

# 准分子激光近年应用的进展

刘大明 刘祖黎 李再光

(华中理工大学, 武汉 430074)

本文简述了准分子激光的发展历史、原理、现状及展望, 介绍了准分子激光在染料激光、光谱学、光刻、薄膜沉积、表面处理、精密机械加工及医学领域的几种主要应用。

在 1961 年第一台气体激光器诞生不久, 一种涉及分子电子跃迁的新型激光器就问世了。与常规分子激光体系仅涉及电子基态内的振动跃迁不同, 这类新型激光的辐射跃迁涉及分子的电子激发态。这类新型的激光器包括束缚-束缚体系的氮分子激光器 (1963 年) 与氢分子激光器 (1972 年)、束缚-自由体系的稀有气体及其混合物激光器 (1972 年) 和稀有气体卤化物激光器 (1975 年) 等。人们通常所指的准分子激光是指具有重要应用前景和发展迅速的稀有气体卤化物激光。

1974 年在圣路易斯召开的化学激光会议上, 堪萨斯州的 D. Seter 教授报告了用 Xe 的亚稳态和卤素反应, 得到 XeCl 分子光谱的研究结果。在此启发下, 阿符科公司的 J. J. Ewing 及其同事和美国海军实验室的 Stu Seales 等人几乎同时开始了对稀有气体卤化物的研究, 并在 1975 年获得了一系列的激光输出。在 1975 年的 CLEO 会议上, Stu 做了有关 XeBr 激光的报告, 紧接着 J. J. Ewing 做了有关 KrF, XeF 和 XeCl 激光的报告。从此很多人加入了这方面研究的行列, 准分子激光开始了迅速发展的阶段, 并逐步从实验室转向商业开发, 在众多领域得到广泛的应用。

## 一、原理

由于稀有气体原子和卤素原子之间的相互作用很弱, 不能形成分子, 即使形成分子, 热运动的能量也会使之离解。但是, 当它们处于激发态时, 会出现较强的相互作用。图 1 为相互作用势随核间距变化的曲线, 可见基态时势阱很

浅, 而激发态则可形成分子 (寿命约为  $10^{-8}$ — $10^{-7}$ s)。由于分子态的下能级是自由态或接近自由态, 故很容易得到高的粒子数反转, 形成激光振荡。表 1 为稀有气体卤化物辐射的情况, 可见辐射均位于紫外波段。

准分子激光器通常采用放电泵浦的方式, 一般在主放电前一最佳时刻需进行预电离。目前采用的有电子束预电离、紫外线预电离和 X 光预电离三种方式。由于分子态的寿命很短,

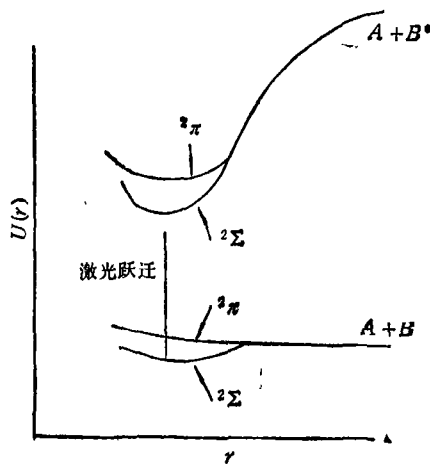


图 1 稀有气体卤化物相互作用势随核间距的变化

表 1 稀有气体卤化物辐射

	He	Ne	Ar	Kr	Xe
F	×	荧光	激光 (193nm)	激光 (248nm)	激光 (351nm)
Cl	×	×	荧光	激光 (222nm)	激光 (308nm)
Br	×	×	×	荧光	激光 (281.8nm)
I	×	×	×	×	荧光

准分子激光器都在脉冲状态下工作。通过电源的设计(如采用磁压缩方法),还可进一步压缩脉宽,得到很高的峰值功率输出。

## 二、现状及展望

目前商用准分子激光器的平均功率为200W以下。200W以上的高功率激光器已在实验室出现,如德国 Lambda Physik 公司采用紫外光预电离的准分子激光已达500W输出。今后将向更高的kW级平均功率努力。承担日本通产省“超尖端加工系统”中大功率XeCl准分子激光器研制任务的三菱电机公司的1993年最终目标是平均输出功率2kW。要提高平均功率,就必须提高注入能量,为此要采用多个闸流管并联的技术。此外,高的功率也要求更好的预电离源。研究表明,采用X光预电离的准分子激光器的性能更优。华中理工大学激光重点实验室承担的国家自然科学基金项目“百瓦级准分子激光器的研制”就采用X光预电离技术。

不管是从提高平均功率考虑,还是从工业应用角度考虑,都要求高的重复频率。目前商用激光器的最高重复频率一般为几十到几百Hz。德国 Lambda Physik 公司(占有目前世界销售市场的70%左右)生产的EMG201MSC准分子激光器的最高重复频率为80Hz,EMG104MSC准分子激光器的最高重复频率为500Hz。今后将向kHz级的目标努力。为此,激光介质的流速将大大提高,要求更高速的气流及风机系统。

脉冲宽度是准分子激光器的又一重要参数。目前商用一般为几到几十个ns,但不同的应用场合要求不同的脉宽。例如光刻时,在ns级脉冲作用下为透明的透紫外介质,在fs级脉冲作用下却可以被刻蚀掉。目前实验室的研究在长脉冲(如加拿大 Lumonics 公司报道的200ns,每个脉冲能量为1J<sup>[1]</sup>)和超短脉冲(如压缩到150fs,每个脉冲能量为45mJ<sup>[2]</sup>)两方面都有进展。

稳定工作时间是应用器件的一个重要指  
物理

标。目前寿命特性较好的XeCl准分子激光器在每天使用脉冲数为 $10^5$ — $10^7$ 的条件下,平均无故障时间小于一个月<sup>[3]</sup>。主要修理包括电容器和光学元件的更换以及触发器、电源、风机等部分的修理,从我们使用的情况来看,工作于正压状态(几个大气压)的准分子激光器的微孔检漏也是一项较棘手的工作。今后在激光器的性能改善方面仍有大量工作要做。

除双原子准分子激光以外,三原子准分子激光的研究也早已有报道,如电子束泵浦的Kr<sub>2</sub>F准分子激光气体温度对辐射影响的研究<sup>[4]</sup>等。

国内有关研究机构和大专院校,在准分子激光的辐射理论<sup>[5]</sup>和激光器的研制<sup>[6]</sup>等方面也已进行了大量的工作。

## 三、应用

由于稀有气体卤化物准分子激光位于紫外波段,光子能量高,而且峰值功率高,已在众多领域得到应用。下面就几个主要方面作简略介绍。

### 1. 泵浦染料激光

准分子激光的峰值功率高,光子能量也高,可用作很好的染料激光泵浦源。用准分子激光泵浦染料激光器,可得到从近紫外到红外连续可调的激光输出,且能量转换效率高。例如,308nm XeCl准分子激光泵浦LDS925在907—1023nm红外输出时,最大能量转换效率为8.3%<sup>[7]</sup>。

### 2. 光谱学研究

利用准分子激光光子的高能量,在光谱学研究中可用作荧光测量的诱导源和受激拉曼散射的光源。例如,用准分子激光诱导荧光方法得到内燃机气缸内燃烧气体的分子振动谱<sup>[8]</sup>,对燃烧气体的组分和状态进行分析。准分子激光激励的拉曼散射光谱研究也广泛用于材料分析,光纤研究,药品检测,以及药物与细胞作用的研究。

### 3. 光刻

光刻是集成电路制造中最关键的工艺之

一。激光光刻分为掩膜光刻和无掩膜光刻两种方式<sup>[9,10]</sup>。掩膜光刻是用激光作曝光光源。无掩膜光刻又分为激光辅助光刻和激光直接书写两种方式。前者是用激光照射处于蚀刻气氛中的基片,激光起诱导化学反应的作用;后者是70年代末期才出现的、特别适于紫外激光的新方法,即用聚焦很细的激光束将被照射部分直接汽化,通过计算机控制基片移动直接形成蚀刻图形。利用准分子激光波长短和衍射效应弱的特点,实验室内掩膜光刻和无掩膜光刻均已达到亚微米的精度。目前日本和美国等国家正在进行64Mbit DRAM的激烈竞争。

#### 4. 激光 CVD

准分子激光的紫外光子可以直接打断气体分子的化学键,由光化学作用进行汽相沉积,以便于在较低的沉积温度下得到优质的薄膜。准分子激光的高峰值功率有利用大面积CVD,同时也适于图形的直接沉积。直接沉积又分为投影式图形沉积<sup>[11]</sup>和直接书写<sup>[12]</sup>两种,后者主要用于集成电路的内部互联及修复等。

#### 5. 激光 PVD

利用准分子激光轰击靶材,可以在与靶平行放置的基片上得到优质的薄膜。该方法的优点是成膜温度低、成膜速度快、膜的致密性好和膜的成分易于控制。成功的例子如Y-Ba-Cu-O超导薄膜的沉积和无定形碳薄膜的沉积<sup>[13]</sup>。华中理工大学激光重点实验室用XeCl准分子激光轰击超导靶材,在低于500K的基片温度下一次原位得到超导薄膜,转变温度为92K,最大电流密度不小于 $10^5\text{A}/\text{cm}^2$ 。近期有些实验<sup>[14]</sup>还在粒子飞行路径上加辅助放电,以进一步提高沉积速度,改善成膜质量。

#### 6. 材料表面处理

由于固体材料对紫外光子的吸收系数较大,准分子激光非常有利于材料的表面处理。例如,利用CH<sub>4</sub>环境中准分子激光的辐照对GaAs进行碳掺杂形成P型片料<sup>[15]</sup>,用ArF准分子激光辐照非晶硅薄膜进行重结晶<sup>[16]</sup>,以及用准分子激光辐照单晶硅进行低温氧化等。这方面的工作目前国内还未见报道。

#### 7. 超精密机械加工

用短波长的准分子激光进行机械加工,可得到比目前广泛采用的CO<sub>2</sub>激光加工机(波长 $10.6\mu\text{m}$ )高得多的加工精度,并且由于热效应小,不会对周围的组织引入热缺陷等影响,目前已用于材料打孔和划片,如Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的高速精密打孔<sup>[17]</sup>等。日本通产省的“超尖端加工计划”投资150亿日元,就是开发以离子束加工和准分子激光加工为主的超高精度加工设备和加工技术。预计今后有重大的发展前景。

#### 8. 医学

紫外光子与细胞组织的相互作用是热效应还是光效应起主要作用,到目前为止还无定论。然而,相互作用的动力学机理正在逐步研究之中,准分子激光已成功用于眼角膜切割手术<sup>[18]</sup>,每个脉冲的烧蚀速度约为 $0.1-1\mu\text{m}$ 。由于热效应小,切割边缘热损失比YAG激光明显减小。此外,准分子激光还被研究用来进行眼角膜整形和烧蚀人体动脉脂肪和钙斑阻塞等。

#### 9. 同位素分离<sup>[19]</sup>

同位素分离和浓缩是准分子激光的又一重要应用。激光同位素分离具有成本低和效率高的特点,其原理是利用原子能级的同位素移动进行选择激发,然后用其它物理或化学的方法将激发态的原子分离出来。由于激光分离同位素要求激光具有足够好的单色性和可调谐性,采取压带措施的准分子激光和准分子激光泵浦的染料激光都是理想的光源。

准分子激光的实际应用领域比以上介绍的更为广泛。目前,紫外光子与固体、液体和气体相互作用的动力学机理尚待深入研究。今后须在研制高性能实用化激光器、开发应用技术和弄清准分子激光与物质相互作用的机理三个方面同时努力。

[1] Jerrence J. Mckee et al., *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1-3(1989), 59.

[2] S. Szatmari et al., *Appl. Phys. B*, 49-3 (1989), 239.

[3] 楼祺洪, *国外激光*, No. 2(1990), 6.

[4] 郭振华等, *光学学报*, 4-10(1984), 900.

(下转第37页)