

文章编号: 0258-7025(2010)09-2253-18

# 准分子激光技术发展

(邀请论文)

余吟山 游利兵 梁 勳 方晓东\*

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要** 介绍了准分子的基本能级结构、光谱特性及产生激光的激励方式。简要回顾了准分子激光及实用准分子器件的发展历史。着重阐述了放电激励准分子器件的相关技术, 如大能量与大功率技术、高重复频率技术、光束控制技术和激光电源技术等。分析了准分子激光光刻应用及近期技术发展, 介绍了准分子激光在工业、医疗和生产领域的应用。

**关键词** 激光器; 准分子激光技术; 放电激励; 光刻

中图分类号 TN248.2 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103709.2253

## Progress of Excimer Lasers Technology

(Invited Paper)

Yu Yinshan You Libing Liang Xu Fang Xiaodong

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

**Abstract** The fundamental characteristics of excimer are introduced briefly and the historical development of excimer lasers is reviewed. The progress of excimer technology especially for discharge pumped excimer lasers is presented detailedly. The key technologies recently employed to improve the performance of excimer lasers for lithography are analyzed. The applications of discharge pumped excimer lasers in industry, medicine and scientific research are also discussed.

**Key words** lasers; excimer lasers technology; discharge pump; lithography

## 1 引 言

准分子激光器是目前紫外波段输出功率最大的激光器件, 广泛应用于工业、医疗和科研等领域<sup>[1]</sup>。自 1970 年 H. G. Bosov 采用强流电子束激发液态氙得到 Xe<sub>2</sub> 准分子激光输出, 40 年来, 准分子激光器得到了迅速发展。特别是稀有气体卤化物准分子激光器, 由于其输出激光峰值功率高、脉冲能量大、波长在紫外区的特点, 发展迅速并得到了广泛的应用, 是目前主要使用的准分子激光器<sup>[2,3]</sup>。

2007 年光刻用准分子激光器的销售额达 3.99 亿美元, 即使是受金融危机影响的 2009 年销售额仍然为 1.35 亿美元, 其市场占有率在所有工业应用激光器(非激光二极管)中名列第三, 仅次于固体激光器和 CO<sub>2</sub> 激光器<sup>[4]</sup>。

本文首先介绍了准分子激光能级结构和光谱特性; 回顾了准分子激光及实用准分子器件的发展历史; 简单介绍了准分子激光的激励方式; 着重介绍了快放电激励实用准分子器件的相关技术; 分析了准分子激光光刻应用及近期技术发展; 最后举例介绍了准分子激光在不同领域的应用。

## 2 概 述

### 2.1 基本能级结构、光谱特性及发展概述

准分子是一种在激发态复合成分子, 而在基态离解成原子的不稳定缔合物。准分子激光跃迁发生在束缚的激发态到排斥的基态, 属于束缚-自由跃迁<sup>[5]</sup>。准分子英文名称 excimer 是“excited dimer”的缩写。Excimer 原单指二聚体的同核准分子, 后

收稿日期: 2010-07-02; 收到修改稿日期: 2010-07-20

基金项目: 国家科技重大专项资助课题。

作者简介: 余吟山(1945—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事准分子激光技术方面的研究。E-mail: ysyu@aiofm.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: Xdfang@aiofm.ac.cn

来诞生的稀有气体卤化物等异核准分子被称为 exciplexes(excited complexes 的缩写)。但出于习惯的叫法,后来所有准分子都被称为 excimer<sup>[6]</sup>。

图 1 为典型的准分子位能曲线<sup>[3]</sup>,X 为排斥基态,B 为最低激发态,C 为更高的激发态。准分子的特征谱是由 B 态到排斥基态 X 的跃迁。一般情况下,B 态自发辐射寿命为几十纳秒,而基态 X 在  $10^{-13}$  s 内便离解,是振动弛豫时间的量级。

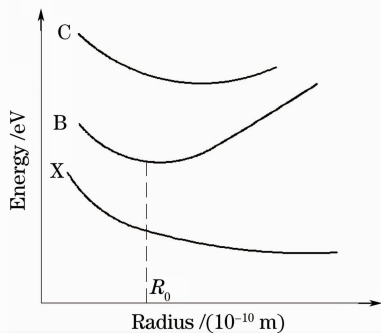


图 1 典型准分子位能曲线

Fig. 1 Schematic potential energy diagram of excimer

设  $R_0$  是 B 态的平衡核间距,即对应  $R_0$  处 B 态位能曲线具有最小值,则按 Franck-Condon 原理,在  $R_0$  附近的 Franck-Condon 区内有最大的跃迁几率。

又因为基态 X 在  $R_0$  附近是排斥的,处于这一核间距的基态分子将迅速离解,而使之保持抽空状态。因此,在  $R_0$  附近的 Franck-Condon 区内很容易建立起粒子数反转,能够获得很高的增益系数,而且,由于跃迁终止于基态,不存在一般四能级系统的激光下能级到基态的无辐射损失,本质上可做成量子效率很高的激光器<sup>[3,7]</sup>。

另一方面,由于跃迁终止于排斥的基态,没有瓶颈效应的限制,所以拉长脉宽和高重复频率运转都没有原则性困难。最后,由于准分子的荧光谱是一连续带,为在一定谱宽内连续调谐的激光器的制造提供了依据。

准分子激光可分为四类:

- 1) 稀有气体准分子,如  $Xe_2, Kr_2, Ar_2$  等;
- 2) 稀有气体卤化物准分子,如  $XeF, ArF, XeCl$  等;
- 3) 卤素气体准分子,如  $F_2$  等;
- 4) 稀有气体和卤素气体三原子准分子,如  $Ar_2Cl, Ar_2F$  等。

不同准分子激光发射波长不同,发射带宽示意图如图 2 所示<sup>[6]</sup>。

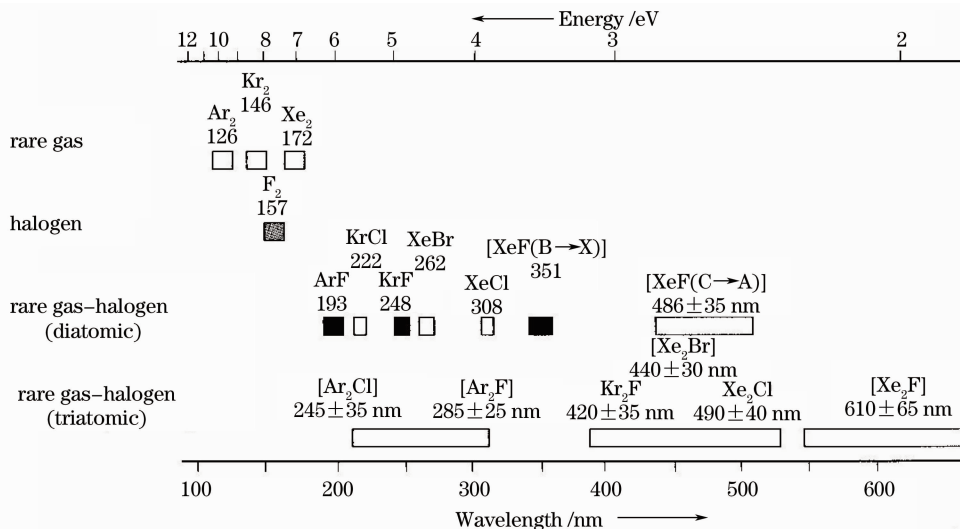


图 2 各类准分子激光发射带宽及光子能量示意图

Fig. 2 Lasing wavelengths and corresponding photon energies of the different excimer lasers

早在激光器刚刚出现的 1960 年, F. G. Houtermans 就提出了准分子束缚-自由电子跃迁产生增益的思想,即以准分子为激活介质实现激光振荡<sup>[3]</sup>。1970 年俄罗斯的 N. G. Bosov 等<sup>[8]</sup>采用强流电子束激发液态氙得到  $Xe_2$  准分子激光输出,辐射波长为 172 nm,这是首次用准分子跃迁得到激光振荡。1972 年美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)的

H. A. Koehler 等<sup>[9]</sup>研制成功了气相  $Xe_2$  准分子激光,中心波长为 170 nm。不久, Hoff 等制成了 145.7 nm 的  $Kr_2$  和 126.1 nm 的  $Ar_2$  激光<sup>[3]</sup>。1974 年劳伦斯利弗莫尔国家实验室 Powell 等又提出了以稀有气体氧化物准分子和金属蒸气-稀有气体准分子作为激光介质的设想,并在同年,实现了  $XeO, KrO$  和  $ArO$  绿带激光振荡<sup>[3]</sup>。1975 年 J. E. Velazco 等<sup>[10]</sup>观察到  $KrF,$

ArF, XeF 和 KrCl 辐射谱线上准分子的能级跃迁, 提出了用它们作激活介质的建议。同年, 美国海军实验室(NRL)的 S. K. Searles 等<sup>[11]</sup>用电子束激励 Xe, Br<sub>2</sub> 混合气体, 得到 XeBr 准分子激光辐射, 波长为 281.8 nm。之后, J. J. Ewing 等先后实现了 XeF, KrF, ArF, XeCl, KrCl, ArCl 的激光辐射, 激励方式也由纯电子束扩展到预电离放电、自持放电等多种形式<sup>[12]</sup>。相关动力学过程研究和反应速率及有关参量的测量工作非常活跃。

由于准分子激光器的特殊用途, 一些国家先后开展过一些重要研究计划, 如围绕惯性约束核聚变的实验研究。美国洛斯阿拉莫斯国家实验室(LANL)1982年开始研制 Aurora KrF 准分子激光系统, 1988年实现 2.5 kJ, 脉宽 5 ns 输出; 美国海军实验室(NRL)研制了 Nike 准分子激光系统, 1995年投入运行, 输出 5 kJ, 脉宽 4 ns; 日本电子技术实验室内于 1999 年建成 Super-Ashura, 输出 2.7 kJ, 脉宽 20 ns; 英国卢瑟福实验室(RAL)1996 年建成 Titania 装置, 输出 1.7 kJ, 脉宽 50 ns。美国、欧洲、日本等都曾制定过长期的准分子激光研究发展规划。如欧洲 EUREKA 研究计划和日本 AMMTRADEN 研究计划等。准分子激光是各国尖端研究计划的组成部分<sup>[13]</sup>。

我国准分子激光技术的研究工作开始于 1977 年<sup>[3]</sup>。中国科学院安徽光学精密机械研究所和中国科学院上海光学精密机械研究所较早对准分子激光技术开展了大量研究。原子能科学研究所和西北核技术研究所进行了电子束抽运的百焦耳级高功率准分子激光研究<sup>[13]</sup>。国内其他单位如中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、华中科技大学等也开展了较多研究工作。我国“七五”、“八五”、“九五”期间对准分子激光技术进行大量科技攻关, 技术水平与国外差距较小, 但之后缺乏研究资金的投入, 现在我国准分子激光技术水平与国外差距较大。

## 2.2 实用准分子激光器的发展

1977 年 Lambda Physik 公司推出其第一台准分子器件——EMG 500<sup>[2]</sup>。更换不同的工作气体和腔镜, 可以输出多种波长, 重复频率达 20 Hz。作为当时紫外输出功率最大的光源, 其峰值功率达 10 MW。气体寿命约 6 万脉冲, 闸流管和电极寿命约在 1 千万脉冲。主要应用为光化学研究和染料激光器抽运。

开始几年, 商品器件研究进展缓慢, 主要缘于一些准分子需要的基本技术没有到很好的发展<sup>[2]</sup>。例如闸流管开关技术、高压放电技术、预电离技术、真

空密封技术、耐腐蚀气体材料技术、腔体冷却技术、高纯激光工作气体技术等。Lambda Physik 公司之所以能较快地研制出商品化的实用准分子器件, 得益于它早期已经开始从事的紫外氮分子器件研究, 它的横向放电激励系统直接可以借鉴到准分子激光系统, 还有大量的试验数据和改进经验。此外, 其公司创建者 B. Steyer 和 D. Basting 都是化学家, 在抗腐蚀气体材料研究上得到较大优势。以及与周边马普研究所和哥廷根大学的研究合作也加速了其技术的开发。1983 年 Lambda Physik 公司推出有较大技术改进的 EMG 103 MSC。自动预电离技术的发展使激光输出能量稳定性得到极大提高; 气体处理器的引入大大延长激光气体的寿命; 磁开关和磁助器的引入显著延长闸流管的寿命。

激光电源方面, 结构紧凑轻便的高压开关电源被引入替换 LC 谐振充电电源, 提高了闸流管的稳定性和准分子激光器件的自动控制程度。20 世纪 80 年代初, 激光对材料作用等基础研究促使准分子激光市场迅速增大。仅 1984 一年 Lambda Physik 公司在全球安装准分子器件 200 多套<sup>[2]</sup>。20 世纪 80 年代中期, 窄线宽、低发散角的准分子器件使激光雷达臭氧探测成为可能, 商品器件一般采用非稳腔结构和双腔振荡模式。

20 世纪 90 年代, 随着准分子激光引入半导体光刻生产领域, 大量 KrF 准分子器件进入工业生产线, 推动了高重复频率、窄线宽、长寿命、高稳定性准分子激光技术的发展<sup>[14~17]</sup>。伴随光刻节点的不断降低, 更短波长的 ArF 准分子激光被引入到光刻生产<sup>[18,19]</sup>。工业生产中, 提高生产效率、降低生产成本促使准分子激光技术不断革新。为提高工作气体寿命, 腔体结构材料由早期的不锈钢-氟塑料结构改进为铝合金-陶瓷结构, 有效降低激光淬灭物质的产生; 光刻准分子器件中, 密封结构也由之前的氟橡胶密封改为全金属结构密封; 洁净的电晕预电离被广泛引入。

与此同时, 其他微结构加工和材料处理等工业应用也促进了准分子激光技术的发展, 特别是诸如液晶平板退火、微细结构加工和表面处理等应用对大功率准分子器件的促进<sup>[1]</sup>。为满足这些需要, Lambda Physik 公司推出 STEEL 2000, XeCl 准分子激光器最大输出可达 315 W<sup>[6]</sup>。

目前国际上准分子激光器主要生产家有: 美国的 Coherent(包含收购的 Lambda Physik 和 Tui Laser), 美国的 Cymer, 日本的 Gigaphoton, 美国 Gam laser 和加拿大的 Lumonics 等。Lambda

Physik 是最早从事准分子商品器件生产的公司,各等级输出种类齐全,能满足绝大多数应用。Tui Laser 主要生产小功率器件,二者被 Coherent 收购后,Coherent 成为全球最大的准分子激光器件提供商。Cymer 和 Gigaphoton 主要生产光刻用准分子激光器,销量分列第一和第二。Gam laser 和 Lumonics 也提供大量工业、医疗和科研用准分子器件。

近年来,国内仅中国科学院安徽光学精密机械研究所提供实用准分子激光商品器件。

### 2.3 准分子激光激励技术

常用准分子激光器大多工作在紫外波段,且上能级寿命仅  $10^{-8}$  s 量级,对激励技术提出了较高要求。其激励系统必须具有高的功率密度和短的脉冲上升时间。准分子激光的主要激励手段有:电子束激励、放电激励和微波激励<sup>[6]</sup>。

#### 2.3.1 电子束激励

由于电子束可以达到相当强的激励功率,能满足许多激活体系对激励源的要求。准分子体系大多在电子束抽运装置上获得了激光振荡,而且在各种激励手段中保持了最高的输出水平。在电子束激励的气体激光器中,有横向激励、纵向激励和同轴激励三种主要形式。

电子束激励是从激光腔的外部注入电子束,由于电子束具有相当高的能量和快的脉冲上升时间,能实现较大体积的激励,最大输出可达数千焦耳。国际上一些规模较大的 KrF 准分子激光装置均采用电子束激励,如美国洛斯阿拉莫斯实验室的 Aurora 装置、美国海军实验室的 Nike 装置、英国卢瑟福实验室的 Sprite 和 Titania 装置、日本电气技术研究所的 Ashura 装置、我国的“天光”一号装置和“闪光”二号抽运的准分子激光系统等<sup>[13]</sup>。电子束激励体积庞大,结构复杂,不能高重复频率运行,加之价格较高,多用于特殊用途的大型实验装置。

#### 2.3.2 放电激励

与体积庞大、造价昂贵的电子束激励系统相比,放电激励器件具有价格低廉,小巧轻便、容易制作和可以高重复频率运转等优点。通常放电激励气体的方法是在气体中通以一个大小合适的电流,电流通过气体时就产生自由电子和离子。这些电荷被电场所加速。并且通过消耗放电过程中的电功率以获得动能,通常由电子和原子碰撞时产生激发。因为大体积均匀放电难度很大,因此放电激励适合小体积抽运,输出能量也不会太大。但因其重复频率可以到数千赫兹,因此功率可以做到数百瓦,目前商品化

的准分子器件几乎都是采用放电激励。

实用放电激励器件激光工作气体气压一般在 0.1 MPa 以上,电极间很难形成均匀的辉光放电,随着气压的提高,辉光放电越来越困难。为解决这一困难,引入了横向激励大气压 (TEA) CO<sub>2</sub> 激光器中采用的预电离技术,以提高准分子激光气体辉光放电的均匀性。预电离所需要的电子浓度从一开始认为的  $10^4$  cm<sup>-3</sup>,经反复的实验和计算,直到 1991 年才从理论上得出初始浓度应为  $10^9$  cm<sup>-3</sup><sup>[12]</sup>。准分子激光预电离方式有很多种,主要有:电子束预电离,X 射线预电离,紫外火花预电离和电晕预电离等<sup>[20~22]</sup>。当前实用器件中,常用的是紫外火花预电离和电晕预电离。

#### 2.3.3 微波激励

微波放电通过微波管将能量注入到放电腔中。其优点是无需预电离,体积小,容易实现长脉冲,高重复率运行<sup>[23~25]</sup>。微波激励的实验装置重复频率达到了 8 kHz,但单脉冲能量较小,最大约 100  $\mu$ J,输出功率最大也仅 1 W 量级<sup>[6]</sup>。

准分子激光器的微波激励要求输入波导管放电腔的功率水平达到 100 kW/cm<sup>3</sup>。人们研究了微波激励准分子激光器的两种不同的输入耦合结构。P. J. K. Wisoff 等<sup>[26,27]</sup>都采用了长方形波导管结构,C. P. Christensen 等<sup>[28]</sup>则研究并改进了横向电磁场 (TEM) 波导管。

## 3 快放电激励的准分子激光技术

电子束激励器件体积庞大,结构复杂,价格昂贵,其特点是可以做成大能量器件,多用于大科学工程。微波激励器件输出功率小,其优点是结构简单,易于做成高重复频率器件,但输出功率小。上述两种激励方式的器件很难满足工业应用需要。相比较而言,放电激励器件输出功率大,结构简单,价格低廉,运行稳定,满足大多数应用需求<sup>[6]</sup>。目前,绝大多数商业准分子激光器都是快放电激励的,因此以下主要讨论快放电激励准分子激光技术。

### 3.1 大能量技术与大功率技术

目前,准分子激光最大能量输出达到 10 kJ,由电子束抽运器件获得<sup>[6]</sup>。放电激励准分子器件中,采用 X 射线预电离的放电激励 XeCl 达到 50 J 输出<sup>[29]</sup>。大功率输出方面,Y. Saito 等<sup>[30]</sup>在 1995 年实现 XeCl 单脉冲 2.6 J,重复频率 800 Hz,输出功率达 2.1 kW。最大能量和最大功率输出器件基本都限于实验室样机,产品化的大能量大功率器件主要是美国 Coherent 公司的 Lambda SX 系列,最大能

量输出为其 KrF 器件,达 1.1 J,最大功率输出为其 XeCl 器件,单脉冲 0.9 J,最大重复频率 600 Hz,输出最大功率 540 W<sup>[31]</sup>。大能量准分子激光输出的关键是大激活区域的实现和大能量的有效注入,大功率器件需要在高能量输出前提下,提高重复频率。

### 3.1.1 X 射线预电离

X 射线能量大,穿透能力强,可以实现大体积的均匀预电离。利用 X 射线预电离的器件,输出口径大,激光能量高<sup>[32]</sup>。与紫外预电离器件相比,X 射线预电离准分子器件结构复杂,稳定性较低,成本较高,且 X 射线对人体有害,需要适当的防护措施。因此,其实际应用较少。典型 X 射线预电离器件结构如图 3 所示<sup>[29]</sup>。

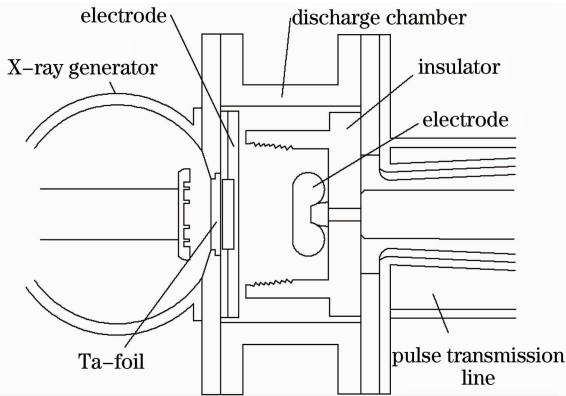


图 3 X 射线预电离的放电激励器件示意图

Fig. 3 Schematic drawing of the X-ray preionized discharge-pumped excimer

### 3.1.2 大面积放电电极

早期准分子激光放电电极采用基于保角变换  $Z=W+eW$  的 Rogowski 面型,Rogowski 电极虽然设计简单,加工方便,但三段平滑曲线被无规则粗糙地衔接在一起,电极剖面利用率太低<sup>[33]</sup>,不利于制作大面积放电电极。其他如 Bruce 面型,采用的是纯粹的经验公式,Harrison 面型是介于 Rogowski 和 Bruce 之间的面型。由于电场分布的不可解析性,很难对电极进行改进。后来引入双曲函数的保角变换  $Z=W+k(W) \sinh W$  的 Chang 氏电极<sup>[34]</sup>,其造型较 Rogowski 有较大改进,电极平滑性、紧凑性和场均匀性得到较大提高。之后陆续有基于傅里叶变换的 Stappaerts 面型<sup>[35]</sup>和通过修正 Chang 面型的保角变换得到的 Ernst 面型等<sup>[36]</sup>。紧凑型 Chang 面型设计电极表面电场强度分布由单峰型过渡到双峰型,有很好的纵横比,结构紧凑,适合在有限的激活区域实现大面积均匀放电,紧凑型 Chang

面型在实用器件中得到大量应用。

### 3.1.3 脉冲形成线

电容性储能的高压脉冲形成线作为高功率微波、电子束加速器、高功率激光和 X 光机的驱动源,在高功率脉冲技术领域得到了广泛的应用。由于其储能大,工作电压高,被引入大能量准分子激光激励系统<sup>[32]</sup>。脉冲形成线可以制作稳定的输出阻抗与击穿后的放电激光气体实现阻抗匹配,从而使激励能量有效注入工作气体,获得高效率激光输出。另外,脉冲形成线理论上可以输出矩形脉冲,可以根据需要设计输出脉冲宽度,从而拉长输出激光脉宽,降低输出光脉冲峰值功率,有利于延长后端光学器件寿命。脉冲形成线按储能介质不同可以分为液态介质脉冲形成线和固态介质脉冲形成线。液态介质主要使用变压器油和去离子水,固态介质主要使用陶瓷<sup>[37]</sup>。1989 年 T. Hasama 等<sup>[29]</sup>采用基于水脉冲形成线的放电激励模块来抽运 X 光预电离的 XeCl 准分子激光器,获得 50 J 激光输出,脉冲宽度 85 ns,最高效率在输出 17.6 J 时测得,达 3.1%。

### 3.1.4 双脉冲放电

准分子激光工作气体击穿前阻抗较大,击穿后阻抗极小,一般的放电准分子器件中,由于激励源的输出阻抗与工作气体击穿后的阻抗不匹配,能量注入效率较低。20 世纪 80 年代初,W. H. Long 等<sup>[38]</sup>采用预脉冲的方式,获得 XeCl 最大效率 4.2% 的输出,输出达 4.2 J。1999 年 K. Haruta 等<sup>[39]</sup>采用预脉冲电路研制一高功率的 XeCl 器件,效率达 4.3%,800 Hz 运行输出功率 2 kW。简单的预脉冲技术电路如图 4 所示。

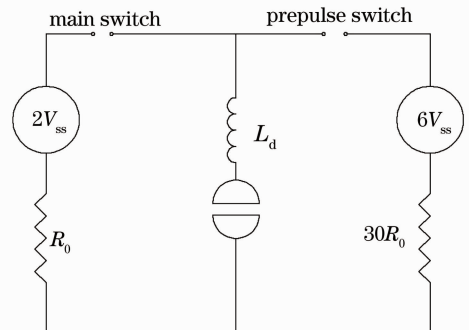


图 4 预脉冲电路示意图

Fig. 4 Prepulse circuit scheme

预脉冲的基本思想是,在电极间预电离产生后,回路在放电电极间提供一高压脉冲(小能量)击穿工作气体,使之形成均匀的辉光放电,然后阻抗与击穿气体匹配的能量注入电路再开始对工作气体放电,此时的放



电过程是一高效率能量转移过程。经当时数值模拟计算,认为预脉冲电路的能量注入效率达90%。

### 3.2 高重复频率技术

实现高平均功率输出基本途径有两条:1)相对低的重复频率,高单脉冲能量运行;2)高重复频率,低脉冲能量运行。对于放电激励系统而言,高脉冲能量实现对器件和回路要求都较高,而低的脉冲能量高重复频率实现相对容易,因此,实用大功率器件一般选择此路线。此外,应用于诸如半导体光刻等对剂量要求严格的微细加工领域,重复频率越高越利于加工控制<sup>[40,41]</sup>。因此,高重复频率工作的准分子激光技术一直是研究的重点。

#### 3.2.1 高速气体循环

准分子激光放电激励时,只有电极间的气体介质(通常为混合气体)被激励放电形成准分子并产生激发和跃迁,同时在放电区域也会生成一些不利于激光运行的放电产物影响放电质量,严重时引起拉弧。因此,需要及时更新放电区工作气体,如图5所示。工作气体更新率  $C$  表示为<sup>[6]</sup>

$$C = \frac{S}{W} = \frac{V}{W \times f}, \quad (1)$$

式中  $W$  为放电区宽度,  $V$  为气体流速,  $f$  为激光重复频率。

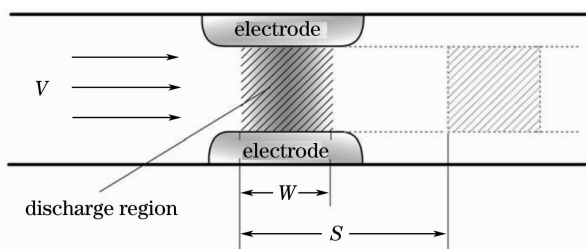


图5 放电区更新示意图

Fig. 5 Flow clearing of discharge region

大功率输出激光器要求  $C$  的取值在2~3以上<sup>[42]</sup>,重复频率为1~2 kHz的激光器,气体流速需要约50~100 m/s(放电宽度较宽)<sup>[6]</sup>。大功率风机和合理风路设计是实现气体高速循环的关键。用于准分子器件的气体循环系统主要有两类:腔外循环系统和腔内循环系统。腔外循环系统在激光腔体外制作循环风道,一般采用离心风机或轴流风机。这类结构体积庞大,实用器件一般很少采用。但其风路设计改进较容易,测量也较方便,因此在实验室应用较多。腔内循环系统是在激光腔体内直接设计循环风路,安装循环风机,其优点是结构简单紧凑,高速横流风机是较理想的选择。目前,高重复频率的商品器件一般都是采用这类结构。另外,因为风机转速较快,风机

的刚性和磁力联轴器的扭矩也是值得注意的地方。高速气流下,风路的设计显得极为重要,合理的低风阻通道才能实现气体高速循环。千赫兹高重复频率准分子激光头设计一般如图6所示<sup>[6,43]</sup>。

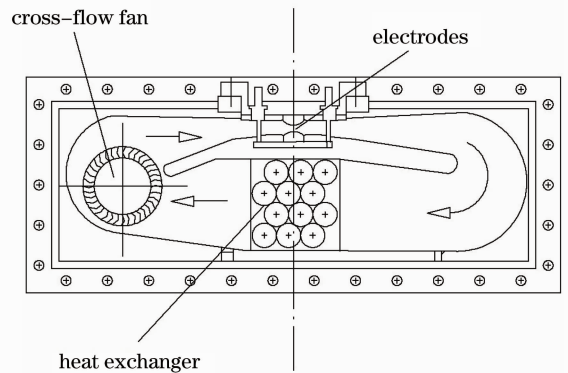


图6 典型高重复频率准分子激光头示意图

Fig. 6 Cross section of a typical high repetition rate laser head

#### 3.2.2 声学激波抑制

激光工作气体快放电激励的时候,会产生声学激波(Acoustic and shock waves)在腔内传播,并由于腔内反射等作用,引起腔内工作气体密度分布不均,使放电不均匀,从而导致激光输出质量降低<sup>[6,44,45]</sup>。特别在高重复频率运行时,由于脉冲间隔时间短,脉冲受上一次放电影响大,而且,高重复率运行时,腔体可能产生共振,形成稳定分布的驻波,这将影响激光输出。激波主要有三类:沿光轴方向的激波、沿风路方向的激波和电极间来回反射的激波<sup>[6]</sup>。需要对这些激波进行有效的耗散和抑制,主要措施有:风路添加过滤网格、安装消音器、侧壁安装激波抑制器及设计合适的电极形状。

#### 3.2.3 电晕预电离

预电离的目的就是在主放电形成之前,通过预电离产生大量的初始电子分布,促使电子崩在放电空间均匀重叠,阻止流注的形成,实现均匀的放电<sup>[46,47]</sup>。实用器件中,常用的是紫外火花预电离和电晕预电离。电晕预电离相比针放电紫外火花预电离,产生的电子数密度不大,但均匀性好,且放电不会腐蚀预电离电极,不生成放电粉尘污染气体和腔体,因此是一种“洁净”的预电离,特别适合高重复频率运行<sup>[48,49]</sup>。如图7所示,主放电电极两边制作比较尖锐的棱边,靠近棱边为两根柱状预电离电极,外面用绝缘介质包裹。在主放电电极放电之前,预电离电极与棱边电压上升到一定值时,发生电晕放电,在主放电电极之间的区域形成一定浓度的电子密度

分布。此类结构适合于小能量输出的放电区较窄器件,如当前半导体光刻用准分子激光器。

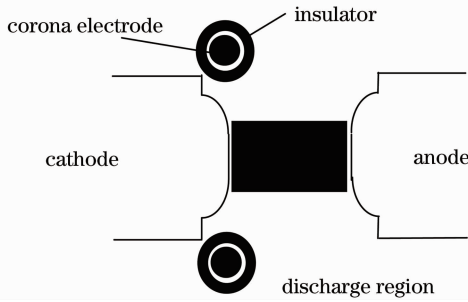


图 7 电晕预电离示意图

Fig. 7 Schematic view of the corona preionization

### 3.2.4 全固态脉冲激励

高重复频率准分子激光器输出达数千赫兹,如当前最新光刻用 ArF 准分子激光器重复频率达 6 kHz,闸流管的约  $10^9$  次脉冲放电寿命显得有限。若按 6 kHz 计算,闸流管只能运行约 50 h。固态脉冲功率模块 (Solid state pulsed power module, SSPPM) 利用功率半导体开关结合多级磁脉冲压缩开关的方法产生高压快脉冲来替代闸流管<sup>[50]</sup>。半导体开关和磁脉冲开关在长期高重复频率条件下性能无明显下降,所以这一技术几乎不考虑寿命问题,能满足高重复频率长期运行。常用典型全固态脉冲激励主回路示意图如图 8 所示<sup>[51]</sup>。

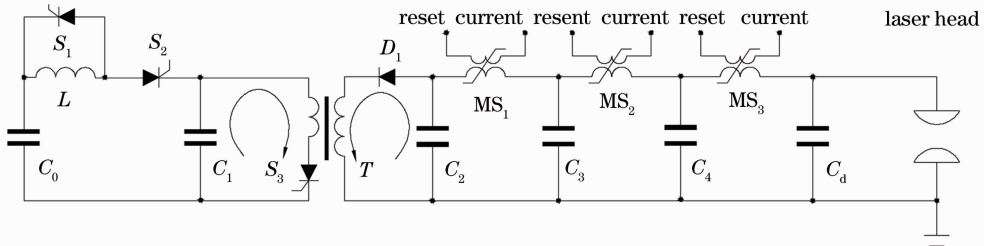


图 8 全固态脉冲激励电路示意图

Fig. 8 Simplified circuit schematic of SSPPM

全固态脉冲激励技术的核心是磁脉冲压缩技术。图中的  $MS_1, MS_2$  和  $MS_3$  式磁脉冲压缩开关,其实质是一种非线性电感,利用其饱和前后的电感值差异来改变电路的工作状态。磁开关承受电压随时间的积分与磁开关参数关系可表示为<sup>[52]</sup>

$$\int_0^{T_{sat}} V(t) dt = N\Delta BA, \quad (2)$$

(2)式也被称为伏秒积分,表征磁开关的耐压特性。 $T_{sat}$ 为磁开关耐压时间; $V(t)$ 为磁开关承受电压; $\Delta B$ 为磁芯材料磁通密度摆幅。图 8 中的磁开关压缩波形如图 9 所示。

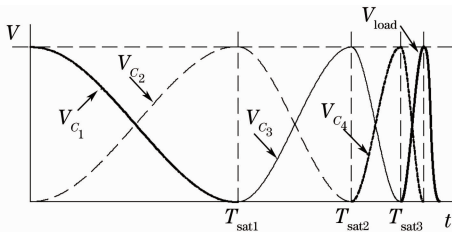


图 9 典型三级磁脉冲压缩电路中的电容电压波形

Fig. 9 Typical capacitor voltage waveforms of a three-stage magnetic pulse compression circuit

1951 年 W. S. Melville<sup>[52]</sup>首次提出用磁脉冲压缩技术来产生大功率脉冲,随后 I. Smilanski 等<sup>[53~56]</sup>进行了全固态脉冲技术激励准分子激光的

研究。目前,用于光刻的最新准分子光源 XLR-600i 和 GT62A 均采用全固态脉冲激励技术,输出激光重复频率 6 kHz,输出最大功率 90 W<sup>[57~60]</sup>。

### 3.2.5 气体工作寿命

准分子激光器工作气体寿命有限,表现为随着脉冲数量和时间的增加,激光输出能量不断下降。其主要原因在于卤素气体容易和其他物质反应而降低浓度,且某些反应生成物会造成激光淬灭<sup>[61,62]</sup>。准分子激光器工作气体寿命是拓展实用准分子激光器应用的一个瓶颈,尤其是高重复频率应用。

所以,延长准分子激光工作气体的寿命是实用准分子激光技术的重要组成部分,有利于降低激光器的使用成本。主要采用的技术手段有:

1) 采用金属陶瓷腔结构来降低氟的损耗和杂质的生成。早期准分子激光器腔体中主要采用合金铝和氟塑料作为结构材料,研究表明,导致激光能量下降的主要原因是工作气体中氟气与含碳材料反应生成激光淬灭物质  $CF_4$ 。高纯三氧化二铝陶瓷材料具有优秀的耐氟能力和良好机械性能,其在放电条件下产生的激光淬灭物质  $CF_4$  远远低于聚四氟乙烯材料<sup>[61]</sup>,所以目前的准分子激光器中金属-陶瓷腔结构已基本替代了金属-聚合物腔体结构。

2) 采用专门装置对气体进行净化,如采用液氮

冷井去除部分杂质,活性炭冷井去除  $\text{CF}_4$ , 高温钼合金装置去除大气杂质如  $\text{N}_2, \text{O}_2$  等<sup>[63]</sup>。激光能量反馈控制系统中综合采用一些控制方法来延长气体寿命。主要手段有提高放电电压、补充卤素气体和部分更换工作气体等<sup>[64]</sup>, 控制系统通过一定的方法将其组合起来, 达到延长气体工作寿命的目的<sup>[65]</sup>。

图 10 为在控制系统的作用下, 准分子激光输出脉冲能量和工作电压的变化示意图, 其工作过程为: 随着脉冲能量的下降, 不断提升工作电压; 当工作电压达到最大值时, 补充卤素气体, 并降低放电电压; 当补充卤素气体效果不明显时, 进行部分更换工作气体的过程。这些过程通过一定的方法组合起来, 可以有效地延长单次换气后的使用时间<sup>[66]</sup>, 减少停机次数, 降低生产线的运行成本。

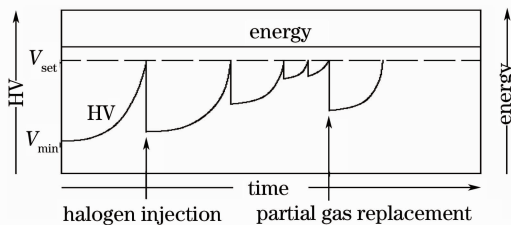


图 10 控制系统稳定脉冲能量和延长气体寿命示意图

Fig. 10 Schematic of the pulse energy stabilization and the gas lifetime extension

### 3.3 光束控制技术

不同的应用需求, 对准分子激光输出的光束质量、激光谱线线宽、激光脉冲宽度等提出了一定的要求。采用相关的技术可以实现对准分子输出激光的控制和调制获得需要的准分子光源。

#### 3.3.1 光束发散角压缩

在激光消融、退火和表面修饰等应用领域, 对准分子激光光束质量提出了较高要求<sup>[67,68]</sup>。改善准分子激光光束质量的两个重要方面是: 压缩发散角和提高光束均匀性。准分子放电区多为矩形, 采用稳定腔时输出发散角在数毫弧度量级。压缩发散角较常用的方法是采用非稳腔替换一般准分子使用的平平腔。正支共焦非稳腔具有结构紧凑、设计简单的优点, 可以使发散角减小一个数量级以上, 同时保证输出激光能量没有显著的下降, 在实用型器件上得到广泛采用<sup>[69]</sup>。一种常用的结构是, 采用双腔的注入锁定放大结构模式, 种子腔产生优质的种子脉冲, 注入非稳结构的放大腔放大输出<sup>[70]</sup>, 如图 11 所示。

准分子激光器在大体积、高电压、高气压状态下运转, 容易导致放电增益不均匀, 光束截面的强度分

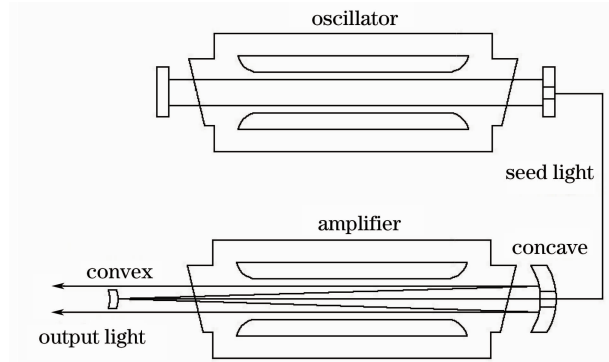


图 11 注入锁定的非稳腔放大结构示意图

Fig. 11 Schematic diagram of an injection-locking of unstable-resonator laser

布有较大起伏<sup>[71,72]</sup>。目前准分子器件常用的光束均匀法有: 光波导均匀器、棱镜组均匀器和两级蝇眼均匀器等。它们有各自的优缺点, 需要根据实际应用选取。光波导均匀器可以实现较好的均匀性, 但光损耗很大; 棱镜组均匀器结构简单, 但均匀度稍差; 两级蝇眼均匀器可以实现很高的均匀性, 损耗也较小, 但价格昂贵, 且光路对准要求较高<sup>[72]</sup>。

#### 3.3.2 线宽压窄技术

由于自身跃迁特点, 自由振荡准分子激光一般发射线宽在数百皮米(半峰全宽, FWHM)<sup>[6]</sup>。在诸如光刻等微细加工领域, 对激光线宽要求较高, 例如目前 45 nm 节点光刻准分子光源输出线宽 E95 小于 0.35 pm<sup>[73]</sup>。通过在腔内添加各种色散元件可以实现对准分子激光光谱进行压缩, 常用的色散元件有棱镜、标准具和光栅等<sup>[74~76]</sup>。

棱镜组合法对准分子激光进行线宽压缩, 结构简单, 调试方便, 但压缩比例不高, 仅适用于对线宽要求不是很高的应用。

标准具是采用多光束干涉原理制成的器件, 在实际应用中常是几个标准具组合使用压缩线宽。在准分子激光自由运转的光谱轮廓范围内, 具有较大自由光谱区的标准具从自由运转光谱范围内选出单支跃迁谱线进行初步压缩, 再利用具有窄自由光谱范围的标准具选频进行更细致的谱线压缩。标准具作为腔内选模元件对准分子激光进行谱线压缩, 具有压缩线宽窄的优点。但由于光束在标准具内的多次反射, 能量密度高, 标准具易损伤, 且受热效应影响波长的漂移及线宽变化明显, 因此适宜于有精确波长反馈系统的低功率器件。

光栅压缩线宽中, 为了获得窄线宽输出, 需要光束有较小的发散度, 因此一般在激光腔内放置狭缝和棱镜组成的扩束系统<sup>[76]</sup>。光栅压窄线宽应用中,



仅需控制单个光栅来锁定输出激光波长,而且光栅温度稳定性效果好,因此波长的漂移及线宽变化范围要小于标准具法。在光路中采用了棱镜组作为扩束系统,降低了光栅表面的能量密度,从而提高了光栅的使用寿命。

在实际应用中,若对线宽压窄要求很高,一般采取棱镜、标准具与光栅组合法,如图 12 所示。

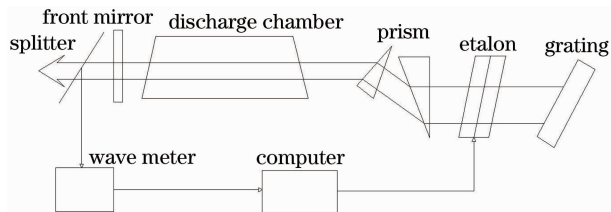


图 12 棱镜、标准具与光栅组合法压窄线宽示意图

Fig. 12 Schematic diagram of hybrid method of grating with etalon and prism

光栅被用来进行初步的线宽压缩,而标准具在光栅对线宽进行压缩的基础上进行更为细致的线宽压缩。由于被用作线宽初步压缩的光栅具有好的温度稳定性,从而减小了输出波长的漂移量;由棱镜组成的扩束系统降低了标准具内的能量密度,因此提高了标准具的使用寿命。

### 3.3.3 脉宽控制技术

放电激励准分子激光脉宽一般在十几到几十纳秒(FWHM),不同的应用对准分子激光脉冲宽度有不同的要求,因此,需要针对需求采取一定的脉宽控制技术。

长脉冲准分子激光器在紫外脉冲的锁模装置以及窄线宽的可调谐染料激光器上有较多应用。另外,在激光生物医学等应用中,需要光纤中传输准分子激光束,但由于准分子激光脉冲窄,峰值功率高,往往容易造成光纤损坏。在光刻等精密加工应用中,后端光学系统极为昂贵,高的激光峰值功率影响其使用寿命。脉宽拉长对于这些应用显得非常重要。拉长脉宽较简单的方法是在 LC 激励电路中插入电感,延长放电时间。如 K. Hotta 等采用这种方法获得 65 ns 脉宽输出<sup>[77]</sup>。但此类方法一般会降低激光效率,输出能量减小。较理想的做法是采用脉冲形成线激励技术。脉冲形成线能提供一较宽的准方波激励脉冲,且阻抗可以跟击穿后的工作气体很好地匹配,能实现长时间稳定放电。1989 年 R. S. Taylor 等<sup>[78]</sup>利用脉冲形成线结合预脉冲技术,获得了 0.5  $\mu\text{s}$  XeCl 输出。此外,采用注入锁定等放大结构的准分子器件中,激光的多程振荡放大也能在

一定程度上拉长脉宽<sup>[79]</sup>。有的应用中,在输出端加一光学脉冲延展器也能起到延展脉冲、降低峰值功率的作用<sup>[57]</sup>。

脉宽压缩是提高激光光强最有效的途径,作为惯性约束聚变(ICF)的 KrF 激光要求激光脉宽约 2 ns<sup>[80]</sup>,因此需要对其进行脉宽压缩。准分子器件产生短脉冲的方法包括:锁模法、电光开关削波法、受激布里渊散射法、受激拉曼散射压缩脉冲法和等离子体开关法等,压缩后一般输出在数纳秒内<sup>[81,82]</sup>。

目前,超短脉冲激光及其与物质相互作用的研究是最热门的研究领域之一<sup>[83]</sup>,并已应用于 X 射线激光、高次谐波产生、激光生物实验以及惯性约束聚变快点火实验等强场物理研究的前沿领域。紫外超短脉冲激光在强场物理等领域的研究中具有无可比拟的优势,紫外光除了波长短、可聚焦能力强以外,还具有更大的临界密度。获得高功率紫外超短脉冲激光的最为有效的技术路线是用锁模固体钛宝石激光器产生的飞秒激光脉冲作为种子光源,经三倍频后,再用准分子激光器进行脉冲放大。Y. Nabekawa 等<sup>[84]</sup>1993 年利用此类方法获得 248 nm,130 fs 输出,峰值功率达太瓦级。

### 3.4 激光电源技术

放电激励准分子激光器的主要工作过程为高压电源首先将能量充至储能电容器上,而储能电容器上的能量通过快速高压放电开关转移到放电电容上并实现对准分子激光气体的激励。可见,高压电源是放电激励准分子激光器中能量的“源泉”。

实用的放电激励准分子激光器高压电源有:谐振充电式、开关电源式和脉冲升压式。

谐振充电式激光电源是由高压变压器和整流电路产生直流高压,再通过谐振电感形成翻倍电压,将能量储存在高压储能电容上<sup>[85,86]</sup>,典型的电路原理如图 13 所示。

这种激光电源结构简单,抗冲击电流能力强,但由于工频变压器的存在,体积庞大。另外储能电容长时间承受高压,不仅不便于自动控制,而且会缩短高压元件的工作寿命,直至影响闸流管的正常工作<sup>[87]</sup>。目前的商用准分子激光器已基本不使用这种模式的激光电源。

开关电源式高压电源是先对市电低压整流,再利用逆变技术产生高频交流振荡。通过高频变压器将能量转移到高压储能电容上<sup>[88]</sup>。这种激光电源大多采用“即充即放”的模式工作,即在需要激光器出光之前的一段时间内电源才工作和输出高压,然

后激光器立即放电出光<sup>[89]</sup>。对比谐振充电式激光电源的工作模式,激光器内部的储能电容和闸流管等元件承受高压的时间大大缩短,可以有效地延长这些关键部件的使用寿命,且这种电源体积小,控

制方便,是通用的激光电源模式。图 14 为典型的全桥逆变串联谐振式开关电源驱动闸流管型准分子激光器的原理示意图。

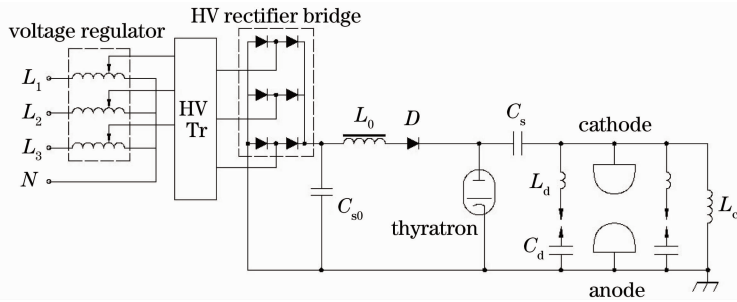


图 13 谐振充电式电源原理示意图

Fig. 13 Schematic of resonant charging mode

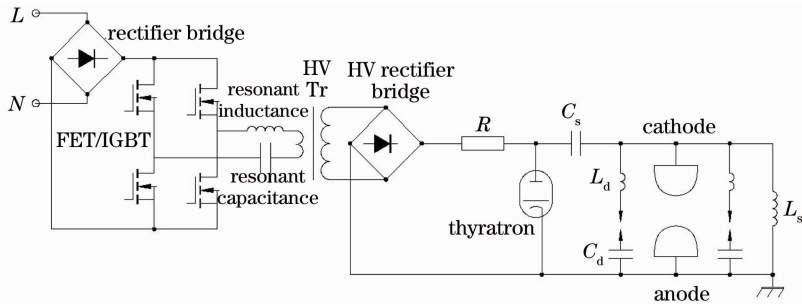


图 14 全桥逆变串联谐振式开关电源原理示意图

Fig. 14 Switching mode power supply of the series resonate full bridge inverter

由于准分子激光放电时的强电磁干扰(电压 20~30 kV, 电流峰值数 10 kA)<sup>[89]</sup>, 逆变电路的控制和保护线路较为复杂, 成为整个电源的难点。另外, 开关电源式高压电源给储能电容进行充电的时间一般在毫秒量级以上, 所以这种电源不适合千赫兹以上高重复频率运行。目前重复频率要求不高的商用准分子激光器主要采用这种电源。

除了上面两种模式的准分子激光器高压电源外, 还有一种脉冲升压式高压电源也广泛应用于高重复频率准分子激光器中。图 15 为脉冲升压电源结合闸流管激励准分子激光的原理示意图。市电经整流后对电容器  $C_0$  充电, 然后经倍压谐振过程将能量转移到  $C_1$  上,  $C_1$  上的能量经脉冲变压器升压后在一个周期内即转移到激光器储能电容  $C_s$  上<sup>[90]</sup>。

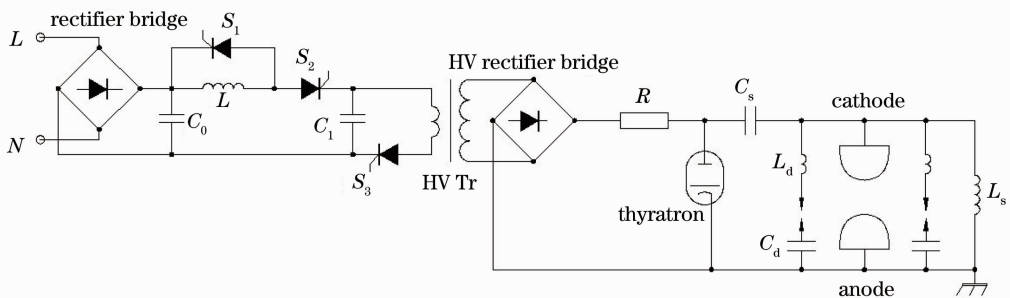


图 15 脉冲升压电源结合闸流管激励准分子激光器原理示意图

Fig. 15 Pulse-charging power supply driving the excimer with thyatron

脉冲充电式激光电源结构简单、控制方便, 通过对  $S_1$ ,  $S_2$  和  $S_3$  的时序控制即可实现激光器储能电容上电压的可控调节<sup>[91]</sup>。而这种电源最大的优点

在于以单个脉冲的形式将能量转移到高压储能电容上, 充电时间短, 一般约为几个到几十个微秒, 可以满足高重复频率运行。光刻光源中, 一般采用脉冲

充电电源结合磁开关激励高重复频率准分子器件<sup>[92]</sup>。图 8 即为脉冲升压电源结合磁脉冲压缩开关激励准分子激光器。

### 4 准分子激光在半导体光刻领域的应用及其近期技术发展

由于短波长和大功率的特点,准分子激光成为目前大规模半导体集成电路光刻的主要光源。光刻机也是准分子激光器最大的产业应用领域。随着光刻节点即将进入 32 nm 节点,ArF 准分子光刻已经成为主流,并有望应用到更低的 22 nm 节点和 16 nm 节点<sup>[93]</sup>。与此相关,当前准分子激光技术的研究热点主要集中在光刻用准分子激光技术上。随着光刻节点的降低,要求 ArF 准分子激光器具有更加稳定的窄谱线宽度、更大的输出功率、更高的剂量稳定性(Dose)和更长的气体寿命。近期光刻用准分子激光技术主要围绕这些需求展开<sup>[57~60]</sup>。

#### 4.1 主振-振荡放大

随着光刻对光源输出功率和线宽要求的提高,单腔结构准分子器件在功率和线宽方面不能兼顾而不能满足需要。双腔结构的主振-振荡放大技术被引入以解决输出功率和线宽的矛盾。其基本思想是利用种子腔产生小能量的窄线宽种子光,注入放大腔输出大能量脉冲,从而得到窄线宽、大功率的优质激光束。最先采用的是 MOPA (Master oscillator power amplifier)结构<sup>[94]</sup>,如图 16 所示。

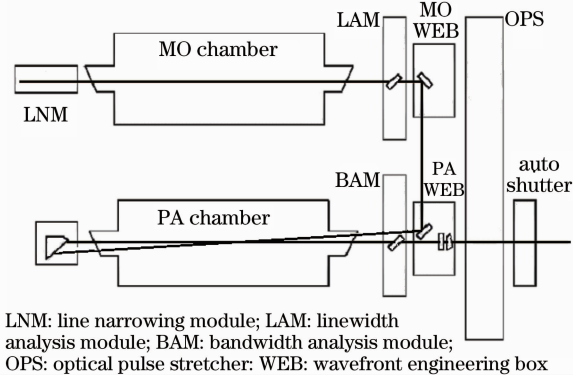


图 16 MOPA 结构示意图(Cymer)

Fig. 16 Schematic diagram of the MOPA architecture (Cymer)

MOPA 结构机型中,MO 腔输出经线宽压窄处理后需要约 1 mJ 优质种子光传递到 PA 腔,由于线宽压窄导致的低转换效率,大能量的放电激励使 MO 腔的寿命明显偏低。另外,PA 腔输出受 MO 和 PA 同步抖动影响较大,激光能量输出稳定性很难提高。注

入锁定技术(Injection lock technology)<sup>[59,95]</sup>和环形腔技术(Recirculating ring technology)<sup>[57,73]</sup>弥补了 MOPA 结构的不足。采用注入锁定技术的 MOPO (Master oscillator power oscillator)结构如图 17 所示;采用环形腔技术的 MOPRA (Master oscillator power regenerative amplifier)结构如图 18 所示。

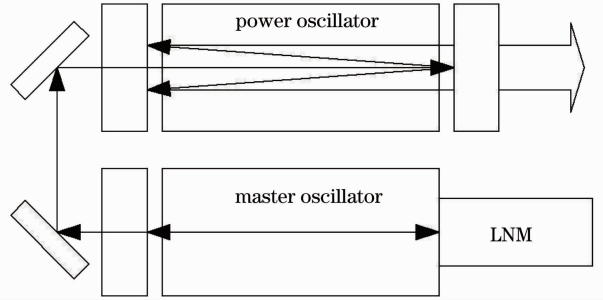


图 17 MOPO 结构示意图(Gigaphoton)

Fig. 17 Schematic diagram of the MOPO architecture (Gigaphoton)

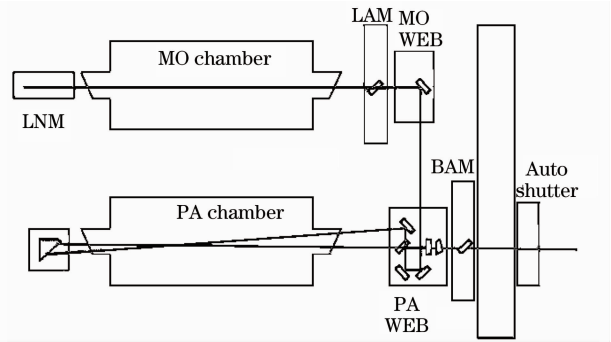


图 18 MOPRA 结构示意图(Cymer)

Fig. 18 Schematic diagram of the MOPRA architecture (Cymer)

注入锁定技术和环形腔技术中,输出腔采用了多程的功率放大,而不是如 MOPA 技术的单程放大。其显著特点就是种子光注入后,在放大腔中停留时间长,且放大腔工作在深度饱和状态。相比 MOPA 技术,其优点主要表现在:效率更高、能量更大、输出更稳定、输出脉冲更宽。

#### 4.2 线宽压窄和带宽控制

对于 32 nm 节点光刻的应用,光谱带宽衡量指标 E95 的大小及稳定性是一重要参数,它影响曝光系统成像能力和临界尺寸 CD(Critical dimension)控制<sup>[73,96]</sup>。线宽压窄单元 LNM 主要由棱镜和光栅组成,光栅的性能直接影响 E95 大小。采用高分辨率光栅组成线宽压窄模块,当前最新机型的 E95 都控制在小于 0.35 pm<sup>[57,59]</sup>。

因为投影镜头的色差,光谱带宽的变化将导致散焦误差,从而引起对比度损失和光学邻近误差产



生<sup>[97,98]</sup>。稳定的光谱带宽在低节点光刻应用中显得尤为重要。在主振-振荡放大结构运行过程中, E95 随着两腔体放电的时间间隔  $\Delta t$  变化<sup>[57]</sup>, 利用这一特性, 通过在线检测 E95 参数, 采用闭环控制系统动态调节  $\Delta t$ , 从而实现 E95 短期稳定控制。在线宽压窄模块中, 同样利用 E95 实时检测分析和闭环控制系统, 运用光学调节(主要是对光栅的调节)的办法, 控制 E95 长期稳定性在小于 0.1 pm。利用光学调节的方法, 还可以根据用户需要设定 E95, Cymer 公司称其为可调带宽主动稳定技术 ABS (Active bandwidth stabilization technology)<sup>[57,73]</sup>。

### 4.3 气体管理

延长激光工作气体寿命一直是准分子激光技术的研究热点。选用合适的材料, 制作杂质吸收装置, 并借助气体管理技术可以有效延长工作气体寿命。而且, 最近的研究表明, 工作气体中氟气的浓度影响输出激光 E95 参数。为了实现能量和光谱带宽的稳定, 腔内氟气含量的精确稳定是一关键技术。因此, 气体管理技术显得尤为重要。Gigaphoton 公司开发了新的气体管理系统: 硬件部分开发了高精度补气 and 抽气模块, 精确控制氟气含量; 软件上优化了气体控制的运算法则。通过这些努力, 氟气浓度波动稳定在小于 1 kPa 误差范围内, 气体寿命达 10 亿脉冲, 换气间隔由原来的 3 天延长到 15 天<sup>[96]</sup>。Cymer 公司也开发出气体管理系统 GLX, 气体寿命达到 10 亿脉冲<sup>[99]</sup>。

## 5 应 用

准分子激光作为大功率的紫外光源, 广泛地应用于科研、医疗和工业等领域。

### 5.1 科研应用

科研应用中, 准分子激光器被广泛地应用于光谱学、表面科学、材料科学和反应动力学等学科的研究中<sup>[100]</sup>。

#### 5.1.1 激光诱导荧光检测多环芳烃类物质

多环芳烃类化合物 (Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是世界性常见污染物, 已被各国列为优先控制的污染源。

PAHs 具有很强的荧光性, 同时在紫外波段有很强的吸收, 因此激光诱导荧光 (Laser-induced fluorescence, LIF) 光谱的方法检测 PAHs 已经发展为相当成熟的技术<sup>[101]</sup>, 准分子激光可以很好地应用于这种方法中用来检测大气、水体和土壤中的 PAHs<sup>[102]</sup>。

美国达科他科技公司开发的 UVOST (Ultra-violet optical screening tool) 系统采用 308 nm 准分子激光诱导荧光来探测土壤中的污染物<sup>[103]</sup>。他们将准分子激光束耦合进光纤, 再通过一根末端带有蓝宝石窗口的探测插杆进入土壤, 入射的紫外光被吸收, 而油中的 PAHs 被激发出的荧光则沿原路返回进入一个摄谱仪进行分析。该系统也适用于对石油、各种油类、润滑剂、杂酚和焦油的实时检测, 如图 19 所示。

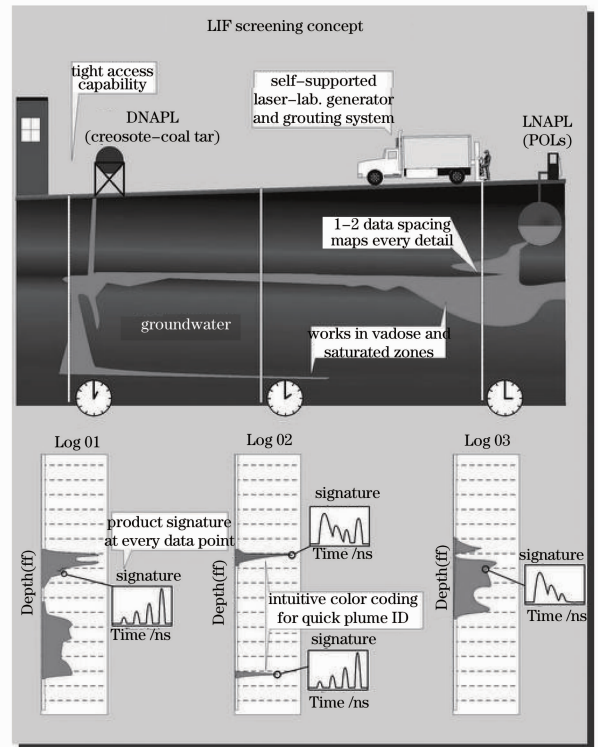


图 19 激光诱导荧光检测示意图

Fig. 19 LIF screening concept

除此以外, 环境检测方面准分子激光器还被应用于激光质谱探测大气气溶胶<sup>[104]</sup>、激光质谱检测机动车尾气<sup>[105]</sup>、差分吸收雷达进行大气臭氧检测<sup>[106]</sup>等方面。

#### 5.1.2 脉冲激光沉积

一定能量的激光与固体作用时, 在固体表面附近区域会产生一个由该固体成分粒子形成的发光的等离子体区。在等离子体区设置衬底就会得到相应的薄膜沉积, 这就是激光成膜。而激光参数是激光成膜的关键。

由于高功率、短脉冲、长时间稳定输出、光子能量高等特点, 准分子激光是激光成膜光源的最好选择。伴随着短脉冲高能量准分子激光器的发展, 诞



生了一种新的薄膜制备技术——脉冲激光沉积 (Pulsed laser deposition, PLD) 技术。作为一种物理沉积薄膜的方法,它与其他常用的物理或化学沉积方法,如溅射法 (Sputtering)、化学气相沉积法 (Chemical vapor deposition, CVD)、分子束外延法 (Molecular beam epitaxy, MBE) 等,一起被材料科学研究领域广泛采用。

PLD 是将脉冲激光器所产生的高功率脉冲激光束聚焦作用于靶材表面,使靶材表面产生高温及熔融,并进一步产生高温高压等离子体,这种等离子体定向向局域膨胀发射,并在衬底上沉积而形成薄膜,如图 20 所示。目前在所用的脉冲激光器中基本上采用 ArF 或 KrF 准分子激光器。

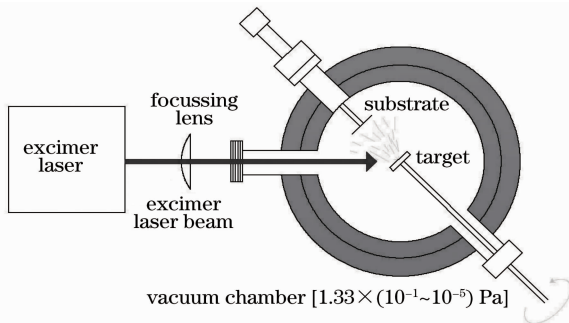


图 20 PLD 原理示意图  
Fig. 20 Schematic of PLD

1987 年贝尔实验室 D. Dijkkamp 等<sup>[107]</sup>首次尝试用 KrF 准分子激光器成功地制备出高质量的高温超导薄膜,在世界范围内掀起了利用 PLD 技术制备薄膜的热潮,推动了 PLD 技术的迅速发展。近年来,采用准分子激光器的脉冲激光沉积法在制备半导体薄膜材料、超巨磁电阻材料、高温超导体、超晶格材料、铁电体为代表的复杂氧化物薄膜和高熔点薄膜方面取得了很大的成功<sup>[108~110]</sup>。脉冲激光沉积技术凭借其独特的优越性而获得了迅速的发展,成为被人们广泛研究和采用的重要制膜技术<sup>[111]</sup>。

## 5.2 医疗应用

准分子激光的光子能量高,可以有效地切断组织分子内化学链而不产生过多的热能,能最大限度地减小受伤组织范围。另外,准分子激光衍射极限小,切割的深度和宽度都非常精细。因此在医疗领域,准分子激光也同样应用广泛。

### 5.2.1 眼科应用

193 nm 的 ArF 准分子激光非常适合于处理生物组织。由于其吸收深度小于  $0.25 \mu\text{m}$  并且作用时间只有数十纳秒,伴随的热影响非常小,使得 193 nm 的准分子激光自 1983 年 S. L. Trokel 等<sup>[112]</sup>首先用于角

膜切割的实验研究后,便逐渐开始应用于眼科临床中。20 世纪 90 年代初,由于美国食品和药物管理局 (FDA) 的正式批准,准分子激光开始大量应用于治疗眼屈光不正矫正手术,相关的设备和技术得以快速发展<sup>[113]</sup>。

目前眼科行业广泛采用 PRK (Photo refractive keratectomy), PTK (Photo therapeutic keratectomy) 和 LASIK (Laser in situ keratomileusis) 等手术对近视、散光、远视进行矫正<sup>[114]</sup>。图 21 为 LASIK 手术过程示意图。

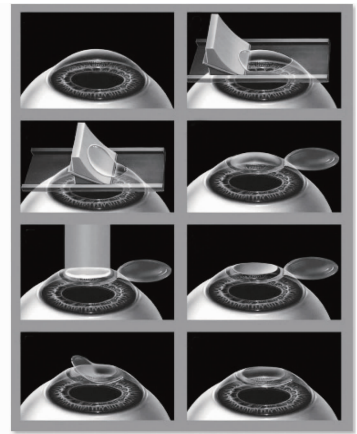


图 21 LASIK 手术过程示意图  
Fig. 21 Schematic of LASIK

### 5.2.2 皮肤病治疗

白癜风和银屑病是常见的后天性皮肤疾病,现行的治疗方法繁多,包括全身、局部激素治疗,免疫调节剂治疗,外科手术治疗和中医药治疗,其中光疗法是最有效的治疗方法之一<sup>[115]</sup>。20 世纪 70 年代光化学疗法即开始用于治疗银屑病、白癜风等皮肤病。1997 年 308 nm XeCl 准分子激光被发现治疗银屑病非常有效,2000 年左右,308 nm 准分子激光被应用于白癜风患者的临床治疗<sup>[116]</sup>。

目前,小能量的 308 nm XeCl 准分子激光正越来越多地应用于白癜风和银屑病的治疗中<sup>[117]</sup>。研究表明,308 nm 准分子激光治疗局限性白癜风的有効性和安全性都是肯定的,但是运用于紫外线敏感区域(如面、颈和躯干等部位)效果更为显著<sup>[118]</sup>。

## 5.3 工业应用

准分子激光的工业应用集中在微加工和材料表面改性两个方面,主要包括金属和陶瓷等材料的激光标记、喷墨打印机喷嘴钻孔、微结构的制作、制作布拉格光栅、刻蚀高密度电路板、半导体光刻、液晶显示器薄膜晶体管的低温退火,细导线绝缘层的剥离等。下面主要介绍其中几种应用。

### 5.3.1 低温硅退火

通过有源薄膜晶体管 active TFT (Thin film transistor) 驱动的有源矩阵液晶显示器 active matrix LCDs 已取代老式的 CRT 显示器成为市场主流。非晶硅 (Amorphous silicon, a-Si) 退火成为多晶硅 (Polycrystalline silicon, p-Si) 是高质量有源薄膜晶体管制造工艺中最关键的一步, 原因在于多晶硅中的电子迁移率为非晶硅的数百倍<sup>[119]</sup>。

目前最经济、可靠和高质量的技术是采用准分子激光进行低温多晶硅 (Low temperature polysilicon, LTPS) 退火, 最常用的是大功率 308 nm XeCl 准分子激光。

1997 年达到量产的低温多晶硅退火技术采用的是将准分子激光通过光学系统处理成均匀的条状后扫描非晶硅 (a-Si) 薄膜, 使之表面融化形成多晶硅 (p-Si), 称为准分子激光退火 (Excimer laser annealing, ELA)<sup>[119]</sup>, 其过程如图 22 所示。图 23 为 ELA 过程后的 p-Si 扫描电镜照片。

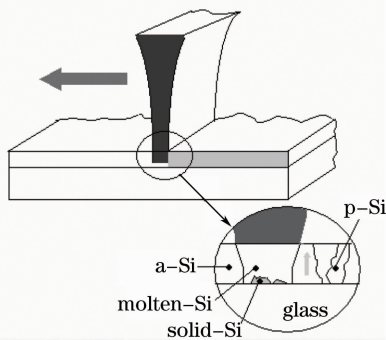


图 22 ELA 过程示意图  
Fig. 22 Schematic of ELA

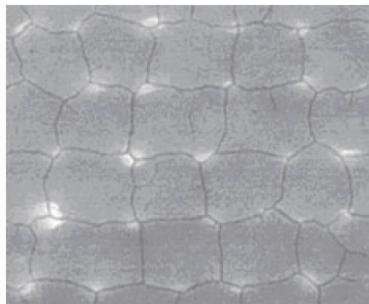


图 23 ELA 过程后的 p-Si 扫描电镜照片  
Fig. 23 SEM image of the crystallized p-Si

2003 年行业内开始采用连续侧面凝固技术 (Sequential lateral solidification, SLS)。这种技术中, 结晶的方向变为侧向, 而不是 ELA 中的垂直方向, 这被证明更加有利于结晶的尺寸和均匀性, 有利于提高显示的亮度和均匀性等<sup>[120,121]</sup>。示意图如

图 24, 25 所示<sup>[119]</sup>。

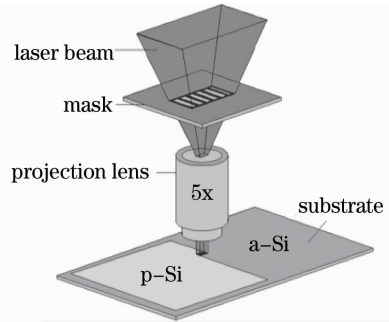


图 24 2-shot SLS 过程示意图  
Fig. 24 Schematic of 2-shot SLS

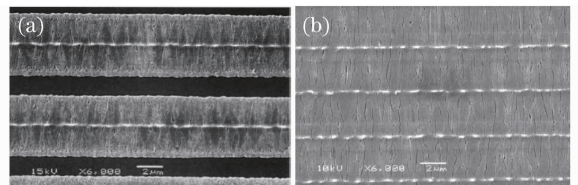


图 25 50 nm 厚 a-Si 经 SLS 过程后的晶化照片。  
(a) 第 1 个脉冲作用后; (b) 第 2 个脉冲后  
Fig. 25 2-shot SLS process on 50 nm thick a-Si layer.

(a) crystallization after the 1st shot; (b) final crystallization after the 2nd shot

目前用于低温硅退火的准分子激光器一般功率在 300~600 W。例如 Coherent 公司生产的 Lambda SX 315C 型 XeCl 准分子激光器输出单脉冲能量 1050 mJ, 重复频率 300 Hz<sup>[122]</sup>; Lambda SX 540C 型 XeCl 准分子激光器输出单脉冲能量 900 mJ, 重复频率 600 Hz<sup>[122]</sup>。Cymer 公司生产的 XLX 200 型 XeF 准分子激光器输出单脉冲能量 200 mJ, 重复频率 3000 Hz<sup>[123]</sup>。

### 5.3.2 高密度电路板制作

准分子激光干刻蚀方法特别适合于制作高密度电路板。利用大功率紫外激光的优良性能钻孔和产生多层电路印制导线图形, 避免了传统方法 (机械钻孔和照相腐蚀) 制作印刷电路板的缺点, 如步骤多 (7~8 个分离的步骤)、宽线宽 (约 100 μm 线宽图形)、费时、污染环境和危害健康等。

准分子激光干刻蚀方法制作印刷电路板一般采用大功率准分子激光器, 以 Coherent 公司的 Lambda SX 315C 型准分子激光器为例, 其单脉冲能量 1050 mJ, 重复频率 300 Hz。则单个激光脉冲可以成形 400 mm<sup>2</sup> 的电路, 面积覆盖速度达 1200 cm<sup>2</sup>/s。而当基板表面金属层约 40 nm 时, 一个脉冲即可以形成线宽 10 μm 的电路<sup>[122]</sup>。刻蚀过程如图 6 所示。

准分子激光干刻蚀法可以采用多种柔性基片制作柔性电路板,如聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚酰亚胺(polyimide)、聚萘二甲酸乙二醇酯(PEN)和聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、有机玻璃等,有利于电子器件的小型化和降低生产成本。

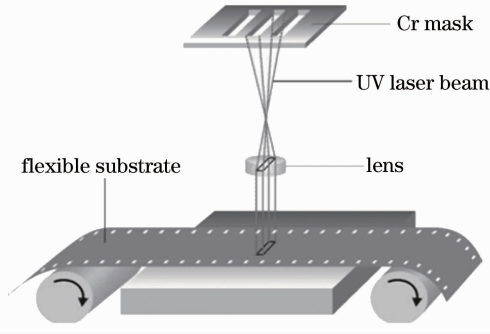


图 26 柔性基板集成电路刻蚀

Fig. 26 Schematic setup of excimer laser direct patterning of a flexible metal on polymer tape

### 5.3.3 布拉格光栅的制作

光纤布拉格光栅(FBG)是一种使用深紫外激光束直接写入法在单模光纤上刻有沿轴向折射率变化光栅的传感器件,主要用来检测拉力、形变和温度等,广泛地应用于公路、桥梁、化学和生物传感检测方面。

目前主要使用两种紫外光源——倍频 Ar 离子激光器和准分子激光器进行 FBG 的制作。准分子激光在采用谱线压窄、非稳腔和注入放大等方法后提高了相干性,较 Ar 离子激光器具有制作时间短(小于 1 min, Ar 离子激光约 20 min)、制作成本低的优点<sup>[123]</sup>,如图 27 所示。

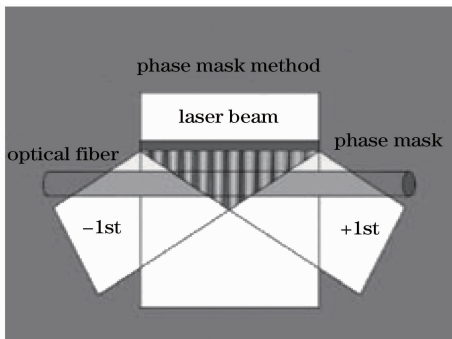


图 27 相位掩膜法制作 FBG 示意图

Fig. 27 Phase mask setup for inducing a permanent refractive index change in the fiber core

## 6 结束语

准分子激光诞生 40 年来,从研究走向应用,目前已经在工业、医疗、科研等领域发挥着不可替代的

作用,并且还在不断开辟出新的应用领域,准分子激光已成为激光家族中重要的一员。随着准分子激光本身技术的不断提高,新技术的引入、与固体激光技术的融合等,准分子激光将会得到更快的发展和更广泛的应用。

## 参 考 文 献

- 1 D. Basting, U. Stamm. The development of excimer laser technology-history and future prospects [J]. *International J. Research in Physical Chemistry & Chemical Physics*, 2001, **215**(15): 75~99
- 2 D. Basting, K. Pippert, U. Stamm. History and future prospects of excimer lasers[C]. *SPIE*, 2002, **4426**: 25~34
- 3 Lou Qihong, Xu Jie, Fu Shufen *et al.*. Pulsed Gas-Discharge Lasers [M]. Beijing: Science Press, 1993. 238~293  
楼祺洪,徐捷,傅淑芬等.脉冲放电气体激光器[M].北京:科学出版社,1993. 238~293
- 4 G. Overton, G. S. Anderson, A. D. Belforte *et al.*. Reviews and forecasts for 2009~2010 global laser market [J]. *Laser Focus World China*, 2010, (1): 8~14
- 5 Lou Qihong. Progress of excimer lasers and its applications [J]. *Chinese J. Lasers*, 1994, **A21**(5): 361~364  
楼祺洪.准分子激光器的发展和应用 [J]. *中国激光*, 1994, **A21**(5): 361~364
- 6 D. Basting, G. Marowsky. Excimer Laser Technology [M]. Germany Berlin: Springer, 2005. 41~103
- 7 C. K. Rhodes, C. A. Brau. Excimer Lasers [M]. New York: Springer-Verlag, 1984. 5~42
- 8 N. G. Basov, V. A. Danilychev, Y. M. Popov *et al.*. Laser operating in vacuum region of spectrum by excitation of liquid xenon with an electron beam [J]. *Jetp Letters-Ussr*, 1970, **12**(10): 329~331
- 9 H. A. Koehler, L. J. Ferderber, D. L. Redhead *et al.*. Stimulated emission in high-pressure xenon excited by high-current relativistic electron-beams [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **21**(5): 198~200
- 10 J. E. Velazco, D. W. Setser. Bound-free emission-spectra of diatomic xenon halides [J]. *J. Chem. Phys.*, 1975, **62**(5): 1990~1991
- 11 S. K. Searles, G. A. Hart. Stimulated emission at 281.8 nm from XeBr [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1975, **27**(4): 243~245
- 12 M. K. Makarov. Once upon a time: a hearty glance over the 30-year history of excimer lasers [C]. *SPIE*, 2005, **5777**: 542~547
- 13 Liu Jingru. Excimer Laser Technology and Application [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. 5~9  
刘晶儒.准分子激光技术及应用[M].北京:国防工业出版社,2009. 5~9
- 14 D. J. Elliott, U. K. Senguta. Excimer lasers for deep UV lithography [C]. *SPIE*, 1991, **1377**: 6~17
- 15 R. Sandstrom. Measurements of beam characteristics relevant to DUV microlithography on a KrF excimer laser [C]. *SPIE*, 1990, **1264**: 505~519
- 16 P. Lokai, U. Rebhan, P. Oesterlin *et al.*. High rep.-rate KrF lithography excimer laser with narrow bandwidth below 2 pm [C]. *SPIE*, 1990, **1264**: 496~504
- 17 R. Paetzel, J. Kleinschmidt, U. Rebhan *et al.*. KrF excimer laser with repetition rates of 1 kHz for DUV lithography [C]. *SPIE*, 1995, **2440**: 101~105
- 18 T. P. Duffey, T. J. Embree, T. Ishihara *et al.*. ArF lasers for production of semiconductor devices with CD 0.15 μm [C]. *SPIE*, 1998, **3334**: 1014~1020
- 19 H. Endert, R. Paetzel, U. Rebhan *et al.*. New KrF and ArF excimer lasers for advanced deep ultraviolet optical lithography

- [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1995, **34**(8A): 4050~4054
- 20 K. Midorikawa, M. Obara, T. Fujioka. X-ray preionization of rare-gas-halide lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1984, **QE-20**(3): 198~205
- 21 R. S. Taylor, A. J. Alcock, K. E. Leopold. Electrical and gain characteristics of a simple compact XeCl laser [J]. *Opt. Commun.*, 1979, **31**(2): 197~202
- 22 R. S. Taylor, A. J. Alcock, K. E. Leopold. Laser-induced preionization of a rare-gas halide discharge [J]. *Opt. Lett.*, 1980, **5**(6): 216~218
- 23 H. H. Klingenberg. Microwave excitation of excimer lasers [J]. *Laser and Optoelectronic*, 1990, **22**(4): 60~62
- 24 H. H. Klingenberg, F. Gekat. Investigation of microwave-pumped excimer and rare-gas laser transitions [C]. *SPIE*, 1991, **1412**: 103~114
- 25 H. H. Klingenberg, F. Gekat, G. Spindler. Microwave excitation of a XeCl laser without preionization [C]. *SPIE*, 1990, **1278**: 43~50
- 26 P. J. K. Wisoff, A. J. Mendelsohn, S. E. Harris *et al.*. Improved performance of the microwave-pumped XeCl laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **QE-18**(11): 1839~1840
- 27 V. N. Slinko, A. S. Sulakshin, S. S. Sulakshin. Efficient stimulated emission from a microwave-pumped XeCl laser [J]. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1988, **18**(2): 186~187
- 28 C. P. Christensen, C. Gordon III, C. Motoulas *et al.*. High-repetition-rate XeCl waveguide laser without gas flow [J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(3): 169~171
- 29 T. Hasama, K. Miyazaki, K. Yamada *et al.*. 50 J discharge-pumped XeCl laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25**(1): 113~120
- 30 Y. Saito, M. Inoue, S. Fujikawa *et al.*. Development of a 2-kW XeCl laser with a surface corona preionization scheme and a spiker-sustainer circuit [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1995, **1**(3): 811~824
- 31 Product catalog of coherent. www.coherent.com
- 32 J. W. Gerritsen, G. J. Ernst. High-pressure behavior of an X-ray preionized discharge pumped XeCl laser [J]. *Appl. Phys. B-Photophysics and Laser Chemistry*, 1988, **46**(2): 141~146
- 33 Chen Liang, Zhao Zhensheng, Gu Huaimin *et al.*. Design and application of modified Ernst's uniform-field electrode [J]. *Chinese J. Quantum Electron.*, 1997, **14**(4): 393~399
- 陈亮, 赵震声, 谷怀民等. 改进型恩斯特(ERNST)电极的设计与应用[J]. *量子电子学报*, 1997, **14**(4): 393~399
- 34 T. Y. Chang. Improved uniform-field electrode profiles for TEA laser and high-voltage applications [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1973, **44**(4): 405~407
- 35 E. A. Stappaerts. A novel analytical design method for discharge laser electrode profiles [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **40**(12): 1018~1019
- 36 G. J. Ernst. Uniform-field electrodes with minimum width [J]. *Opt. Commun.*, 1984, **49**(4): 275~277
- 37 S. Watanabe, M. Watanabe, A. Endoh *et al.*. High repetition long pulse XeCl laser with a coaxial ceramic pulse-forming line [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1986, **57**(12): 2970~2973
- 38 W. H. Long, M. J. Plummer, E. A. Stappaerts. Efficient discharge pumping of an XeCl laser using a high-voltage prepulse [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **43**(8): 735~737
- 39 K. Haruta, Y. Saito, M. Inoue *et al.*. High-efficiency 2 kW XeCl excimer laser [J]. *Appl. Phys. B*, 1999, **68**(4): 663~669
- 40 W. D. Gillespie, T. Ishihara, W. N. Partlo *et al.*. 6 kHz MOPA light source for 193 nm immersion lithography [C]. *SPIE*, 2005, **5754**: 1293~1303
- 41 P. C. Oh, V. Fleurov, T. Hofmann *et al.*. Production-ready 4 kHz ArF laser for 193 nm lithography [C]. *SPIE*, 2002, **4691** II: 1753~1760
- 42 M. H. Vonbergmann, L. P. Swart. Industrial excimer and CO<sub>2</sub> TEA lasers with kilowatt average output power [C]. *SPIE*, 1991, **1397**: 63~66
- 43 M. H. Vonbergmann, G. L. Bredekamp, P. H. Swart. High repetition rate high power excimer lasers [C]. *SPIE*, 1988, **1023**: 20~24
- 44 M. L. Sentis, B. L. Fontaine, B. M. Forestier. Wave Behaviour in a High Average Power Excimer Laser [M]. Stanford: Stanford University Press, 1986. 851~857
- 45 K. Kakizaki, T. Yabu, T. Hori *et al.*. Reduction of acoustic waves induced by discharge in high repetition rate ArF excimer laser cavity to obtain narrow-bandwidth laser light [J]. *Jap. J. Appl. Phys., Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers*, 2006, **45**(10A): 7719~7723
- 46 L. J. Denes, L. E. Kline. Electrode geometry and pre-ionizer geometry effects on TEA laser discharge formation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **30**(4): 197~199
- 47 J. I. Levatter, S. C. Lin. Necessary conditions for the homogeneous formation of pulsed avalanche discharges at high gas-pressures [J]. *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**(1): 210~222
- 48 J. Fieret. Aerodynamic aspects of a corona-preionised high repetition frequency excimer laser [C]. *SPIE*, 1990, **1225**: 122~130
- 49 D. Beaupere, B. Lacour, C. Gagnol *et al.*. High-efficiency corona photo triggered excimer lasers [C]. Publ. by IEEE, 1988. 64~65
- 50 W. N. Partlo, R. L. Sandstrom, I. V. Fomenkov *et al.*. Low cost of ownership KrF excimer laser using a novel pulse power and chamber configuration [C]. *SPIE*, 1995, **2440**: 90~100
- 51 You Libing, Liang Xu, Yu Yinshan. Design and experimental study of an excimer laser based on solid state pulsed power module [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 370~373
- 游利兵, 梁勳, 余吟山. 固体开关小能量准分子激光器的设计与实验研究 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 370~373
- 52 W. S. Melville. The use of saturable reactor as discharge devices for pulse generators [J]. *Proceedings Institute of Electrical Engineers*, 1951, **98**(3): 185~205
- 53 I. Smilanski, S. R. Byron, T. R. Burkes. Electrical excitation of a XeCl laser using magnetic pulse-compression [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **40**(7): 547~548
- 54 H. Tanaka, M. Obara. An all solid-state magnetic pulse compressor with amorphous metals for pumping a repetition-rated KrF excimer laser [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1990, **61**(4): 1196~1199
- 55 T. Shimada, M. Obara, A. Noguchi. An all solid-state magnetic switching exciter for pumping excimer lasers [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1985, **56**(11): 2018~2020
- 56 H. Hatanaka, M. Obara. High-efficiency operation of the high-repetition-rate all-solid-state magnetic pulse compressor for KrF excimer lasers [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1991, **2**(1): 42~48
- 57 V. Fleurov, S. Rokitski, R. Bergstedt *et al.*. XLR 600i: recirculating ring ArF light source for double patterning immersion lithography [C]. *SPIE*, 2008, **6924**: 69241R
- 58 S. Rokitski, V. Fleurov, R. Bergstedt *et al.*. Enabling high volume manufacturing of double patterning immersion lithography with the XLR 600ix ArF light source [C]. *SPIE*, 2009, **7274**: 72743O
- 59 H. Tsushima, M. Yoshino, T. Ohta *et al.*. Reliability report of high power injection lock laser light source for double exposure and double patterning ArF immersion lithography [C]. *SPIE*, 2009, **7274**: 72743L
- 60 K. Wakana, H. Tsushima, S. Matsumoto *et al.*. Optical performance of laser light source for ArF immersion double patterning lithography tool [C]. *SPIE*, 2009, **7274**: 72743J



- 61 T. Saito, S. Ito, A. Tada. Long lifetime operation of an ArF-excimer laser [J]. *Appl. Phys. B: Lasers and Optics*, 1996, **63**(3): 229~235
- 62 Fang Xiaodong, Dai Jinghua. Experimental study on gas lifetime of XeCl excimer laser [J]. *Laser Technology*, 1996, **20**(1): 50~52  
方晓东, 戴静华. 实用化 XeCl 准分子激光器气体寿命的实验研究[J]. *激光技术*, 1996, **20**(1): 50~52
- 63 S. Ito, T. Saito, A. Tada. A new gas purifier for ArF excimer lasers [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1996, **67**(3): 658~661
- 64 Robert E. Turner, John L. Remo, Vinod Kumar. Dependence of excimer laser beam properties on laser gas composition [C]. *SPIE*, 1993, **1835**: 158~164
- 65 A. D. Boardman, E. M. Hodgson, M. B. Richardson *et al.*. Automated control of industrial-scale excimer lasers [C]. *SPIE*, 1994, **2206**: 163
- 66 S. Ogura, Y. Kawakubo, K. Sasaki *et al.*. Output power stabilization of a XeCl excimer laser by HCl gas injection [C]. *SPIE*, 1991, **1412**: 123~128
- 67 O. P. Uteza, M. L. Sentis, P. C. Delaporte *et al.*. Laser-beam quality of high pulse repetition frequency excimer lasers [J]. *Opt. Commun.*, 1993, **102**(5-6): 523~531
- 68 K. Ohta, T. Yagi, H. Saito *et al.*. Beam quality measurement of a narrow-band KrF excimer laser with stimulated Brillouin-scattering phase conjugate double-pass amplifier at 100 Hz operation [J]. *J. Appl. Phys.*, 1991, **69**(11): 7440~7443
- 69 G. Klauminzer. Oscillator-amplifier approach in excimer lasers [J]. *Lasers and Applications*, 1986, **5**(9): 75~78
- 70 H. Chu, D. H. Kim, Y. M. Jhon *et al.*. Injection locking of a modified-unstable-resonator XeCl laser by using a line-narrowed hemiconfocal oscillator [J]. *Jpn. J. Appl. Phys. Part 1-Regular Papers Short Notes & Review Papers*, 1994, **33**(8): 4617~4621
- 71 Lou Qihong, Huo Yunsheng, Dong Jingxing *et al.*. Lifetime study of a transverse flow excimer laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1987, **7**(6): 481~485  
楼祺洪, 霍芸生, 董景星等. 横流准分子激光器的寿命研究[J]. *光学学报*, 1987, **7**(6): 481~485
- 72 Ye Zhenhuan, Lou Qihong, Li Hongxia *et al.*. Beam homogenizing technology for UV excimer laser [J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(2): 207~212  
叶震寰, 楼祺洪, 李红霞等. 准分子激光光束均匀技术[J]. *激光技术*, 2005, **29**(2): 207~212
- 73 D. J. W. Brown, P. O'keeffe, V. B. Fleurov *et al.*. XLR 500i; recirculating ring ArF light source for immersion lithography [C]. *SPIE*, 2007, **6520**: 652020
- 74 T. J. Mckee. Spectral-narrowing techniques for excimer laser-oscillators [J]. *Can. J. Phys.*, 1985, **63**(2): 214~219
- 75 Zhang Haibo, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. ArF excimer laser line narrowing technique [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(12): 46~51  
张海波, 楼祺洪, 周军等. ArF 准分子激光器线宽压缩技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(12): 46~51
- 76 Li Hongxia, Lou Qihong, Dong Jingxing *et al.*. Research on spectral-narrowing of excimer lasers [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2004, **2**(4): 44~47  
李红霞, 楼祺洪, 董景星等. 准分子激光光线宽压缩方法的研究[J]. *光学与光电技术*, 2004, **2**(4): 44~47
- 77 M. Sugii, M. Ando, K. Sasaki. Simple long-pulse XeCl laser with narrow-line output [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987, **QE-23**(9): 1458~1460
- 78 R. S. Taylor, K. E. Leopold. Ultralong optical-pulse corona preionized XeCl laser [J]. *J. Appl. Phys.*, 1989, **QE-65**(1): 22~29
- 79 O. Wakabayashi, T. Ariga, T. Kumazaki *et al.*. Beam quality of a new-type MOPO laser system for VUV laser lithography [C]. *SPIE*, 2004, **5377**: 1772~1780
- 80 Tang Xiuzhang, Wang Xiaojun, Yao Gang. Pulse compression of KrF laser stimulated Brillouin scattering [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 1997, **31**(2): 161~167  
汤秀章, 王孝君, 姚刚. KrF 激光受激布里渊散射脉宽压缩的研究[J]. *原子能科学技术*, 1997, **31**(2): 161~167
- 81 Wang Shuangyi, Lü Zhiwei, Lin Dianyong *et al.*. KrF laser pulse shaping by pulse stacking [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(11): 1669~1673  
王双义, 吕志伟, 林殿阳等. KrF 激光脉冲整形研究[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(11): 1669~1673
- 82 Li Hongxia, Lou Qihong, Dong Jingxing *et al.*. Excimer laser plasma switch controlling laser pulse duration [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(7): 1090~1094  
李红霞, 楼祺洪, 董景星等. 准分子激光等离子体开关控制脉宽研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(7): 1090~1094
- 83 S. Backus, C. G. Durfee, M. M. Murnane *et al.*. High power ultrafast lasers [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1998, **69**(3): 1207~1223
- 84 Y. Nabekawa, K. Kondo, N. Sarukura *et al.*. Terawatt KrF/Ti-sapphire hybrid laser system [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(22): 1922~1924
- 85 Yu Yinshan, Fang Xiaodong, Li Hui *et al.*. Discharge-pumped 100 W XeCl excimer laser [J]. *Chinese J. Quantum Electron.*, 1993, **13**(4): 329~331  
余吟山, 方晓东, 李会等. 放电激励的 100W XeCl 准分子激光器[J]. *量子电子学报*, 1993, **13**(4): 329~331
- 86 Yu Yinshan, Fang Xiaodong, Zhou Weidong. Experimental study on a discharging-switch system of a high-power XeCl excimer laser [J]. *Chinese J. Quantum Electron.*, 1997, **14**(1): 48~51  
余吟山, 方晓东, 周卫东. 大功率 XeCl 准分子激光器放电开关的实验研究[J]. *量子电子学报*, 1997, **14**(1): 48~51
- 87 I. Smilanski, S. R. Byron, T. R. Burkes. Electrical excitation of an XeCl laser using magnetic pulse compression [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **40**: 547
- 88 You Libing, Liang Xu, Huang Dewen *et al.*. Design of a switching power supply for high repetition excimer laser [J]. *Laser Journal*, 2009, **30**(3): 15~16  
游利兵, 梁勳, 黄德文等. 高重复率小型准分子激光开关电源设计[J]. *激光杂志*, 2009, **30**(3): 15~16
- 89 Liang Xu, You Libing, Wang Tao *et al.*. Excimer pulse energy stabilization realized by charging voltage realtime adjusting [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 374~378  
梁勳, 游利兵, 王涛等. 实时调节工作电压实现稳定准分子脉冲能量[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 374~378
- 90 Manlio Matera, Roberto Buffa, Giuliano Conforti *et al.*. Resonant transformer command charging system for high repetition rate rare-gas halide lasers [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1983, **54**(6): 716~718
- 91 Huang Dewen, You Libing, Liang Xu *et al.*. Research on pulse charging excimer laser power supply [J]. *Chinese J. Quantum Electron.*, 2009, **26**(1): 39~43  
黄德文, 游利兵, 梁勳等. 脉冲升压式准分子激光电源研究[J]. *量子电子学报*, 2009, **26**(1): 39~43
- 92 You Libing, Liang Xu, Yu Yinshan. Design and experimental study of all solid state pulse power module for excimer lasers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(11): 1750~1754  
游利兵, 梁勳, 余吟山. 准分子激光全固态脉冲电源设计与实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(11): 1750~1754
- 93 E. C. Piscani, D. Ashworth, J. Byers *et al.*. Continuing 193 nm optical lithography for 32 nm imaging and beyond [C]. *SPIE*, 2008, **6924**: 692421

- 94 T. Ishihara, H. Besaucele, C. Maley *et al.*. Long-term reliable operation of a MOPA-based ArF light source for microlithography [C]. *SPIE*, 2004, **5377**: 1858~1865
- 95 T. Kumazaki, T. Suzuki, S. Tanaka *et al.*. Reliable high power injection locked 6 kHz 60 W laser for ArF immersion lithography [C]. *SPIE*, 2008, **6924**: 69242S
- 96 M. Yoshino, H. Nakarai, T. Ohta *et al.*. High-power and high-energy stability injection lock laser light source for double exposure or double patterning ArF immersion lithography [C]. *SPIE*, 2008, **6924**: 69242R
- 97 K. Huggins, T. Tsuyoshi, M. Ong *et al.*. Effects of laser bandwidth on OPE in a modern lithography tool [C]. *SPIE*, 2006, **6154**: 61540Z
- 98 B. Y. Hsuch, H. Y. Wu, L. Jang *et al.*. Effects of laser bandwidth on tool to tool CD matching [C]. *SPIE*, 2008, **6924**: 69244K
- 99 K. O'Brien, W. J. Dunstan, D. Riggs *et al.*. Performance demonstration of significant availability improvement in lithography light sources using GLX control system [C]. *SPIE*, 2008, **6924**: 69242Q
- 100 Julie Grondin. Small excimers shine in scientific applications [J]. *Laser Focus World*, 2004, **40**(11): 112~115
- 101 J. Bublitz, A. Christophersen, W. Schadel. Laser-based detection of PAHs and BTXE-aromatics in oil polluted soil samples [J]. *Fresenius J. Analytical Chemistry*, 1996, **355**(5-6): 684~686
- 102 T. J. Grundl, J. H. Aldstadt, J. G. Harb. Demonstration of a method for the direct determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in submerged sediments [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 2003, **37**(6): 1189~1197
- 103 Dakota Technologies, Inc. <http://www.dakotatechnologies.com/>
- 104 D. S. Thomsona, M. E. Scheina, D. M. Murphy. Particle analysis by laser mass spectrometry WB-57F instrument overview[J]. *Aerosol Science and Technology*, 2000, **33**(1-2): 153~169
- 105 Gu Xuejun, Fang Li, Zheng Haiyang *et al.*. Development and applications of mobile laser mass spectrometer [J]. *Chinese J. Analytical Chemistry*, 2005, **33**(2): 282~285  
顾学军, 方黎, 郑海洋等. 可移动激光质谱仪的研制与应用 [J]. *分析化学*, 2005, **33**(2): 282~285
- 106 Hu Huanling, Wang Zhi'en, Wu Yonghua *et al.*. UV-DIAL system for measurements of stratospheric ozone [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1998, **22**(5): 701~708  
胡欢陵, 王志恩, 吴永华等. 紫外差分吸收激光雷达测量平流层臭氧[J]. *大气科学*, 1998, **22**(5): 701~708
- 107 D. Dijkkamp, T. Venkatesan, X. D. Wu *et al.*. Preparation of Y-Ba-Cu oxide superconductor thin films using pulsed laser evaporation from high Tc bulk material [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**(8): 619~621
- 108 J. J. Dubowski, D. F. Williams, P. B. Sewell *et al.*. Epitaxial growth of (100) CdTe on (100) GaAs induced by pulsed laser evaporation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **46**(11): 1081~1083
- 109 D. K. Fork, D. B. Fenner, G. A. N. Connel *et al.*. Epitaxial yttria-stabilized zirconia on hydrogen-terminated Si by pulsed laser deposition [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **57**(11): 1137~1139
- 110 J. S. Horwitz, K. S. Grabowski, D. B. Chrisey *et al.*. In situ deposition of epitaxial PbZr<sub>x</sub>Ti<sub>(1-x)</sub>O<sub>3</sub> thin films by pulsed laser deposition [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**(13): 1565~1567
- 111 Xiaodong Fang, Minoru Tachiki, Takeshi Kobayashi. Excimer-laser ablation of RuO<sub>2</sub> observed by a streak camera [J]. *J. Appl. Phys.*, 1999, **85**(4): 2402~2407
- 112 S. L. Trokel, R. Srinivasan, B. Braren. Excimer laser surgery of the cornea [J]. *Am. J. Ophthalmol.*, 1983, **96**(6): 710~715
- 113 Jiang Haihe, Yu Yinshan, Lu Zhixian *et al.*. The principle and controlling method of excimer laser photorefractive keratectomy [J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 1998, **7**(4): 249~253  
江海河, 余吟山, 陆志贤等. 近视眼激光角膜切除术原理及控制方法[J]. *激光生物学报*, 1998, **7**(4): 249~253
- 114 Dirx Basting, Gerd Marowsky. Excimer Laser Technology [M]. Santa: Lambda Physik, 2001
- 115 R. Rox Anderson, John A. Parrish. The optics of human skin [J]. *J. Investigative Dermatology*, 1981, **77**(1): 13~19
- 116 Pravit Asawanonda, R. Rox Anderson, Yuchiao Chang *et al.*. 308-nm excimer laser for the treatment of psoriasis: a dose-response study [J]. *Arch Dermatol.*, 2000, **136**(5): 619~624
- 117 Li Hongxin, Gao Tianwen. Application of 308 nm excimer laser in the treatment of vitiligo [J]. *Chin. J. Derm. Venereol.*, 2006, **20**(8): 507~509  
李泓馨, 高天文. 308 nm 准分子激光治疗白癜风进展[J]. *中国皮肤性病学杂志*, 2006, **20**(8): 507~509
- 118 Yang Huilan, Liu Zhongrong, Li Xuemei *et al.*. Treatment of vitiligo with the 308-nm excimer laser: a clinical study [J]. *Chin. J. Dermatol.*, 2006, **39**(1): 35~37  
杨慧兰, 刘仲荣, 李雪梅等. 308 nm 准分子激光治疗白癜风临床研究[J]. *中华皮肤科杂志*, 2006, **39**(1): 35~37
- 119 Advanced laser processing enables next generation LED and LCD Manufacturing. Coherent Inc., [www.coherent.com](http://www.coherent.com)
- 120 J. S. Im, R. S. Sposili, M. A. Crowder. Single-crystal Si films for thin-film transistor devices [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(25): 3434~3436
- 121 J. S. Im, M. A. Crowder, R. S. Sposili *et al.*. Controlled super-lateral growth of Si films for microstructural manipulation and optimization[J]. *Physica Status Solidi(a)*, 1999, **166**(2): 603~617
- 122 Coherent Inc., [www.coherent.com](http://www.coherent.com)
- 123 XLX200, The Next Generation Light Source For LTPS Manufacturing. Cymer Inc., 2007. [www.cymer.com](http://www.cymer.com)