度也可增加激光冲量耦合系数,提高激光推进的效能。

优化模型仿真结果和实验经验公式的解非常接

近,证明了模型的可靠性。同时,考虑到等离子体屏蔽的逐层吸收模型也充分反应了等离子体屏蔽效应。优化流体力学模型为激光功率密度的选取提供了理论依据,能够提高激光冲量耦合系数,优化激光工作效能。

## 4 结论

根据上述分析,可以得到以下结论:

(1) 优化了一维纳秒脉冲激光等离子体化空间碎片的流体力学模型,通过和实验经验公式的解进行比较,验证了模型的可靠性。

(2) 由理论模拟,呈现了真空环境中碎片等离子体的运动过程,获得了等离子体温度、速度、压强、电离度、密度等参数的空间分布和时间分布,并分析了其规律。

(3) 考虑到高温等离子体屏蔽效应对内层等离子体与激光能量耦合的影响,创新地采用激光逐层吸收模式,通过对纳秒脉冲激光等离子体化空间碎片的冲量耦合系数的计算,分析了激光功率密度对激光工作效能的影响,提出了获得最高冲量耦合系数的激光功率密度的方法。

## 参考文献:

- [1] Monroe D K. Space debris removal using high-power-ground-based laser [C]//AIAA Space Programs and Technologies Conference and Exhibit, 1993: 1-6.
- [2] Phipps C R. ORION: clearing near-earth space debris in two years using a 30 kW repetitively-pulsed laser [R]. Edinburgh: SPIE Digital Library, 1997, 3092: 728-731.
- [3] Bohn W L. Pulsed COIL for space debris removal [C]//SPIE Conference on Gas and Chemical Laser and Intense Beam Applications, 1999, 3612: 79-84.
- [4] Schall W. Laser radiation for cleaning space debris from lower earth orbit [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2002, 39(1): 81-91.
- [5] Peng Yufeng, Sheng Zhaoxia, Zhang Hu, et al. The preliminary study on mechanical behavior of high-power laser cleaning space debris [J]. *Applied Laser*, 2004, 24(1): 24-26. (in Chinese)  
彭玉峰, 盛朝霞, 张虎, 等. 强激光清除空间碎片的力学行为初探[J]. *应用激光*, 2004, 24(1): 24-26.
- [6] Chang Hao, Jin Xing, Hong Yanji, et al. Modeling and

- simulation on ground-based lasers cleaning space debris [J]. *Acta Aeronauticaet Astronautica Sinica*, 2012, 33(6): 994–1001. (in Chinese)
- 常浩, 金星, 洪延姬, 等. 地基激光清除空间碎片过程建模与仿真[J]. 航空学报, 2012, 33(6): 994–1001.
- [7] Jin Xing, Hong Yanji, Chang Hao. Simulation analysis of removal of elliptic orbits space debris using ground-based laser [J]. *Acta Aeronauticaet Astronautica Sinica*, 2013, 34(9): 2064–2073. (in Chinese)
- 金星, 洪延姬, 常浩. 地基激光清除椭圆轨道空间碎片特性的计算分析[J]. 航空学报, 2013, 34(9): 2064–2073.
- [8] Chang Hao, Jin Xing, Wen Ming, et al. Analytical model for calculating laser ablation impulse coupling coefficient[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(5): 1110–1114. (in Chinese)
- 常浩, 金星, 文明, 等. 激光烧蚀冲量耦合系数解析计算模型[J]. 强激光与离子束, 2013, 25(5): 1110–1114.
- [9] Yuan Hong, Tong Huifeng, Sun Chengwei, et al. Numerical simulation of impulse coupling to aluminum target in laser ablation in vacuum [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(12): 2853–2856. (in Chinese)
- 袁红, 童慧峰, 孙承伟, 等. 真空环境下激光烧蚀铝靶冲量耦合系数的数值模拟 [J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(12): 2853–2856.
- [10] Li Jing, Tong Huifeng, Tang Zhiping. Multi-use laser impulse pendulum and laser propulsion parameters measurement[J]. *Chinese Optics Letters*, 2004, 2(11): 650–653.
- [11] Tong Huifeng, Tang Zhiping, Gong Ping, et al. E – xperimental study of ablation model-aser propulsion[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16 (11): 1380 – 1384. (in Chinese)
- 童慧峰, 唐志平, 龚平, 等. “烧蚀模式”激光推进的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(11): 1380–1384.
- [12] Phipps C R. Impulse coupling to targets in vacuum by KrF, HF, and CO<sub>2</sub> single pulse lasers [J]. *J Appl Phys*, 1988, 64 (3): 1083.