

# 高压预电离短脉冲 XeCl 准分子激光产生研究

任 韧<sup>1,2</sup>, 陈长乐<sup>2</sup>, 徐 进<sup>3</sup>, 朱世华<sup>4</sup>, 金克新<sup>2</sup>,  
任大男<sup>4</sup>, 王永仓<sup>2</sup>, 袁 孝<sup>2</sup>, 宋宙模<sup>2</sup>

1. 西安交通大学物理系和信息系, 陕西 西安 710049
2. 西北工业大学应用物理系, 陕西 西安 710072
3. 西安交通大学生物医学工程所, 陕西 西安 710049
4. 西北大学数学系, 陕西 西安 710069

**摘要** 研究了在高压、大体积、泵浦功率  $1.3959 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-3}$  抽运下, 产生的  $\text{XeCl}^*$  准分子激光光谱, 波段  $307.7 \sim 308.5 \text{ nm}$ , 结果显示有两个谱线峰值  $307.98$  和  $308.19 \text{ nm}$ , 谱线最强的跃迁是 B-X 跃迁, 脉冲宽度  $11.13 \text{ ns}$ 。在气体配比  $\text{HCl} : \text{Xe} : \text{He} = 0.1\% : 1\% : 98.9\%$  下, 采用预电离初始电子, 产生稳定辉光放电过程, 获得了  $0.5 \sim 5 \text{ Hz}$ , 单脉冲能量  $450 \text{ mJ}$ , 束散角  $3 \text{ mrad}$ , 短脉冲的准分子激光。

**关键词**  $\text{XeCl}^*$  准分子激光; 紫外预电离; 纳秒放电; 脉冲激光沉积技术; 辉光放电

**中图分类号**: TN242 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-0593(2005)05-0644-04

## 引言

准分子激光是1970年首先采用强流电子束对液Xe获得 $\text{Xe}_2$ 准分子输出的,其后几十年来, $\text{XeO}$ ,  $\text{XeBr}$ ,  $\text{XeF}$ ,  $\text{Xe}_2\text{Cl}$ 准分子激光不断发展。准分子激光波长短且效率高,特别是短脉宽 $\text{XeCl}^*$ 激光增益大、效率高,有良好的高等离子体激发能力,对靶材可形成消融、剥蚀效应, $\text{XeCl}^*$ 准分子上能级寿命为 $10^{-8} \text{ s}$ ,下能级寿命为 $10^{-13} \text{ s}$ ,脉宽的下限为 $10 \text{ ns}$ ,厦能级是排斥的基态,无准分子存在,跃迁通道顺畅,具有很高的量子效率和激光效率。目前应用于半导体,微电子,光电材料,核聚变,激光诱导掺杂,ps,fs激光研究和激光改性等应用领域,其中在光电子领域、光化学、同位素分离、光刻、PLD激光沉积及外延生长、拉曼光谱等的应用研究尤为注目。

$\text{XeCl}^*$ 激光是以激发态的分子“准分子”跃迁产生的,它在激发态暂时成为不稳定分子而在基态又分解为原子或原子缔合物,其存在时间极短,为 $10^{-8} \text{ s}$ 量级,跃迁的两个能级是排斥的低激发态到排斥基态(弱束缚态)间的跃迁,而与其他激光不同。 $\text{XeCl}^*$ 准分子激光下能级基态无损耗。激光的光谱输出波段在紫外区,谱为一连续带,因此是紫外光谱中值得重视的对象。

本实验采用 $\text{HCl}/\text{Xe}/\text{He}$ 以及 $\text{Ne}$ 组分的气体,大体积

$\phi 22 \times 110 \text{ cm}^3$ ,按比例形成混合压强 $0.5 \sim 5 \text{ atm}$ [1个标准大气压( $\text{atm}) = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ , $0.5 \sim 5 \text{ atm}$ 即为 $5.06625 \times 10^4 \sim 5.06625 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,下同],采用高压脉冲放电,紫外预电离产生等离子体,辉光放电产生 $\text{XeCl}^*$ 准分子激光,实验获得了气压,电压与激光能量,脉冲宽度的关系,从光谱分析中得到了最大能量输出条件<sup>[1-3]</sup>。

## 1 实验装置

所研制的 $\text{XeCl}^*$ 准分子激光器采用内径 $\phi 220 \text{ cm}$ ,外径 $\phi 270 \text{ cm}$ ,长 $110 \text{ cm}$ 的环氧玻璃钢筒,两端法兰装配,法兰一端盖板上安装 $\phi 50 \text{ mm}$ 石英透镜作为输出耦合窗口,另一端为 $\phi 50 \text{ mm}$ 的镀Al或Ag的有90%以上反射率的平面反射镜。激光器由电路、气路、光学系统、结构组件等部分构成,如图1所示。激光波长测试由WD500-1型光栅单色仪(狭缝

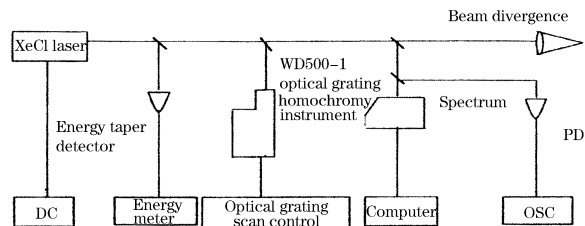


Fig. 1 The Instrument of optical circuit

收稿日期: 2003-12-12, 修订日期: 2004-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(60171034), 陕西省自然科学基金(2001C21), 西安交通大学自然科学基金(xjj2004013)和博士点基金(20020698024;20030698027)资助

作者简介: 任 韧, 1967年生, 西安交通大学物理系讲师, 博士研究生

宽度 0.005 mm, 狭缝高度 25 mm, 最小分辨率 0.01 mm) 和自动光栅单色扫描控制仪自动或手动 ( $250^\circ \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $50^\circ \cdot \text{s}^{-1}$ ) 扫描完成。激光光谱通过 Ocean Company 的 HR2000 光谱仪和计算机测试。激光器电源为 50, 40 kV 直流电源, 放电电流 150 A, 紫外 308 nm 激光通过辉光放电泵浦气体, 四能级系统受激辐射产生。

如图 1 和图 2 实验时首先将系统抽真空至  $133.3 \times 10^{-5}$  Pa 以下, 按组分  $\text{HCl} : \text{Xe} : \text{He} = 0.1\% : 1\% : 98.9\%$ , 依次通过气体管路系统充入 HCl, Xe, He, 总气压 1 atm 以上, 实验分别在 1, 1.5, 2, 3 和 3.5 atm 下进行, 高压紫外预电离产生初始电子后, 主电极辉光 ns 放电产生脉冲激光输出, 原理如图 2。单脉冲能量用美国的 Molect Jmax 光电锥探斗接收, 经光电转换, 信号送 Molect 公司的 EPM 型 Laser Energy/Power meter 测试脉冲能量。另一路经衰减反射进入 UDP 紫外光电探测器, 触发同步 Tektronix2000 示波器记录光脉冲。XeCl<sup>\*</sup> 准分子激光波长测试用 WD500-1 光栅单色仪。

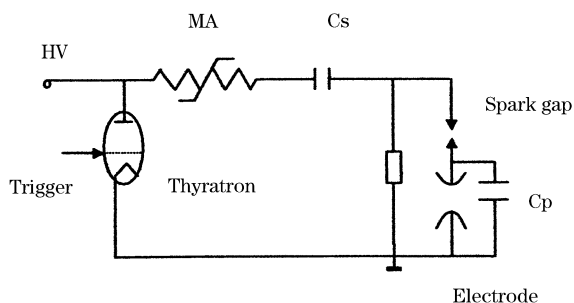


Fig. 2 The preionization discharge and structure of laser

## 2 结果与讨论

实验在气压  $(1.05 \sim 4.2) \times 10^5$  Pa, 直流充电电压 7~40 kV,  $\text{HCl} : \text{Xe} : \text{He} = 0.1\% : 1\% : 98.9\%$  稳定的辉光放电 0.5 Hz 下, 获得 XeCl<sup>\*</sup> 准分子激光随波长连续变化的光谱图, 脉冲宽度和单脉冲能量<sup>[4-6]</sup>。

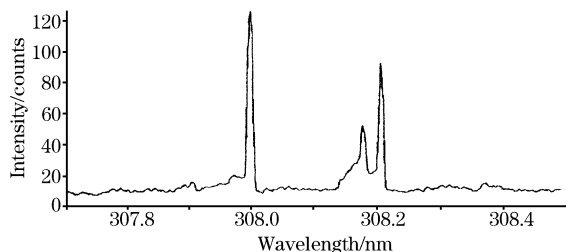


Fig. 3 The spectrum of laser indicates two lines 307.98 and 308.19 nm

图 3 所示光谱图显示在 307.98 和 308.19 nm 处, 强度分布呈现峰值,  $\Delta\lambda = 0.3$  nm, 脉冲谱的整体宽度可调。全部 XeCl<sup>\*</sup> 准分子激光光谱带由若干部分组成, 最强的带为亚稳激发态  $^2\Sigma(B)$  到吸收的基态  $^2\Sigma(X)$  跃迁, 谱线半宽度  $\Delta\lambda_1 = 0.04$  nm, 光谱线为齿状非平滑线, 光谱的振动能级辐射产生一系列小振幅强度尖峰, 气压越高, 曲线越平滑, 表明振

动能级辐射减弱; 另一个较平滑谱峰的光谱为  $^2\pi$  到基态 X 的  $^2\pi$  的跃迁, 光强度次于  $^2\Sigma$ , 谱线半宽度  $\Delta\lambda_2 = 0.02$  nm, 总的激光脉冲谱线宽度最大达到 3 nm, 气体压强较低时, 谱线的振动尖峰明显。

波长测试过程中, WD500-1 型单色仪与自动光栅单色扫描控制仪连接, 扫描速率  $250^\circ, 50^\circ \cdot \text{s}^{-1}$ , 波长测试结果为 307.98 和 308.19 nm。实验结果与光谱分析结果吻合。

XeCl<sup>\*</sup> 准分子的位能曲线如图 4 所示。按 Frank-Condon 原理及选择定则, 在  $R_0$  处有最大的跃迁几率, XeCl<sup>\*</sup> 准分子能级较高的激发态有 D,  $B(^2\Sigma)$ ,  $C(^2\pi)$ , 最低的能态是排斥的基态 X, X 态的寿命为  $10^{-13}$  s, XeCl<sup>\*</sup> 准分子激光光谱显示, 产生最强的激光辐射能量是最低激发态 B 到最低的排斥基态 X 间的跃迁<sup>[2]</sup>。

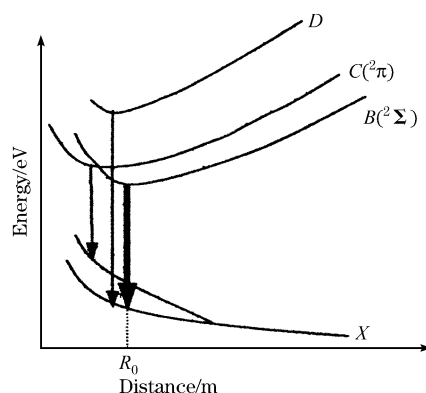


Fig. 4 The potential energy curves of rare-gas halides XeCl<sup>\*</sup> laser

XeCl<sup>\*</sup> 准分子的形成过程经历二次电子过程, 形成激发态的原子或离子  $\text{Xe}^*$ ,  $\text{He}^*$ ,  $\text{Xe}^+$ ,  $\text{He}^+$ , H,  $\text{Cl}^-$ ; 同时电子猝灭, 受激的部分离子、原子又复合为基态的 Xe, He,  $\text{Cl}_2$ , Cl, 伴随 HCl 猝灭和中性反应; 其次中性的大原子分子通过彭宁电离,  $\text{Xe}^*$ ,  $\text{Xe}_2^*$ ,  $\text{He}^*$ ,  $\text{He}_2^*$  间的非弹性碰撞产生电子; 然后离子电子复合和离子与离子的复合形成激发态的  $\text{Xe}^*$  原子或激发态的准分子 XeCl<sup>\*</sup>,  $\text{HeCl}^*$ ,  $\text{Cl}_2^*$ ; 其中只有 XeCl<sup>\*</sup> 辐射跃迁 308 nm 强度最强, 产生 XeCl<sup>\*</sup> 准分子激光输出。

大体积, 高气压的 XeCl<sup>\*</sup> 准分子的形成有 3 个主要过程, 首先紫外区预电离产生低速电子, 形成  $\text{Xe}^*$ ,  $\text{Xe}^+$ , 二次激发  $\text{Xe}^{*+}$ ,  $\text{Xe} + e \rightarrow \text{Xe}^*$  ( $\text{Xe}^{*+}$  或  $\text{Xe}^+$ ) + e。其次 HCl 受激发、振动和电离, 分解为  $\text{Cl}^-$ , H,  $\text{HCl} + e \rightarrow \text{H} + \text{Cl}^-$ , 最后三体复合  $\text{Xe}^* + \text{H}^+ + \text{Cl}^- + \text{M} \rightarrow \text{XeCl}^* + \text{H} + \text{M}$ , XeCl<sup>\*</sup> 准分子产生。He/Ne/Ar 缓冲气体在反应中, 一方面起到了媒介子的作用, 另一方面与 H, He 一起降低了气体的温度, 阻止了电子的进一步升温 and 速率的提高。

实验得出了在高气压下气压与输出脉冲宽度的关系, 同时获得了最小脉宽 11.13 ns, 如图 5。随气压的升高, 平均碰撞次数 Z 增加, 气体内粒子运动的平均自由程降低, 其分子的振动弛豫时间减少, 激光脉冲宽度与分子的平均弛豫时间呈正比, 出现脉冲宽度变窄, 光谱谱线光滑的结果。

图 6 的实验结果显示在不同配比下激光输出能量的变

化关系。提高混合介质气体的压强,单位体积中的混合成分密度及  $\text{XeCl}^*$  密度升高,  $\text{XeCl}^*$  准分子反转增加,如图 6 中曲线 3,但又受 Xe, HCl, H 含量影响。HCl 是慢速电子的来源,在激发过程中, HCl 气体电离、离子化,气体粒子的转动、振动能级升高,放出电子。同时  $\text{Cl}^-$  有减少系统电子负面作用,因为  $\text{Cl}^-$  是电负性离子,吸收截面积大。紫外预电离的电子密度是初始电子与  $\text{Cl}^-$  离子和高压电子碰撞,光子对  $\text{Cl}^-$  离子剥离,及  $\text{Cl}^-$  与 He 作用,共同产生结果,一定密度电子的存在使辉光放电及辉光放电稳定性提高。气压对能量的非线性正比关系在 4~4.5 atm 处下降,如图 6 中(1, 2 曲线),曲线 1 辉光放电较稳定。

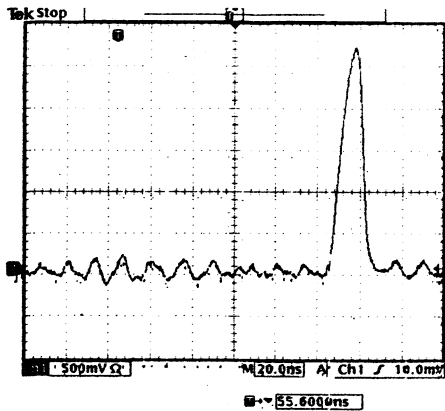


Fig. 5 The measured pulse width curve under 3.5 atm, 40 kV DC, 11.13 ns

### 3 结 论

$\text{XeCl}^*$  准分子激光表明,大体积辉光放电下,  $\text{XeCl}^*$  准

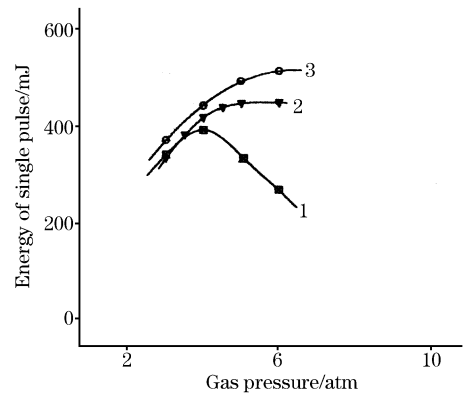


Fig. 6 The relation of mixture gas pressure and single pulse energy

- 1, HCl : Xe : He = 0.1% : 1% : 98.9% ;
- 2, HCl : Xe : He = 0.15% : 0.7% : 99.15% ;
- 3, HCl : Xe : He = 0.05% : 1.2% : 98.75% ;

分子激光光谱出现两个谱线峰值 307.98 和 308.19 nm, 它们分别是能级  $B-X$  和  $C-X$  跃迁产生, 高压、大体积下  $\text{XeCl}^*$  准分子激光通过气体电离, 二次电子, 彭宁电离, 三体复合过程产生, 紫外预电离的自动同步是辉光放电的前提,  $\text{XeCl}^*$  的激发过程是电流相对稳定的正常辉光放电, 有较高的放电稳定性。  $\text{XeCl}^*$  光谱谱线, 激光脉冲宽度变化关系显示, 脉冲宽度与气压呈反比, 随高压充电电压, 气体压强的升高, 单脉冲的能量升高, 最大为 450 mJ, 实验完成了激光波长、单脉冲能量、光脉冲宽度、光谱的测试。在紫外区获得  $\text{XeCl}^*$  准分子激光矩形光斑 2 cm×1.8 cm, 实现泵浦体积 2 cm×1 cm×90 cm, 重复频率 0.5~5 Hz, 束散角 3 mrad, 工作脉冲宽度 11.13 ns 的输出, 激光对类金刚石材料试验中形成了等离子体溅射羽辉, 光电材料产生了良好的消融剥蚀效应。本文还参考了文献[7-15]。

### 参 考 文 献

- [1] Gellert B, Kogelschatz U. Appl. Phys., 1991, B52: 14.
- [2] Tarasenko V F. Applied Physics A: Materials Science and Processing, 1999, 69(1): 323.
- [3] Martino M, Luches A J. Phys. D: Appl. Phys., 2001, 34(17): 2606.
- [4] Skakun V S, Lomaev M I. Tech. Phys. Lett., 2002, 28(11): 899.
- [5] Ito S. Appl. Phys., 1996, B63(1): 1.
- [6] Pai S T. J. Appl. Phys., 1992, 71(12): 5820.
- [7] ZHANG Lian-shui, ZHANG Gui-yin, ZHAO Xiao-hui, YANG Xiao-dong, LI Yi(张连水, 张贵银, 赵晓辉, 杨晓冬, 李 裔). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2004, 24(6): 641.
- [8] REN Ren, CHEN Chang-le et al(任 韧, 陈长乐等). Chinese Journal of Laser(中国激光), 2004, A31(9): 1036.
- [9] NI Qi-liang, GONG Yan, LIN Jing-quan, CHEN Bo, CAO Jian-lin(尼启良, 巩 岩, 林景全, 陈 波, 曹健林). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2003, 23(1): 101.
- [10] REN Ren, CHEN Chang-le et al. Phy. Scrip., 2003, 68(4): 272.
- [11] SUN Ming, WU Yan, ZHANG Jiao-liang, LI Jie, WANG Ning-hui(孙 明, 吴 彦, 张家良, 李 杰, 王宁会). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2005, 25(1): 108.
- [12] REN Ren, CHEN Chang-le et al. Phy. Scrip., 2004, 69(4): 342.
- [13] LIU Ke-ling(刘克玲). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2005, 25(1): 95.

- [14] XUE Ying-hong, WANG Qing-yue et al(薛迎红, 王清月等). Chinese Journal of Laser(中国激光), 2004, A31(9): 1025.
- [15] ZHANG Xiu-feng, SONG Ke-fei, YU Tao, HAN Bing-dong, SHENG Cui-xia, LIN Jiu-ling(张秀峰, 宋克菲, 于涛, 韩炳冬, 盛翠霞, 林久令). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2004, 24(12): 1489.

## Study of New XeCl Laser with Short Duration Time and Preionization at High Pressure

REN Ren<sup>1,2</sup>, CHEN Chang-le<sup>2</sup>, XU Jin<sup>3</sup>, ZHU Shi-hua<sup>2</sup>, JING Ke-xin<sup>2</sup>, REN Da-nan<sup>4</sup>, WANG Yong-cang<sup>2</sup>, YUAN Xiao<sup>2</sup>, SONG Zhou-mo<sup>2</sup>

1. Department of Physics and Department of Information and communication, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

2. Applied Physics Department, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

3. Institute of Biomedical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

4. Department of Mathematics, Northwest University, Xi'an 710069, China

**Abstract** New short duration time XeCl excimer laser has been generated at high pressure within a large volume in order to apply it to the interaction between laser and material, and material plasma study. The laser spectrum exhibits two laser lines at 307.98 and 308.19 nm, which is realized in the proportion of HCl : Xe : He = 0.1% : 1% : 98.9% through UV preionization. Theoretic analysis indicated that the maximum intensity loop is B to X grade. Not only UV preionization, glow discharge and the calculation of dynamic equation, but also the laser spectrum and pulse duration time measurement were carried out. It is shown that the duration time decreases and pulse energy rises with the increase in the pressure and discharge voltage. The minimum duration time exceeds 13 ns, the pulse energy is 450 mJ, and the beam divergence angle is 3 mrad.

**Keywords** XeCl\* excimer laser; UV preionization; Nanosecond discharge; Pulsed laser deposition technique; Glow discharge

(Received Dec. 12, 2003; accepted Apr. 28, 2004)

### 更 正

2005 年第 1 期 155 页上的 Fig. 2 和 Fig. 3 有误(共 10 个图)。现更正为: 每个图的纵坐标为: Intensity/a. u.; 横坐标为: Wavelength/nm; 横坐标的各数字依次缩小 10 倍。(如 4 000 变为 400.0)。特此向读者致歉。