

电子束抽运氩离子准分子跃迁小信号增益的测量*

赵永蓬 王 骐 高劭宏 刘金成

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所可调谐激光技术国家级重点实验室 哈尔滨 150001)

提要 对强流相对论电子束抽运氩产生的氩的第三谱带进行了研究。利用反射镜法对其小信号增益系数进行了测量。根据测量的实验装置和方法,建立了近距离探测的精确数学模型。综合运用数值分析方法对该模型进行了求解,得到了小信号增益系数。

关键词 相对论电子束,离子准分子,小信号增益,第三谱带

稀有气体的第三谱带几乎覆盖了整个 VUV 和 XUV 波段(400~ 70 nm)。其中,Ar 的第三谱带的范围是 150~ 300 nm,它存在两个峰,其中心分别位于 185 nm 和 240 nm 附近。虽经过多年努力,对第三谱带来源的解释至今仍存在着争论。1980 年,G. Klein 等提出第三谱带来源于 $\text{Ar}_2^+ *$ ($^2\Sigma_u^+$) 的假说^[1]。1988 年,H. Langhoff 提出了第三谱带中中心位于 185 nm 一段来源于 Ar_2^{2+} 离子准分子的假说^[2]。还有人提出了 $\text{Ar}_3^{2+} *$ 参与第三谱带辐射的可能性^[3]。1994 年,E. Robert 等^[4]提出了第三谱带可能来源于多种物质参与辐射的假说。对第三谱带中中心为 185 nm 一段的来源 H. Langhoff 的观点已得到广泛的承认,但中心位于 240 nm 附近的一段,其来源至今仍未有明确的结论。本文对氩第三谱带中中心位于 240 nm 一段的小信号增益系数进行了测量。

对氩的第三谱带进行广泛研究的一个重要原因是由于它是由离子准分子产生的。对氩第三谱带增益的测量和计算可能为离子准分子机制产生激光振荡这一设想,提供有用的数据和方法。

1 实验装置

实验中,采用强流相对论电子束横向抽运方式,实验装置如图 1 所示。电子束装置采用油介质单传输线,其技术指标为:二极管的峰值电流 23.1 kA,峰值电压 560 kV,电压波形前沿 7.6 ns,FWHM 36.7 ns。二极管产生的电子束经钛膜进入腔中,腔中充有 0.3 MPa 的氩气,经电子与氩的作用发射出中心位于 240 nm 的氩第三谱带。腔中发出的光由真空紫外单色仪分光后照到胶片上曝光,通过胶片上的黑度值来反应光强。胶片的黑度与光强的关系经过了严格

* 国家 863 激光技术领域、国家自然科学基金(课题号 69488001)资助项目。

收稿日期: 1998-09-17; 收到修改稿日期: 1999-01-04

的相对标定^[5]。另外对电子束工作的稳定性也进行了测量,证明电子束具有良好的稳定性和重复性^[6]。

由于采用横向抽运方式,所以利用反射镜法对小信号增益系数 g_0 进行测量比较方便。然而在我们的实验中增益介质的线度较长(270 mm),所以按照经典的测量方法使探测距离远大于增益介质的线度,必须使探测距离大于 3 m。由于胶片灵敏度等实验条件的限制,现有的条件还不可能实现远距离探测。于是我们提出了近距离探测,建立精确数学模型的方法。由于精确的数学模型没有解析解,所以利用数值分析的方法对此数学模型进行求解,最终得到小信号增益系数 g_0 。

2 数学模型

传统反射镜法测量 g_0 的原理如图 2 所示。设直径为 $2r$, 长为 L 的增益介质,受均匀的横向抽运,若在 Z 处的激活发光中心元 ΔZ 产生光强为 $dI(\nu)$ 的单色光,则在探测距离 D_0 远大于增益介

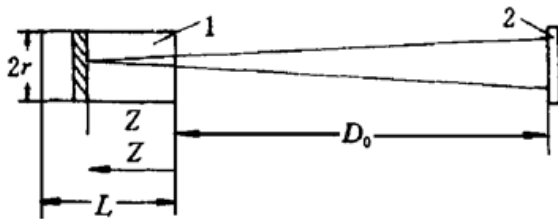


图 2 测量 g_0 的典型方法

1: 增益介质; 2: 探测器

Fig. 2 The classical method for measuring the small signal gain

1: gain medium; 2: detector

这样,测量出 $I_L(\nu)$ 和 $I_{2L}(\nu)$ 以及反射镜的反射率 R ,就可求得 g_0 。

通过对此方法的研究发现,为了得到数学模型的解析解,根据 $D_0 \gg L$ 的条件进行了两个近似:旁轴光线在增益介质中传播的距离以其在光轴上的投影长度来代替;分母中的 Z 被忽略。在实验中 $D_0 \gg L$ 的条件不再成立,不能做上述近似,因而得不到积分表达式的解析解而只能得到其数值解。

测量 g_0 的实验装置如图 1 所示。其中,增益介质为一圆柱体。由于探测孔径的限制,只有图 1(a) 中阴影部分增益介质产生的光才能被探测器接收到。加后反镜后如图 1(b) 所示。由于后反镜的直径只有 28 mm 而增益介质直径为 100 mm,所以经后反镜反射并被探测器接收到的光如图 1(b) 中阴影部分所示。此时后反镜不仅起反射作用而且起光阑作用。根据以上分析可以建立如下精确的数学模型

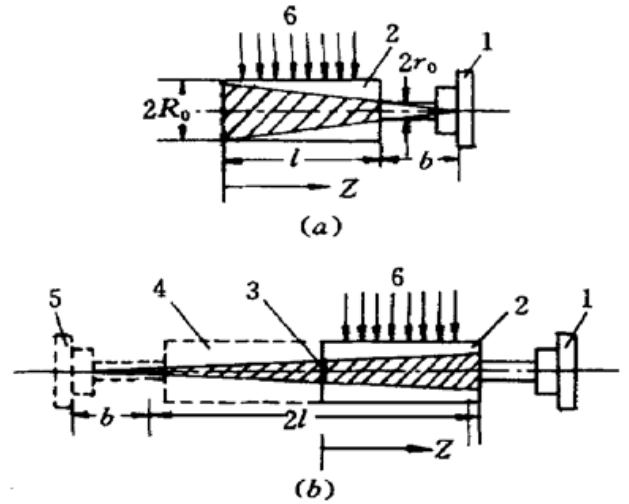


图 1 测量 g_0 的实验装置

1: 真空紫外单色仪; 2: 增益介质区; 3: 反射镜; 4: 介质区经反射镜成的像; 5: 单色仪经反射镜成的像; 6: 电子束

Fig. 1 The experimental setup for measuring the small signal gain

1: VUV monochrometer; 2: gain medium; 3: mirror; 4: virtual image of gain medium; 5: image of VUV monochrometer; 6: electron beam

质长度 L , 即 $D_0 \gg L$ 时,探测器接收到的光强 $I_L(\nu)$ 为

$$I_L(\nu) = c \int_0^L \frac{e^{g_0 Z}}{(D_0 + Z)^2} dZ \quad (1)$$

若加上反射率为 R 的后反镜时,探测器接收到的光强 $I_{2L}(\nu)$ 为

$$I_{2L}(\nu) = I_L(\nu) + cR \int_0^L \frac{e^{g_0(2L-Z)}}{(D_0 + Z)^2} dZ \quad (2)$$

式中 c 为由抽运强度决定的常数, g_0 为小信号增益系数,它在测量带宽内与频率无关。在 $D_0 \gg L$ 的条件下分母中的 Z 可以被忽略掉,这样上两式可得到解析解。

$$I_l = \int_0^l dZ \int_0^{\frac{l-Z+b}{b} r_0} dr \int_0^{2\pi} I_0 \exp \left[g_0 \frac{\sqrt{(l+b-Z)^2 + r^2} (l-Z)}{l+b-Z} \right] \frac{s}{4\pi[r^2 + (l+b-Z)^2]} d\theta \quad (3)$$

$$I_{2l} = I_l + \int_0^l dZ \int_0^{\frac{l+b+Z}{1+b} r_m} dr \int_0^{2\pi} I_0 \exp \left[g_0 \frac{\sqrt{(l+b+Z)^2 + r^2} (l+Z)}{l+Z+b} \right] \frac{Rs}{4\pi[r^2 + (l+b+Z)^2]} d\theta \quad (4)$$

其中 I_l, I_{2l} 分别为加后反镜前后探测器接收到的光强。 l 为增益介质线度, b 为探测距离, r_0 为圆筒半径, r_m 为后反镜半径, S 为探测器狭缝面积, I_0 为初始光强, r 为发光元到轴线的垂直距离。

将(3)和(4)两式相除得

$$I_{2l}/I_l = 1 + \left[\int_0^l dZ \int_0^{\frac{l-Z+b}{b} r_0} \frac{\exp \left[g_0 \frac{\sqrt{(l+b-Z)^2 + r^2} (l-Z)}{l+b-Z} \right]}{r^2 + (l+b-Z)^2} dr \right]^{-1} \cdot R \int_0^l dZ \int_0^{\frac{l+b+Z}{1+b} r_m} \frac{\exp \left[g_0 \frac{\sqrt{(l+b+Z)^2 + r^2} (l+Z)}{l+b+Z} \right]}{r^2 + (l+b+Z)^2} dr \quad (5)$$

如果测出 I_l 及 I_{2l} 值则 I_{2l}/I_l 的值就可确定下来。这样上式变为积分中含有未知数 g_0 的方程。解此方程时需对双重积分进行数值求解, 同时对含未知数 g_0 的方程迭代求解, 最终得到 g_0 的值。

求双重积分时选用复化辛甫生公式, 解方程时采用牛顿迭代法。整个数值求解过程为复化的辛甫生公式和牛顿迭代法的综合运用。为验证计算 g_0 程序的正确性, 假设 $g_0 = 0$ 可求出积分的解析形式, 将解析解与数值解比较, 两者完全一致。当 $g_0 = 0$ 时 $I_{2l}/I_l = 1.46$ 。这说明当介质的增益为 0 时, 加后反镜后光强应增长 1.46 倍。

3 实验结果

采用铝全反镜作为后反镜, 其反射率曲线如图 3 所示。实验中测得的加后反镜前后的光谱如图 4 所示。经计算得到的 g_0 随波长变化的曲线如图 5 所示。图 5 中在 230 nm 和 244 nm 处存在两个峰值。在 230 nm 处 $I_{2l}/I_l = 2.03, g_0 = 0.029 \text{ cm}^{-1}, g_0 l = 0.78$ 。在 234 nm 处 $I_{2l}/I_l = 2.06, g_0 = 0.030 \text{ cm}^{-1}, g_0 l = 0.81$ 。在谐振腔实验中, 我们观察到了 220 nm 附近的光腔效应^[7]。这也证明了小信号增益系数测量的正确性。

用 3101pcs 型紫外分光光度计测量后反镜的反射率, 其测量误差为 $\pm 0.3\%$ 。黑度计的测量误差为 $\pm 1.2\%$, 所以整体测量误差应小于 $\pm 5\%$ 。另外, 测量的稳定性主要取决于电子束的稳定性以及荧光谱的稳定性。对它们的测量已在文献 [8] 中给出了详细的结果。

在我们对电子束抽运氩的动力学计算中, Ar_2^+ 离子准分子的粒子数密度约为 $8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, 其增益约为 0.02 cm^{-1} 。这与测量的小信号增益值符合得很好, 所以我们认为氩的第三谱带中中心位于 240 nm 一段很可能是由 Ar_2^+ 离子准分子跃迁产生的。这与 G. Klein 和 M. J. Carvalho 曾提出的 Ar 的第三谱带起源于离子准分子 Ar_2^+ 的激发态^[1] 的设想一致。尽管仅通过动力学的计算和小信号增益的测量, 还不能对 Ar 的第三谱带来源给出确切的解释, 但是我们所得的理论和实验结果必将为探索其来源提供有用的数据。

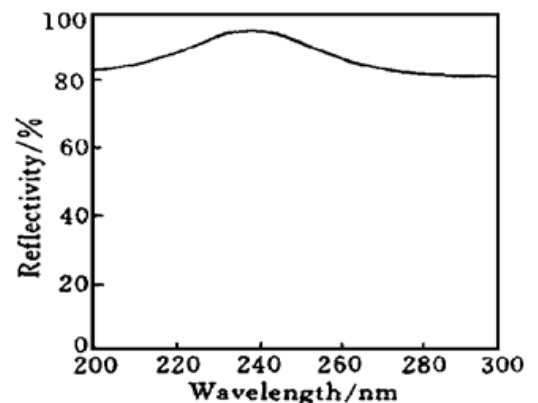


图 3 后反射镜反射率随波长的变化

Fig. 3 The reflectivity of the rear mirror as a function of wavelength

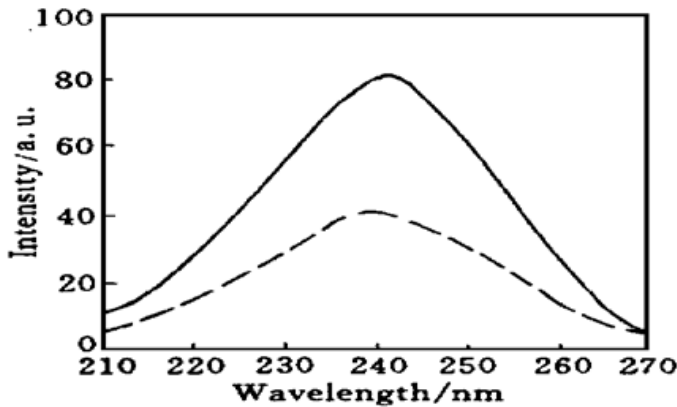


图4 加后反镜前后光强随波长的变化
虚线代表未加后反镜;实线代表加上后反镜

Fig. 4 Emission intensity with and without rear mirror
as a function of wavelength

The dotted line, without a mirror and the real line, with a mirror

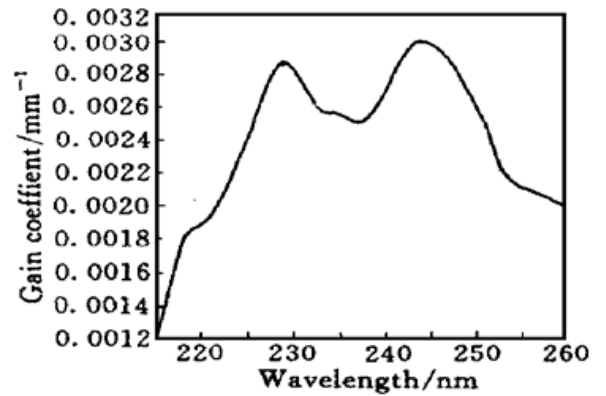


图5 小信号增益随波长的变化

Fig. 5 The small signal gain as a function
of wavelength

参 考 文 献

- 1 G. Klein, M. J. Carvalho. Argon luminescence bands between 1600 and 2900 Å. *J. Phys. B: At Mol. Phys.*, 1981, **14**: 1283~ 1290
- 2 H. Langhoff. The origin of the third continua emitted by excited rare gases. *Opt. Commun.*, 1988, **68** (1): 31~ 34
- 3 D. L. Turner, D. C. Conway. Study of the $2\text{Ar} + \text{Ar}^{\dagger} = \text{Ar} + \text{Ar}^{\ddagger}$ reaction. *J. Chem. Phys.*, 1979, **71** (4): 1899~ 1901
- 4 E. Robert, A. Khacef, C. Cachoncinlle *et al.*. Time-resolved spectroscopy of high pressure rare gases excited by an energetic flash X-ray source. *Opt. Commun.*, 1995, **117**(1, 2): 179~ 188
- 5 Zhao Yongpeng, Wang Zhenxu, Gao Shaohong *et al.*. The relative calibration for Shanghai 5FW Film. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 1997, **9**(4): 627~ 630 (in Chinese)
- 6 Gao Shaohong, Zhao Yongpeng, Wang Zhenxu *et al.*. The measurement about stability of electron beam device. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 1997, **9**(4): 596~ 598 (in Chinese)
- 7 Wang Qi, Liu Xuelong, Men Zhuowu. Observation of Laser Oscillation in Ionic Excimer $[\text{Ar}^{2+} \text{Ar}]^{2+}$ Pumped by Relativistic Electron Beam [REB]. Proceeding of the Conference on Lasers and Electro-Optics, Anaheim, CA, USA, 1994. 346~ 350
- 8 S. Kubodera, R. Sauerbrey. Kinetic studies of ionic cesium fluoride excimer molecules: feasibility of an ionic cesium fluoride laser. *Opt. Commun.*, 1992, **94**(6): 515~ 520

Measurement of Small Signal Gain of Argon Ionic Excimer Emission Pumped by Electron Beam

Zhao Yongpeng Wang Qi Gao Shaohong Liu Jincheng

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract The study on the third continuum of argon pumped by the relativistic electron beam was made. The small signal gain of the continuum was measured with the mirror. According to the experimental setup and method, an accurate mathematical model for close range detection is built up. With numerical simulation, the small signal gain of the third continuum is obtained.

Key words relativistic electron beam, ionic excimer, the small signal gain, the third continuum