

文章编号: 0258-702X(2002)04-0332-03

放电等离子体中 XeI^* 准分子的形成过程

韩 理, 张连水, 赵晓辉, 李晓苇, 董丽芳, 傅广生

(河北大学物理科学与技术学院, 河北保定 071002)

提要 研究了 Xe/I_2 混合气体(气压 70 ~ 1330 Pa)在直流辉光放电情况下 XeI^* 准分子的形成过程,得到了 XeI^* 准分子在 240 ~ 270 nm 波长范围内的荧光发射谱。并对 $\text{XeI}^*(B \rightarrow X)$ 跃迁谱线强度随混合气体压力的变化进行了实验研究,发现气压为 333 Pa 时荧光最强,此条件下,放电等离子体的电子温度为 13.2 eV,表明低气压放电等离子体中主要反应通道为快电子碰撞 Xe 使其跃迁至 3P ,随之与 I_2 碰撞形成 $\text{XeI}^*(A, B, C)$ 。

关键词 准分子, 直流辉光放电, 荧光发射谱, 电子温度

中图分类号 TN 248.2+2 文献标识码 A

Formation of XeI^* Excimer in the Discharge Plasma

HAN Li, ZHANG Lian-shui, Zhao Xiao-hui,

Li Xiao-wei, Dong Li-fang, Fu Guang-sheng

(College of Physical Science & Technology, Hebei University, Baoding 071002)

Abstract Low pressure DC flowing discharge is used to study the formation of XeI^* excimer in mixture of Xe/I_2 . Fluorescence emission at spectral regions of 240 ~ 270 nm is examined. The characteristics of the emission spectra of the excimer and 253 nm intensity formed from mixture for different total gas pressures are reported. The investigation shows that 253 nm fluorescence intensity is the largest at 333 Pa and the correlated electron temperature of discharge plasma is 13.2 eV. The major reaction channel is Xe being excited to 3P by impact of high speed electron, and then $\text{XeI}^*(A, B, C)$ being formed by collision between $\text{Xe}(^3P)$ and I_2 .

Key words excimer, DC flow discharge, fluorescence emission spectrum, electron temperature

1 引 言

准分子激光器是 70 年代以来新崛起的一种高能脉冲器件,脉宽为纳秒级,脉冲峰值功率超过 10^9 W。尤其准分子器件的激光波长大多分布在紫外波段和真空紫外波段,因此,作为高效率、高功率紫外激光器,准分子激光器具有很大的发展潜力。

XeI^* 作为准分子产生激光的跃迁属于“束缚-自由”跃迁。其基态是排斥态或弱束缚态,一旦跃迁到基态,准分子就会离解。所以,激光跃迁的下能级可以视为经常处于抽空状态,故准分子的电子态跃迁很容易形成粒子数反转并获得较大的增益;由于具

有带状的连续光谱,为激光波长连续可调谐创造了条件。跃迁的下能级寿命只有 10^{-13} s,这对高重复频率运转十分有利。因此,把 XeI^* 作为新的工作物质,对其形成过程进行研究是很有意义的。

近几年来,曾有许多人利用各种手段对 XeI^* 准分子形成过程进行了研究^[1,2],主要集中在气压 > 1330 Pa 情况下,但对低气压下 XeI^* 的形成及受气压影响的机理研究得较少。本工作采用直流辉光放电法对低气压的 Xe/I_2 混合气体中 XeI^* 形成过程进行了研究,通过采集分析其荧光发射谱并结合 I. Langmuir 探针法测量的电子温度确定了 XeI^* 的形成通道,得到了在紫外 253 nm 处的谱线强度与气压

收稿日期 2001-01-15

基金项目 河北省自然科学基金(编号:197059)资助项目。

作者简介 韩理(1954.3—),男,河北大学物理科学与技术学院教授,主要从事光与物质相互作用方面的研究工作。E-mail: hanli@hbu.edu.cn

的关系曲线以及相应的电子温度随气压的变化曲线,并阐述了其作用机理。

2 实验装置

本实验采用一内径为 5 mm,长度约为 120 mm 的透明玻璃管作为放电管。其一端密封,另一端粘贴一厚度为 2 mm 的透明石英玻璃片作为出射窗口。放电电源电压 1500 V,放电电流 10 mA,正常放电情况下,放电管压降约为 700 V,信号采集使用美国 ARC 公司生产的 AM-566 型光栅单色仪和 SRS 公司生产的 Boxcar 信号平均器。实验装置如图 1 所示。

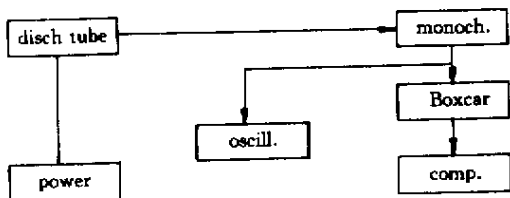


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Scheme diagram of experimental setup

放电管在真空度为 0.13 Pa 的状态下分别充入 ~40 Pa 碘蒸气和不同气压(30, 160, 290, 425, 760, 1290 Pa)的 Xe 气体,到放电稳定时所发出的荧光经透镜聚焦于单色仪的入射狭缝,狭缝宽度为 1 mm,所探测到的荧光信号经光电倍增管转换后进入 Boxcar 进行处理,由计算机控制数据采集并记录成谱。为便于观察信号,用同步触发的 SR37 型示波器进行监测。

3 结果与讨论

实验中得到了气压范围在 70 ~ 1330 Pa 的 Xe/I_2 混合气体在直流辉光放电条件下 XeI^* 的荧光发射谱。

图 2 为气压在 333 Pa 时获得的 XeI^* 的荧光发射谱。此实验条件下 253 nm 处存在较强的发射谱线,根据 Paul N. Barnes^[1]和 Jun-ying Zhang^[2]提供的势能曲线可知它对应于 $B_{1/2} \rightarrow X_{1/2}$ 的跃迁。图 3 为单色仪狭缝宽度为 20 μm 时获得的对应于 253 nm 处的精细结构谱,其半宽度约为 1.5 nm。同时,在 265 nm 处也存在一微弱的峰,它对应于 $C_{3/2} \rightarrow A_{3/2}$ 的跃迁。

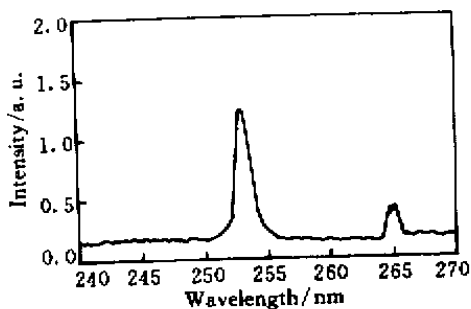


图 2 气压 333 Pa 下的荧光发射谱

Fig. 2 Fluorescence emission spectra at gas pressure 333 Pa

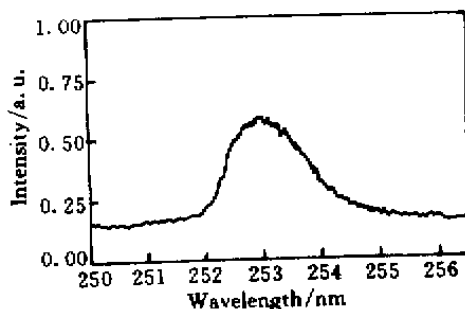


图 3 253 nm 的精细结构谱

Fig. 3 Fine structure spectra of 253 nm emission

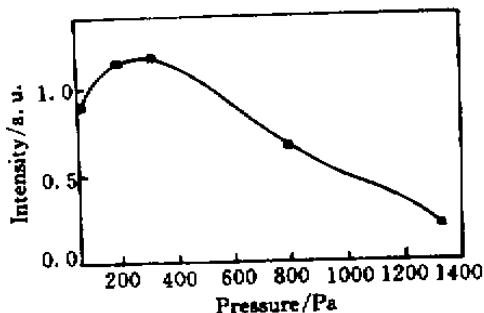
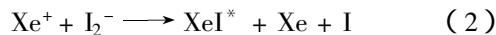
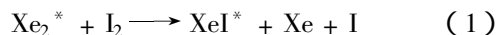


图 4 253 nm 谱线强度与气压关系曲线

Fig. 4 Intensity of 253 nm emission as a function of gas pressure

根据在不同气压下获得的 253 nm 谱线强度数据绘制图 4 所示的关系曲线。由图可知,从 70 Pa 起随气压增大谱线强度逐渐增强,到 333 Pa 左右时出现最大值然后强度开始下降。这表明在气压为 333 Pa 下激发态的 XeI^* 准分子更易形成并向基态跃迁发射荧光。

对于 XeI^* 的形成,一般认为在高气压的情况下占主导地位的是 Harpoon 反应和离子复合





当气压小于 1330 Pa 时, 形成机理发生改变



在低气压放电过程中, 由于碘分子必须被激发至离子对态的高振动态才有可能分解为碘原子与基态 Xe 原子碰撞形成 XeI^* ^[3], 此实验条件下不易获得如此高的能量, 且实验中并未发现碘原子的谱线, 因此认为主要是快电子与 Xe 原子发生碰撞并把 Xe 原子激发至亚稳态 3P 态, 处于亚稳态的 Xe 原子再与基态的碘分子碰撞生成 B 态 XeI^* 分子, 即反应 (4), XeI^* 自发向基态跃迁发射出 253 nm 的荧光。在 333 Pa 气压下快电子对 Xe 原子的碰撞激发最为显著。与此对应, 我们用 I. Langmuir 探针法测量了不同气压下放电管中的电子温度, 得出如图 5 所示的电子

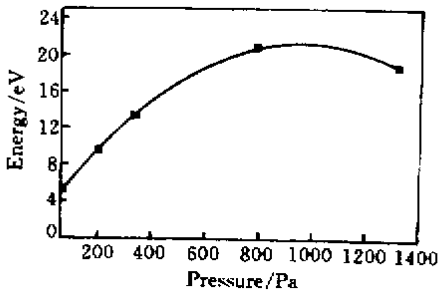


图 5 电子温度与气压关系曲线

Fig.5 Electron temperature as a function of gas pressure

温度随气压变化曲线。可以看出, 在 333 Pa 时电子温度约为 13.2 eV, 它与 Xe 原子第一激发电位 8.3 eV 的 1.5 ~ 2 倍相对应^[4]。说明此气压下的电子与原子碰撞后转移的能量恰好使 Xe 原子产生共振激发至 3P 态进而碰撞碘分子产生激发态的 XeI^* 准分子。至于此后随气压增大, 虽电子温度也有所上升, 但谱线强度却没有增强, 这主要由于: 一方面, 虽然气压升高, Xe 原子密度增大, 但由于 Xe_2 分子的形成导致了 XeI^* 的熄灭^[5]; 另一方面, 较高的能量会把 Xe 原子激发至更高的能级, 由于这些

能级的寿命较短, 会很快跃迁到低激发态或基电子态, 从而减少了 3P 能级的粒子数布居, 降低了形成 B 态 XeI^* 准分子的数量, 实验中还观察到 Xe 原子的 823 nm ($6p[3/2] \rightarrow 6s[3/2]$)^[6] 等谱线, 它们的存在证实了这种可能。

4 结束语

通过对所获得的荧光发射谱和测量的对应于不同气压的电子温度曲线的分析可以得出: 在 70 ~ 1330 Pa 较低气压下, Xe/I_2 的混合气体在直流辉光放电的环境中可以形成 XeI^* 准分子。主要通道为: 携带一定能量的快电子把基态的 Xe 原子碰撞激发至 3P 激发态, 处于 3P 态的 Xe 原子再同碘分子发生碰撞生成激发态的 XeI^* 准分子向基态跃迁发射出波长为 253 nm 的荧光。此过程随混合气体气压的上升而逐渐增强, 在 333 Pa 时达到最佳, 然后又逐渐减弱。

参 考 文 献

- 1 Paul N. Barnes, Mark J. Kushner. Ion-ion neutralization of iodine in radio-frequency inductive discharges of Xe and I_2 mixtures [J]. *J. Appl. Phys.*, 1997, **82**(5): 2150 ~ 2155
- 2 Jun-Ying Zhang, Lan W. Boyd. Efficient XeI^* excimer ultraviolet sources from a dielectric barrier discharge [J]. *J. Appl. Phys.*, 1998, **84**(3): 1174 ~ 1178
- 3 B. V. O'grady, R. J. Donovan. Chemiluminescent reaction between $\text{I}(\text{DO}_u^+)$ and Xe to yield $\text{Xe}(\text{B}^2\Sigma_{1/2})$ [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 1985, **122**(5): 503 ~ 506
- 4 Hu Zhiqiang, Zhen Hansheng, Shi Yingnan. Gas Electronics [M]. 1st ed., Beijing: Electrical Industry Press, 1985. 10 ~ 20 (in Chinese)
- 5 K. Tamagake, D. W. Setser, J. H. Kolts. Interpretation of XeI and XeBr bound-free emission spectra and reactive quenching of $\text{Xe}(\text{B}^2\Sigma_{1/2})$ atoms by bromine and iodine containing molecules [J]. *J. Chem. Phys.*, 1981, **74**(8): 4286 ~ 4305
- 6 R. J. Cedolin, W. A. Hargus, Jr., P. V. Storm et al.. Laser-induced fluorescence study of a xenon Hall thruster [J]. *Appl. Phys. B*, 1997, **65**(4-5): 459 ~ 469