

XeF 激光器中 XeF₂ 气体的监测

赖富相

张永生

(昆明技术物理研究所, 昆明, 650223)

(西北核技术研究所, 西安, 710024)

摘要: 给出了一种用吸收光谱法实时监测 XeF 激光器中 XeF₂ 气体压强的方法, 标定了 XeF₂ 气体在波长为 253.7nm 处的吸收截面的大小 $\sigma_{253.7}^{\text{XeF}_2} = (1.55 \pm 0.05) \times 10^{-19} \text{cm}^2$ 。用该监测系统测量了 XeF₂ 气体与 3 种作为激光器气室材料的反应速率, 同时研究了 XeF 蓝绿激光器中输出激光能量与 XeF₂ 气体压强的关系。

关键词: XeF₂ 吸收截面 准分子激光

XeF₂ measurement in XeF laser

Lai Fuxiang

Zhang Yongsheng

(Kunming Institute of Physics, Kunming, 650223)

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, 710024)

Abstract: A method of non-contact and real-time measurement for XeF₂ pressure in the XeF laser cell is provided in this paper. The absorption cross section of XeF₂ at wavelength of 253.7nm $\sigma_{253.7}^{\text{XeF}_2} = (1.55 \pm 0.05) \times 10^{-19} \text{cm}^2$ is obtained. Using the same measurement system, the suitable laser tube materials is choosed and the relations between laser output energy and the pressure of XeF₂ are presented.

Key words: XeF₂ absorption cross section excimer

引 言

真空紫外光解离 XeF₂ 气体是获得高能可调谐蓝绿和紫外激光的重要方法。由于对潜通信和 underwater 照明的需要, 美国、俄罗斯、法国等对这种激光器进行了深入的研究。其中俄罗斯水平最高, 获得了最大 117J 的蓝绿激光^[1]。我们在目前的实验装置上已经获得 200mJ 左右的蓝绿激光脉冲, 输出波长 475~490nm。XeF₂ 气体是这种激光器的最基本工作物质, 化学活性很强, 能迅速损坏真空计的接触探头并且同激光器气室材料的表面发生反应, 所以, 实时监测 XeF₂ 气体以及选择化学稳定性好的材料作为激光器气室, 对正常工作和获得最大能量输出至关重要。我们利用吸收光谱法对 XeF₂ 气体与 3 种不同激光器气室上的材料进行了测量, 监测到 XeF₂ 气体的不同反应速率, 为选择合适的激光器气室材料提供了关键的依据。最后通过

4 简 莉. 军用 CO₂ 激光系统. 北京: 机电部兵器科学技术情报所, 1989: 77~87

5 王 本, 沈树群. 激光扫描和光盘技术. 北京: 北京邮电学院出版社, 1990: 91~127

6 Strack C M. Sensors, 1996; 13(7): 18~20

7 成向阳, 王海虹, 李 宁. 激光与红外, 2000; 30(4): 211~213

作者简介: 成向阳, 女, 1971 年 11 月出生。硕士, 讲师。现主要从事激光技术等方面的研究工作。

实验获得了 XeF 蓝绿激光器中 XeF₂ 气体压强范围及其对输出激光能量的影响。

1 吸收光谱法测量 XeF₂ 气体压强原理

XeF₂ 是一种易升华的无色透明晶体, 它的饱和蒸气压随温度升高而迅速增加, 具体计算式为: $\log P = - 3057.67/T - 1.23521\log T + 16.09456615$ [P] = Pa [T] = K (1)

在室温至 100℃ 的范围内, XeF₂ 气体的热分解可以忽略不计。XeF₂ 气体对 145nm~220nm 的真空紫外光有强烈的吸收, 吸收峰值波长在 158nm 左右, 这个波段的真空紫外光使 XeF₂ 气体发生光解离, 因所加谐振腔的不同而产生蓝绿或紫外激光输出^[2]。在 220nm~280nm 的紫外波段, XeF₂ 气体的吸收很弱, 此时被吸收的光子不能将 XeF₂ 气体解离。故我们

利用波长为 253.7nm 的汞的特征发射谱线来测量 XeF₂ 气体的压强, 另外的一个重要原因是缓冲气体氮气和氩气对该波长的紫外光不吸收。光谱吸收法监测 XeF₂ 气体的压强是根据朗伯定律来实现的。一定波长 λ 的光通过 XeF₂ 气体时, 由于吸收而使它的辐射通量发生变化, 则有:

$$d\varphi(\lambda, x, n)/\varphi(\lambda, x, n) = - a(\lambda, n)dx = - \sigma(\lambda) n dx \tag{2}$$

式中, $a(\lambda, n) = \sigma(\lambda) n$ 是 XeF₂ 气体对波长为 λ 的光的线性吸收系数, $\sigma(\lambda)$ 是 XeF₂ 气体的吸收截面, n 是单位体积 XeF₂ 气体的分子数目。吸收系数正比于单位程长上所遇到的 XeF₂ 气体分子数目, 因而正比于 XeF₂ 气体的浓度, 从而根据线性吸收系数就可以确定 XeF₂ 气体的浓度, 进一步换算得到压强。这就是吸收光谱法监测 XeF₂ 气体压强的原理。将(2)式积分得:

$$\varphi(\lambda, x, n) = \varphi(\lambda, 0, 0) e^{-\sigma(\lambda) n x} \tag{3}$$

从上式可以看出, 如果样品池长度 x 不变, 则波长为 λ 的光辐射通量的变化仅与 XeF₂ 气体的浓度有关。光辐射通量的变化最后要通过探测器转换为电信号表示出来, 假设探测器工作在线性条件下且输出为电压信号 V , 对于一定的辐射通量, 探测器输出的电压信号幅值也是一定的, 即:

$$\varphi(\lambda, x, n) = \varphi(\lambda, 0, 0) e^{-\sigma(\lambda) n x} = KV(n) \tag{4}$$

K 为标定常数。为求出浓度 n , 用浓度 $n=0$ 时的表达式与上式相比,

$$\frac{\varphi(\lambda, x, 0)}{\varphi(\lambda, x, n)} = \frac{\varphi(\lambda, 0, 0) e^{-\sigma(\lambda) \cdot 0 \cdot x}}{\varphi(\lambda, 0, 0) e^{-\sigma(\lambda) \cdot n \cdot x}} = e^{\sigma(\lambda) n x} = \frac{KV(0)}{KV(n)} = \gamma \tag{5}$$

γ 是探测器在两种状态下输出电压的比值。这样就有: $n = \ln \gamma / \sigma(\lambda) x$ (6)

$$P = nkT = kT \ln \gamma / \sigma(\lambda) x = kT \ln [V(0) / V(n)] / \sigma(\lambda) x \tag{7}$$

k 是玻耳兹曼常数, T 是绝对温度。这里, x 和 T 是可以测量的常量, γ 可以从示波器或者采集数据的计算机上直接读出。如果知道 XeF₂ 气体对波长为 λ 的光的吸收截面 $\sigma_{\lambda}^{XeF_2}$, 就能够方便地计算出压强。

2 实验装置和吸收截面 $\sigma_{253.7}^{XeF_2}$ 的测量

选择汞空心阴极灯作为光源。汞空心阴极灯具有特征发射谱线单一、强度高、稳定、线宽窄和近似为平行光源等独特优点。其发射光谱如图 1。

接收的探测器使用了侧窗型 GDB152 光电倍增管, 这种光电倍增管具有工作电压低、对日光不敏感、抗过载能力强和体积小等优点, 特别适合在我们的实验条件下使用。其光谱响应曲

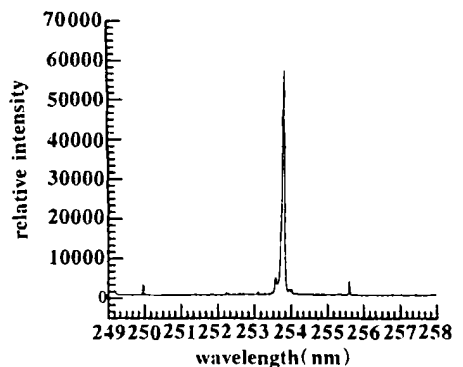


Fig. 1 Radiation spectrum of Hg HCL

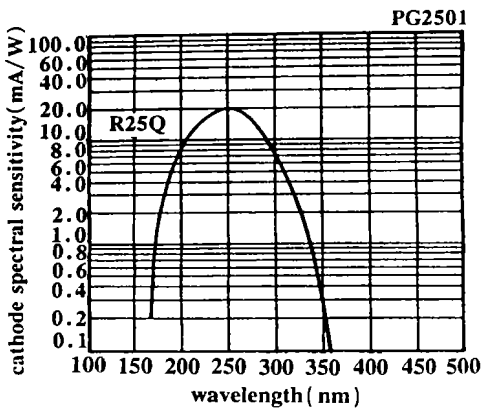


Fig. 2 Spectral response of GDB152

算出的数据表查出 XeF₂ 气体的压强。从前面的原理可以看到, 整个系统在使用过程中不用精确对准, 只需在整个监测过程中保持相对位置不变即可。

监测激光器气室内 XeF₂ 气体的压强必须先确定 XeF₂ 气体在 253.7nm 处的吸收截面 $\sigma_{253.7}^{\text{XeF}_2}$ 。测量吸收截面的实验装置与监测 XeF₂ 气体压强的装置完全相同。测量中, 使用了 1m 长的不锈钢管代替激光器气室, 先用氟气充分钝化过, 抽真空并测量光电倍增管输出电压信号 $V(0)$, 然后充入 XeF₂ 气体直到达到该温度下的饱和蒸气压, 再测得此时光电倍增管输出电压 $V(\text{saturation})$ 。此过程中, 同时测量不锈钢管中的温度, 精度为 0.1℃, 用前面的(1)式计算得到 XeF₂ 气体的饱和压强。在所有的测量中, 计算得到的饱和蒸气压与用低气压计直接测量结果相比较, 相差最大不超过 10Pa。最后由(7)式就可以求出吸收截面。

在温度为 20℃~25℃ 的范围内多次测量, 得到 XeF₂ 气体在 253.7nm 处的吸收截面 $\sigma_{253.7}^{\text{XeF}_2} = (1.55 \pm 0.05) \times 10^{-19} \text{cm}^2$ 。

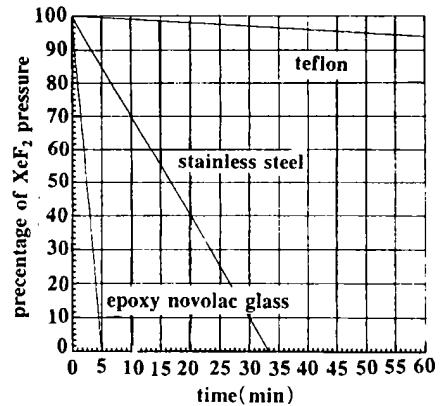
3 激光器气室材料的选择

XeF₂ 气体的化学活性很强, 特别要注意选择化学稳定性好的材料作为激光器的气室。XeF₂ 气体与气室材料表面的相互作用产物对激光上能级具有明显的猝灭作用, 甚至不能形成激光振荡。我们先后用酚醛玻璃、聚四氟乙烯和不锈钢作为激光器气室材料。用 XeF₂ 气体压强监测系统分别对这 3 种气室中 XeF₂ 气体的反应情况进行了监测。XeF₂ 气体的反应速率为:

$$v = - [\text{XeF}_2]^{-1} \frac{d[\text{XeF}_2]}{dt} \quad (8)$$

通过大量实验表明, 对于酚醛玻璃, $v \approx 0.20 \text{min}^{-1}$; 聚四氟乙烯, $v \approx 0.001 \text{min}^{-1}$; 不锈钢, $v \approx 0.03 \text{min}^{-1}$ 。反应速率曲线如图 3 所示。由此可见, 酚醛玻璃完全不能用来作为激光器的气室材料, 用这种材料的气室, 我们在很长的时间内没有得到激光输出。最适合的材料为聚四氟乙烯, 但由于聚四氟乙烯价格昂贵且不易密封, 所以, 最终采用不锈钢作为激光器气室材料。据报道, 用氟气钝化过的镀镍的不锈钢气室至少在几个小时之内 XeF₂ 气体没有明显变化。

线如图 2。为保证足够的测量精度, 光电倍增管采用了负高压供电的直接耦合输出电路, 这也有利于屏蔽和使用安全。单色性好的准平行光源使我们既避免了复杂的积分运算又提高了测量的精度, 使用对日光不敏感的光电倍增管能够省掉 253.7nm 紫外窄带滤光片。二者的配合使得整个监测装置变得非常简单。光电倍增管输出的信号经采样电路送到 PCL-812PG 型多功能数据采集卡中, 计算机将数据处理后直接给出 XeF₂ 气体的压强。也可直接将光电倍增管输出的信号送入示波器, 对照由(7)式

Fig. 3 Reaction rate of XeF₂ with three material

另外,在气室中与 XeF_2 气体相接触的金属电极和引线要镀上一层镍,用于密封和观察的各种窗口必须用石英材料或者加镀抗腐蚀的保护膜。

4 XeF 蓝绿激光器中 XeF_2 气体压强与输出能量关系

在缓冲气体 N_2 和 Ar 比例(1:3)不变,总气压(一个大气压)保持恒定的情况下,我们研究

Table 1 Laser energy obtained under different XeF_2 pressure

XeF_2 pressure (Pa)	gain length (cm)	stored energy (J)	output window's transmission (%)	output spectrum (nm)	laser energy (mJ)
200					88.1
250					167.5
290	60	5400	4%	475~490	150.7
330					140.3
370					136.3

Table 2 Laser energy obtained under different XeF_2 pressure(Russia)

XeF_2 pressure (Pa)	gain length (cm)	stored energy (J)	output window's transmission (%)	output spectrum (nm)	laser energy (mJ)
200					59.5
280					76.2
320					98
360	180	90000	23%	470~500	70.3
430					44.5
450					25.4

研究了低泵浦功率密度(峰值功率密度为 4.5MW/cm)条件下 XeF 蓝绿激光器中 XeF_2 气体压强变化对输出激光能量的影响。具体的实验结果见表1。表2是俄罗斯获得的百焦耳级蓝绿激光实验结果,峰值泵浦功率密度 60MW/cm ,气份比和总气压与我们的实验条件相同^[2,3]。

对比表1和表2可以看出,在两种泵浦条件下输出激光能量的变化趋势是一致的。在 200Pa 到 400Pa 的范围内, XeF_2 气体压强有一最佳值。这一最佳值会随着泵浦功率的增高而缓慢增加。在 XeF_2 气体压强低于最佳值的情况下,输出能量下降是因为相当部分的泵浦光浪费在了气室的侧壁上;当 XeF_2 气体压强高于最佳状况时, XeF_2 气体被光解离后的产物和

XeF_2 气体分子本身对激光上能级的猝灭作用变得十分明显。

5 结 论

XeF_2 气体压强监测系统能够满足实验的各种要求,实现了对 XeF_2 气体压强的无接触测量和实时监测混合工作气体中 XeF_2 气体的反应情况。通过监测系统选择了合适的激光器气室材料,确定了 XeF 蓝绿激光器中 XeF_2 气体的压强范围,保证获得最大的激光能量输出。

参 考 文 献

- 1 Mikhcev L D, Zuev V S. J Russia Laser Research, 1995; 16(5): 416~ 462
- 2 Beverly R E. Appl Phys, 1993; B13(56): 147~ 156
- 3 Zuev V S, Kashnikov G N, Mamaev S B. Sov J Q E, 1992; 22(11): 973~ 978

* * *

作者简介:赖富相,男,1971年出生。硕士研究生。主要研究方向为热成像技术和光电检测。

收稿日期:2000-08-28 收到修改稿日期:2000-10-24