

X 光预电离 KrF 准分子激光参量的研究

楼祺洪 董景星 魏运荣 丁泽安 霍芸生

(中国科学院上海光机所, 201800)

提要: 在紫外预电离准分子激光器中, KrF 激光的脉冲能量一般大于 XeCl 激光脉冲能量。在 X 光预电离条件下, 呈现相反的趋势。本文通过激光参量研究及动力学过程分析, 解释了上述现象。

关键词: KrF 准分子激光, X 光预电离。

Parametric research on X-ray preionized KrF excimer lasers

Lou Qihong, Dong Jingxing, Wei Yunrong, Ding Ze'an, Huo Yunsheng

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

Abstract: In the UV preionized excimer laser, the output energy of KrF laser is generally greater than that of the XeCl laser. Whereas the output energy of KrF laser is smaller than that of the XeCl laser with x-ray preionization. This results are explained by parametric research and kinetic analysis of the laser.

Key words: KrF excimer lasers, X-ray preionization

紫外准分子激光在材料处理上正愈来愈获得广泛的应用, 并且逐步从实验室走向半导体工业应用^[1]。近年来除了长寿命的氯化氙准分子激光获得百瓦级的输出外, 波长为 248 nm 的氟化氙准分子激光, 由于其波长较短, 峰值功率高, 正在激光光刻^[2]、激光淀积及掺杂方面向应用方向发展。此外在激光核聚变方面, 美国洛斯·阿拉莫斯实验室已建成了千焦耳 Aurora 氟化氙激光核聚变系统^[3], 与此同时, 日本电气技术实验室建立了脉冲能量为 200 J 的 Ashura 系统^[4]。

近年来, 作者对 X 光预电离氯化氙准分子激光进行了比较深入的研究^[5]。为了使紫外激光波长向短波长扩展, 本文对 X 光预电离氟化氙准分子激光的参量特性进行了研究。在商品型紫外预电离激光产品中, 同一准分子激光器采用不同的准分子激光介质, 氟化氙激光脉冲能量一般大于氯化氙激光脉冲能量。但是在 X 光预电离条件下, 呈现相反的趋势。对于这一结果, 我们用动力学过程进行分析, 定性地加以解释和讨论。

实验装置及结果

实验所用的 X 光预电离准分子激光器, 其结构由文献[5]给出。所不同的是由于采用氟气, 激光放电区及密封圈均采用耐氟材料。X 光预电离部分由电子枪及 100 kV 脉冲发生器组成, 激光放电与 X 光预电离之间的时间延迟由双路可延迟触发器调节, 在大面积电子枪中,

均匀发射的电子在真空度为 10^{-5} Torr 情况下被加速, 轰击在金属靶上, 通过韧致辐射产生 X 射线。在整个激光放电区长度方向, X 射线剂量均匀性约为 $\pm 30\%$, 在平行于 X 射线发射方向, X 射线剂量以 $r^{-0.7}$ 形式衰减, 据此, 在放电阴极与阳极处 X 射线强度比为 1:0.56。在激光放电介质中, X 射线产生的预电离密度为 $10^9 \sim 10^{10}$ 电子/cm³。

在进行氯化氙激光参量的优化实验中, 我们发现, HCl 最佳分压为 0.12% 左右。这一最佳比例与激光气体总压力有关, 一般而言, 我们采用总气压为 2.5 atm。通过求解激光放电等离子体中电子连续性方程, 分析放电过程中电子密度随时间的变化^[7], 结果表明, 均匀放电的持续时间与卤素气体浓度平方根成反比, 过高的卤素气体浓度会使放电处于不稳定状态, 从而使激光能量下降。

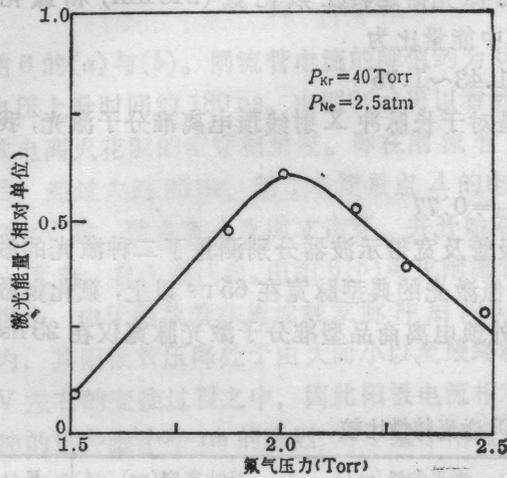


图1 在相同实验条件下, 当 Kr 气分压为 40 Torr, Ne 气分压为 2.5 atm 时, 激光能量随氟气分压变化曲线

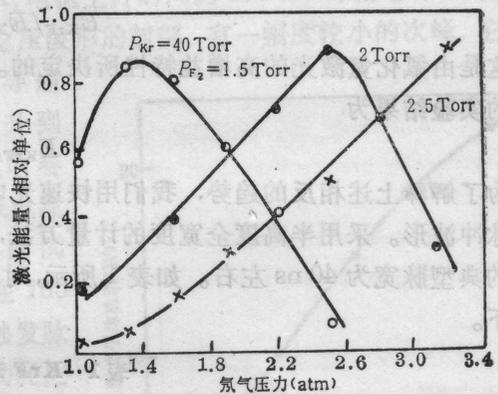


图2 当 Kr 气分压固定时, 不同 F₂ 气分压下激光输出能量随 Ne 气压力变化曲线

对于氟化氙激光, 亦得到类似的结果, 在相同的实验条件下, 我们亦对氟化氙激光的气体成份进行优化, 其结果由图 1 及图 2 给出。图 1 是不同氟气压力下激光能量的变化特性, 当总气压为 2.5 atm, 氟气分压为 40 Torr 时, 氟气的最佳分压为 2 Torr 左右 (约为 1.05%)。这一结果不仅与氯化氙激光的结果一致, 而且与 Shin Sumida 等人^[8] 1978 年最早报道 X 射线预电离高压氙化氙激光的结果很接近, 在他们的实验中, 当总气压为 2.5 atm 时, 最佳氟气分压为 2.4 Torr。

当氟气分压为 40 Torr 不变的情况下, 不同氟分压下激光能量随总气压的变化由图 2 给出。上述结果表明, 在 X 射线预电离条件下, 对于氯化氙和氟化氙激光, 在卤素气体最佳分量、激光能量随总气压变化的特性上有相似之处。但是实验

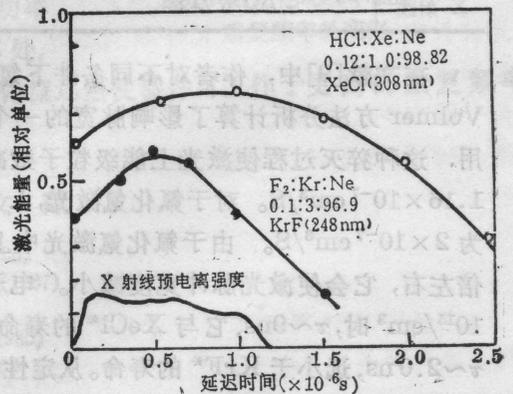


图3 不同延迟时间下, XeCl 和 KrF 激光输出特性比较。图中还给出了 X 射线预电离强度随时间的变化

也表明二者的特性有明显的不同之处: (1)在气体成份优化的条件下、氯化氙激光最大脉冲能量大于相同放电条件下氟化氙激光脉冲能量; (2)在相同实验条件下、氯化氙激光的脉冲宽度大于氟化氙激光的脉冲宽度; (3)改变激光放电与 X 射线预电离之间的时间延迟(这个时间延迟定义为激光放电电压的初始时间与 X 光预电离电子枪电压的初始时间之间的时间间隔), 氯化氙激光比氟化氙激光有更宽的时间延迟范围, 其典型的结果由图 3 给出。

讨 论

对于一般的商品型紫外预电离准分子激光器, 氟化氙激光的脉冲能量往往大于氯化氙激光的脉冲能量。表 1 列出三种主要类型的准分子激光器运转在氟化氙 (248 nm) 和氯化氙 (308 nm) 条件下的激光脉冲能量与脉冲宽度, 其中能量比为

$$E_{\text{KrF}}/E_{\text{XeCl}}=1.43\sim 1.75$$

这是由氯化氙激光的高增益特性所决定的。但是对于长脉冲 X 射线预电离准分子激光, 我们的实验结果为

$$E_{\text{KrF}}/E_{\text{XeCl}}=0.77$$

为了解释上述相反的趋势, 我们用快速光电二极管及宽带示波器分别测量了二种激光的激光脉冲波形。采用半高度全宽度的计量方法, 氯化氙激光的典型脉宽在 65 ns 以上, 氟化氙激光的典型脉宽为 40 ns 左右。如表 1 所示, 对于紫外预电离商品型准分子激光脉宽仅在 25 ns 以下。

表 1 KrF 和 XeCl 激光特性比较

预电离方式	型 号	激光能量(mJ)		脉冲宽度(ns)		$E_{\text{KrF}}/E_{\text{XeCl}}$
		KrF	XeCl	KrF	XeCl	
UV	Lambda Physik EMG 103 MSC	250	150	23	17	1.67
	Questek INC 3000	1000	700	18~25	12~25	1.43
	Lumonics HE-400	350	200	8~25	8~12	1.75
X-射线	SIOM XZ-2	380	500	40	65	0.77

在文献[9]中, 作者对不同条件下氯化氙激光脉冲宽度作了较仔细的研究, 采用 Stern-Volmer 方法分析计算了影响脉宽的一个重要因素, 即脉冲放电中电子对 XeCl* 的去激发作用, 这种猝灭过程使激光上能级粒子数减小, 影响激光脉冲宽度的大小。这个速率常数为 $1.16 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{S}$ 。对于氟化氙激光, J. J. Ewing^[10] 给出的电子对 KrF* 的去激发速率常数为 $2 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{S}$ 。由于氯化氙激光中上能级粒子数受电子的猝灭过程约为氯化氙激光的 1 倍左右, 它会使激光脉冲宽度减小。电子去激发项 $k_e n_e n_{\text{XeCl}^*}$, 可以表达为 n_{XeCl^*}/τ , 当 $n_e \sim 10^{15}/\text{cm}^3$ 时, $\tau \sim 9 \text{ ns}$, 它与 XeCl* 的寿命 11 ns 接近。而对于 KrF* 工作气体, 由于 k_e 的增大, $\tau \sim 2.0 \text{ ns}$, 远小于 KrF* 的寿命。从定性上分析, 它会在 KrF* 布居数分布中起很重要的作用, 从而影响长脉冲放电下激光脉宽。最近, 日本 Hasama 和 Sato^[11] 研制了电极间距为 10 cm 的大口径 X 射线预电离氟化氙准分子激光, 获得脉冲能量为 12 J, 脉冲宽度亦为 40 ns。进一步分析表明, 这种猝灭行为主要对长脉冲激光脉冲产生影响, 对于短脉冲放电, 电子猝灭过程的

影响不起主导作用。

从图 3 可见,二种激光介质的预电离阶段也呈现不同的特性。作者曾对氯化氙放电泵激光器进行 X 射线预电离动力学分析^[12],指出在初始电子密度为 $10^{10}/\text{cm}^3$ 时,对于典型的激光工作气体(Ne:Xe:HCl=98.9:1:0.1),电子很快被氯化氢分子猝灭,其时间约为 ns 量级;而 Cl^- 离子是预电离阶段的主要带电负粒子,它的最大浓度可达 $10^{11}/\text{cm}^3$ 以上。 Cl^- 离子衰减比较慢,衰减时间常数为 $5 \mu\text{s}$ 。一旦激光放电开始, Cl^- 又能在几十个 ns 时间范围内转化成电子。由此,图 3 中氯化氙激光在几个 μs 宽的延迟时间范围内都能获得均匀放电及较强的激光输出。对于氟化氙工作气体,氟是比氯化氢更活泼的卤素施主,根据 Hsia^[13]的分析, F^- 离子向电子的转换效率较低,约为 3×10^{-4} 。这样对于初始电子密度的要求较高。另一方面, F^- 存在下,电子的衰减时间仅为 μs 量级。它表明,氯化氙激光在 X 光预电离情况下,需要更大的预电离强度。我们的实验结果表明,要获得均匀的激光放电及正常的激光输出,所需的最小 X 射线强度对于二种工作气体是不同的。初步结果表明,对于 XeCl 激光最小剂量可以小于 1 mR,而对于 KrF 激光约需要几 mR,比 XeCl 情况约大一个数量级。由于测量仪器精度限制,仅能给出数量级的概念,但已说明 KrF 比 XeCl 要求更高的预电离强度。

参 考 文 献

- 1 *Laser & Optronics*, 8(1), 37(1989)
- 2 K. Ogawa *et al.*, Proceedings of the symposium on laser process for Microelectric applications' Ed. by J. J. Ritsko, D. J. Ehrlich and M. Kashiwagi, The Electrochemical Society INC Pennifnton, N. J. USA
- 3 L. A. Rosocha *et al.*, "Kilojoule Operation of the Aurora KrF ICF Laser System at Los Alamos", CLEO/89 paper MG2, April, 24~28, 1989, Baltimore Maryland
- 4 Y. Owadano, "Recent Progress in Ashura, a high power KrF laser system", paper MG3, April, 24~28, 1989, Baltimore Maryland
- 5 Q. Lou *et al.*, *Opt and Laser Technology*, 19(1), 33(1987)
- 6 霍芸生 *et al.*, *激光*, 9(12), 753(1982)
- 7 楼祺洪, *物理学报*, 36(5), 668(1987)
- 8 S. Sumida *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 33(11), 913(1978)
- 9 楼祺洪, *光学学报*, 4(4), 289(1984)
- 10 J. J. Ewing, *SPIE*, 76, Ultra High Power Lasers, p. 132(1976)
- 11 T. Hasama *et al.*, "X-ray preionized KrF laser with a 10cm electrode spacing", paper WF-17, CLEO/89, 1989, Baltimore, Maryland
- 12 楼祺洪 *et al.*, *光学学报*, 4(10), 894(1984)
- 13 J. Hsiai, *Appl. Phys. Lett.*, 30, 101(1977)