

高重复率、高平均功率窄线宽 KrF 准分子激光系统的研究

成 序 三

(日本国东京 LEONIX 公司)

王 润 文

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

本文报道一台自制的光学投影亚微米量级微细加工用的 KrF 准分子激光振荡-放大系统, 并对其设计和运转性能加以讨论。该系统在 200 Hz 重复率运转时其谱线漂移小于 5×10^{-4} nm, 谱线宽度为 2.3×10^{-3} nm, 平均功率达 24.4 W。

关键词: 高功率, 高重复率, 准分子激光器。

一、前 言

目前, $0.5 \mu\text{m}$ 精度光刻机的光源除传统的高压水银灯(365 nm)外, 还有 KrF(248 nm) 和 ArF(193 nm) 等短波长准分子激光。用 KrF 激光器作光源, 已有 $0.35 \mu\text{m}$ 线分辨本领的实验结果^[1]。用作光刻等投影式光学系统光源的准分子激光器, 避免了消色差透镜的制作困难, 一般要求窄线宽输出。此外, 还要求其空间相干性不能太高, 否则, 干涉条纹会影响成像质量, 不宜采用注入锁定。因此, 用于光刻的高功率准分子激光器大都采用振荡-放大系统。

典型的用于光刻的窄线宽 KrF 准分子激光器的输出特性为: 线宽 $\leq 3 \times 10^{-3}$ nm、波长稳定性 $\sim \pm 5 \times 10^{-4}$ nm、脉冲稳定性 $< \pm 20\%$ 、运转重复率 ~ 100 Hz^[2]。本文报道一台研制成功的窄线宽($< 3 \times 10^{-3}$ nm)、高平均功率(10W 量级)、高重复率(200 Hz) KrF 准分子激光器的实验结果。

二、实 验 装 置

本实验用的振荡器和放大器均为 LUMONIX 公司产 EX-600 型 KrF 准分子激光器。图 1 为实验的光路图和电路图。

EX-600 型准分子激光器用 KrF 工作气体时, 单脉冲的最大能量为 400 mJ, 最高运转重复率为 500 Hz。在最佳状态 300 Hz 重复率运转时, 平均输出功率为 100 W, 输出光束

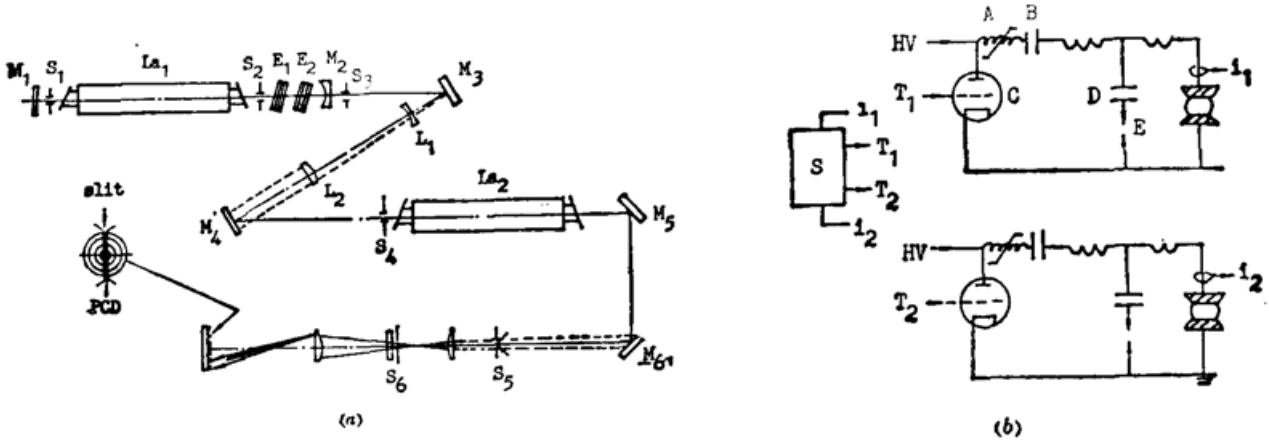


Fig. 1 (a) The KrF excimer laser system (b) Electronic current sketch

M_1, M_2 —mirror; La_1 —oscillator, La_2 —amplifier, E_1, E_2 —mode selector, L_1, L_2 beam expanding system, M_3, M_4, M_5, M_6 —mirror, $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$ —slits

约为 $7 \times 25 \text{ mm}^2$ 的长方形, 脉冲宽度约 $15 \sim 25 \text{ ns}$ 。

高功率准分子激光振荡-放大系统窄线宽运转时, 需解决耐高光强的腔内选模元件与振荡器和放大器的同步运转的问题。

如图 1 所示, 本文采用的是 F-P 干涉滤光片^[3] 作为腔内选模光学元件, 用它压缩线宽具有调谐简单和稳定可靠的特点。目前市售的准分子激光器窄线宽输出系统大都采用 F-P 标准具作为腔内选模元件。对于腔内增益高、高重复率运转的准分子激光器, 最大的问题是 F-P 标准具的寿命问题。随着准分子激光器腔内净增益的增加和运转重复率的上升, 对于 F-P 标准具来说, 一方面承受的单一脉冲光强度增大; 另一方面, 重复率脉冲引起的累积热效应也显著地增加。这二者都导致 F-P 标准具的寿命的急剧减少。

最近以来, 紫外透明光学材料的研究^[4] 和对光学材料不易产生色心的镀膜的改善^[5], 使 F-P 标准具的损伤阈值有了很大的提高。另一方面在腔内采用偏振旋转元件来减低腔内标准具承受的光强^[6] 等方法, 也使腔内 F-P 标准具的寿命提高到能承受 10^9 次光脉冲的水平。

本实验采用的二个标准具都是空气隙型的, 隙间两面各镀反射率为 70% (248 nm) 的反射膜, 外部二面镀增透膜, 其直径约 $\phi 70 \text{ mm}$, 有效孔径约 $\phi 50 \text{ mm}$ 。一个用于波长粗调的 F-P 标准具的空气隙为 $70 \mu\text{m}$, 自由光谱范围 4.4 nm , 大致与 KrF 准分子 248 nm 跃迁的谱线宽度相对应; 另一个用于精调的 F-P 标准具的空气隙为 $700 \mu\text{m}$, 谱线分辨率约为 $5 \times 10^{-3} \text{ nm}$ 。如图 1 所示, 振荡器内置有一对 $\phi 2 \text{ mm}$ 的直径的小孔光阑, 这对小孔用于辅助选模及保护腔内 F-P 标准具。孔径增大虽然可以增大振荡器的输出, 但受光面积增大, 累积热效应的影响变大, 标准具易于损坏。此外, 由于放大器中增益足够大, 对作为放大器注入信号的振荡器的输出能量并不要求太高, 采用 $\phi 2 \text{ mm}$ 小孔选模振荡器的脉冲输出能量约为 $0.5 \sim 2 \text{ mJ}$ 左右。

图 1(a) 中的扩束系统是一负透镜和正透镜对、放大率在 $3 \sim 5$ 倍之间。在最佳净放大倍率时、此扩束系统工作于略微非准直状态, 光束在进入放大器时直径约为 $\phi 8 \text{ mm}$, 而在放大器输出端直径约为 $\phi 12 \sim \phi 15$ 左右。扩束系统输入和输出端置有直径分别为 $\phi 3$ 和 $\phi 8$ 的二个光阑, 以用于防止从放大器返回的准分子激光引起振荡器的输出腔片及腔内 F-P 标准具的破损。因为相对放大器返回的光线, 这一对扩束透镜构成一个缩束系统。

图 1(b) 是 EX-600 型的准分子激光振荡-放大系统的放电及同步电路。由于它没有采

用磁压缩开关,其优点是激励电路放电抖动(jitter)很小,从闸流管的触发信号到激光器的振荡二者之间的自抖动小于 2 ns。此同步放电触发系统包含一个同步-延时放电稳定控制器。其原理如图 1(b)所示,在振荡器及放大器放电区的电极前各置一个罗珂夫斯基线圈用来获取振荡器和放大器的放电电流脉冲。这一对电流信号被反馈到延时控制器中与设定延时值进行比较,然后反过来再控制从延时器输出的振荡器和放大器的触发脉冲的延时。

图 2 为 EX-600 型系统的放电电流的相对抖动量的测定波形。即,一个罗珂夫斯基线圈的电流输出信号作为示波器的触发波形,另一个罗珂夫斯基线圈的输出电流信号作为示波器的测波形。由图 2 可知,在高于 50 Hz 重复率以上工作时,其抖动量要小于 10 ns。实验表明:低于 20 Hz 重复率作工时,该振荡-放大系统的放电相对抖动量变大。这是由于同步稳定控制器的反馈控制积分运算的工作点高于 20 Hz。

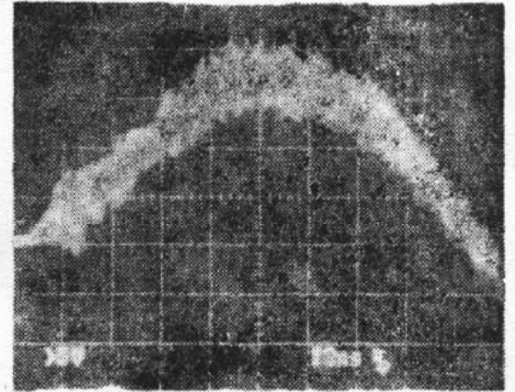


Fig. 2 Profile of the discharge current (each division: 10ns)

图 1 中脉冲激光谱线宽度测量装置中干涉条纹检测用浜松光电公司生产的型号为 S2304-512Q 的 POD (POD Linear Image Sensor) 线性光电二极管阵列。这种一维线性阵列由 512 个 $25 \mu\text{m} \times 5 \text{mm}$ 的光二极管组成。如图 1 所示,在这个 POD 阵列的前面置一狭缝用于调节 POD 的进光量以及使脉冲激光的干涉环成一维线性条纹化。输出信号既可由示波器直接观察,也可通过微型计算机进行数据处理。图 1 中用于测定线宽的 F-P 标准具的自由光谱范围为 $\text{FSR} = 1 \text{cm}^{-1}$, 精细度为 20。脉冲激光的线宽和测得的干涉条纹的关系由下式所定:

$$\Delta\lambda = \Delta w / \Delta d, \quad (1)$$

式中 $\Delta\lambda$ 为脉冲激光线宽, Δw 为条纹宽度, Δd 为条纹间距。此 POD 线性阵列脉冲线宽测定器的实时测定最高重复率为 200~300 Hz 左右。脉冲激光的谱线漂移也可以通过示波器测定。即,在重复率运转情况下,激光的谱线漂移量 $\delta\lambda$ 与示波器上观察到的波形的线度展宽 Δl 成正比

$$\delta\lambda = \Delta\lambda (\Delta l / \Delta w). \quad (2)$$

三、实验结果及讨论

图 3 显示了用 POD 和示波器观察的 EX-600 型 KrF 准分子激光器振荡-放大系统的窄线宽输出时的激光干涉条纹。图 3(a)为在 100 Hz 重复率运转时的一个脉冲的干涉条纹,由(1)式可知这时振荡-放大系统输出的激光脉冲的线宽约在 $2.3 \times 10^{-3} \text{nm}$ 左右。图 3(b)为在 95 Hz 重复率运转时连续约 30 个脉冲(照像机快门速度 0.3 sec)的干涉条纹。由(2)式知这大约对应于 0.5 pm 程度的谱线漂移量。

KrF 准分子脉冲激光放大器的注入光强密度 E_{in} 和输出光强密度 E_{out} 有如下关系^[7]

$$E_{\text{out}} = E_{\text{sat}} \cdot \ln \{ \exp(g_0 L) \cdot [\exp(E_{\text{in}} / E_{\text{out}}) - 1] + 1 \}, \quad (3)$$

式中 g_0 为小信号增益, E_{sat} 为饱和光强密度, L 为腔内放电激励增益介质的长度。小信号注入时可不考虑饱和,小信号净增益为 $\exp(g_0 L)$ 。本文典型的实验数据为注入光强密度 E_{in}

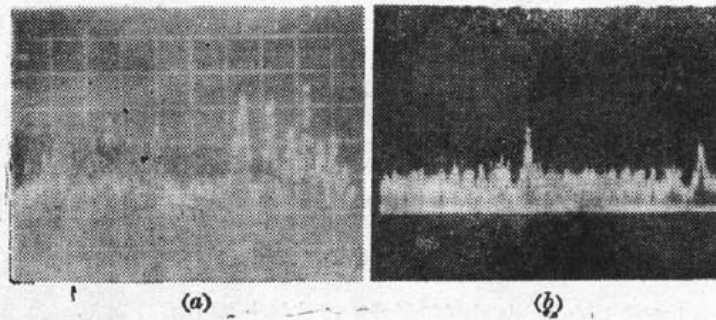


Fig. 3 Interference fringes detected from output emission of KrF laser resonator-amplifier system

- (a) fringes appear from one laser pulse running in 100 Hz repetition rate;
 (b) fringes appear from 30 laser pulses running in 95 Hz repetition rate

$= 1 \text{ mJ/cm}^2$, 输出光强密度 $E_{\text{out}} = 50 \text{ mJ/cm}^2$ 。运用上面的考虑饱和的计算式, 利用 $L = 65 \text{ cm}$ 以及^[8] $E_{\text{sat}} = 3.2 \text{ mJ/cm}^2$, 则可以求得小信号增益系数 $g_0 = 0.25 \text{ cm}^{-1}$ 。

图 4 为 EX-600 型振荡-放大系统的输出功率和运转重复率关系的实验曲线。自由振

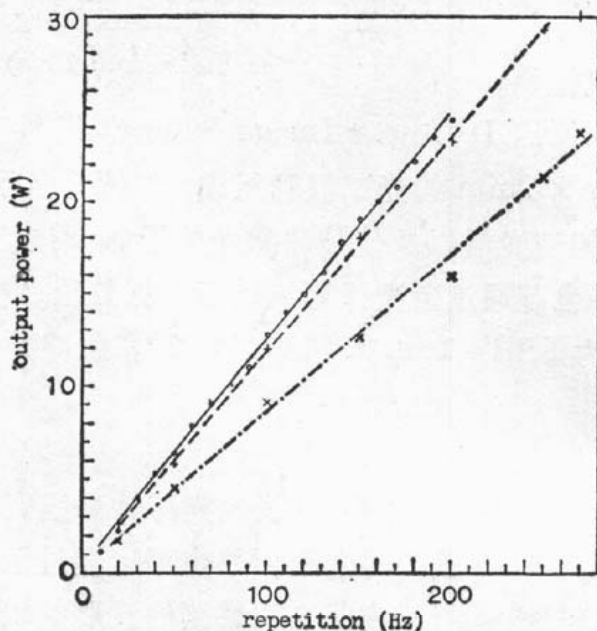


Fig. 4 The experimental curve between the relation of output power and repetition rate of this KrF resonator amplifier system

荡时, EX-600 型 KrF 准分子激光器的平均输出功率的最佳工作点一般在 200~300 Hz 左右重复率下运转。在低于 300 Hz 重复率的情况下, 平均输出功率与运转重复率大致呈线性关系, 即重复率在 300 Hz 以下时, 单脉冲能量(约在 400 mJ/pulse 左右)大致保持不变, 图 4 中有二条自由振荡时宽带光(KrF 全带宽约 50 nm 注入-放大的实验曲线(破折线和点划线)。在放大器的激励电压为 31 kV 时, 270 Hz 运转重复率为 270 Hz, 平均输出功率仍呈线性上升。

在我们的实验中, 振荡器在窄线宽输出时的最高重复率达 200 Hz, 如图 4 的实线所示, 在 200 Hz 重复率运转时, 平均输出功率为 24.4 W。实验中用于振荡器腔内窄线宽的二个 F-P 标准具的工作寿命约达 10^6 个脉冲。

到目前为止还没有发现 F-P 标准具有损伤的迹象。这二个空气隙的 F-P 标准具的有效直径在 $\phi 50 \text{ mm}$ 左右, 而使用的孔径(振荡器腔内小孔光阑孔径的面积)只有 $\phi 2 \text{ mm}$, 即便发生损伤, 移动一个地方仍可以使用。因此, 采用目前这种系统, 运转在 200 Hz 重复率下, 不存在 F-P 标准具损伤的问题。

参 考 文 献

- [1] 牛田一雄;《光学》, 1991, 20, No. 2, 70~75.
- [2] P. Lokai, U. Rebhan; *Proc. SPIE*, 1990, 1264, 496~504.
- [3] Chen Xusan, Lou Qihong *et al.*; *Chinese Phys. Lett.*, 1986, 13, No. 1 (Jan), 40.
- [4] 松下嘉文等;《日本应用物理学会》, 1991 (春季), 28aE/III-8.
- [5] 伊沢孝男等;《日本应用物理学会》, 1991 (春季), 28aE/III-14.
- [6] N. Furuya, T. Ono *et al.*; *Proc SPIE*, 1990, 1264.
- [7] J. Banic, T. Efthimopoulos *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1980, 37, No. 8, 686~688.

A high power, high repetition rate KrF excimer laser with narrow spectrum width

CHENG XUSAN

(LEONIX Co., Tokyo, Japan)

WANG RUNWEN

(Shanghai Institute of Optics & Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 9 August 1991)

Abstract

A KrF resonator-amplifier excimer laser system using for submicro fine processing was reported. This system can operate in the situation of 200 Hz repetition rate with output power of 24.4 W and spectrum of 2.3×10^{-3} nm. Its spectrum drift is less 5×10^{-4} nm during operation.

Key words: high power, high repetition rate, excimer laser.

第一届全国非线性光学会议在穗召开

由中国光学学会等 15 个单位联合发起的第一届全国非线性光学会议于 1991 年 12 月 16~21 日在广州华南师范大学学术中心举行。来自全国 41 个研究单位、高等院校等 120 余位代表参加了会议。会议由哈尔滨工业大学李淳飞教授和东道主华南师范大学校长刘颂豪教授共同主持。中国光学学会理事长王大珩教授致电对会议祝贺。第二届国际非线性光学会议主席、美国加州大学圣他巴巴分校的 Pochi Yeh 教授和香港中文大学理学院院长杨纲凯教授应邀在大会上作了报告。

学术交流会共进行了大会特邀报告 10 篇, 分组学术报告 72 篇, 此外, 还有张贴报告 73 篇, 这些报告议题涉及到: 1. 非线性光学理论; 2. 激光与材料相互作用产生的各种非线性光学效应(倍频、参量过程、受激光散射, 光学双稳性、光学浑沌、光学混频、光学相位共轭和光学孤子等各种效应); 3. 基于这些效应的各种非线性光学器件以及构成这些器件的非线性光学材料(化合物半导体、有机聚合物、薄膜、半导体量子阱和光折变材料等); 4. 非线性光学应用等。论文既有理论计算, 又有实验现象报道, 具有较高的学术水平。会上不时都有认真和热烈的讨论。

会议表明, 非线性光学是一个发展迅速、内容广泛和有着广阔应用前景的光学分支, 它在我国已经形成了一支较强的专业研究队伍。本届会议正是适应了这样的态势下召开的, 因此获得了圆满的成功。

与会代表参观了华南师范大学量子电子学研究所的激光加工中心等。

第二次全国非线性光学会议拟于 1993 年秋天在华东地区举行。

(黎 风、王恭明)