

大电流密度放电中钾的 Penning 电离观测

王 骐 赵 利 朱瑞义 马祖光

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨, 150001)

摘要: 本文叙述了自制的大电流密度、快脉冲放电电源, 及用该放电装置激励 He/K 混合蒸气, 观测到 He/K 间能量传递产生的钾的 Penning 电离。

关键词: 大电流密度 快脉冲放电 He/K 蒸气 Penning 电离

Penning ionization of K in high-current-density discharge

Wang Qi, Zhao Li, Zhu Ruiyi, Ma Zuguang

(Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology)

Abstract: A high-current-density, fast pulse discharge device has been developed. The device is used to excite He/K mixed vapor, and the Penning ionization of K by $\text{He}^*(6d^3D)$, $\text{HeB}^*(5s^1S)$ and $\text{He}^*(4p^1P^0)$ is observed in discharge afterflow.

Key words: high-current density quick pulsed discharge He/K vapour Penning ionization

一、引 言

1987 年, King 首次报导了他们研制的大电流密度、快脉冲放电电源^[1]。该电源放电电流密度 $\sim 1\text{kA}/\text{cm}^2$, 激励速率很大, 是一台可用于原子或离子的内壳层激发, 产生 XUV/VUV 波段辐射的有效激励源。

我们研制了类似装置, 并希望利用此电源做的第一步激励, 用光泵为第二步激励, 实现 He/K 系统两步激励, 通过受激共振反斯托克斯喇曼散射 (SRASRS) 过程获得 64.3nm, 59.8nm XUV 输出, 对此方案的详细讨论参见文献[2~4]。本文报导的是利用自制大电流密度、快脉冲放电电源激励 He/K 混合蒸气, 获得了稳定的辉光放电, 并观察到亚稳态 He^* 与基态 K 能量传递产生的 Penning 电离过程。

二、大电流密度、快脉冲放电装置

King 和 Caro 于 1987 年提出了用快速电容转移式驱动电路与低电感放电腔相结合可以

版权所有 © 《激光技术》编辑部

410 和自制的 Rogowski 线圈配 Tek 6105 高压探针及 Tek 7834 示波器测到的电压波形。

由测量知,该装置放电电流为 12kA,电流密度约为 $1\text{kA}/\text{cm}^2$,电流脉冲宽度 20ns,上升前沿约 10ns。放电脉宽较文献[1]中介绍的要短,这对介质中激发态粒子数积累是不利的。这是由于我们的装置中,工作电容和储存电容组合还需进一步合理,同时也因为电容与热管式空心阴极放电腔毗邻,环境温度较高时,处于高压下的电容容量要比标称值小很多。这点应进一步改进,以便获得更佳的激励效果。

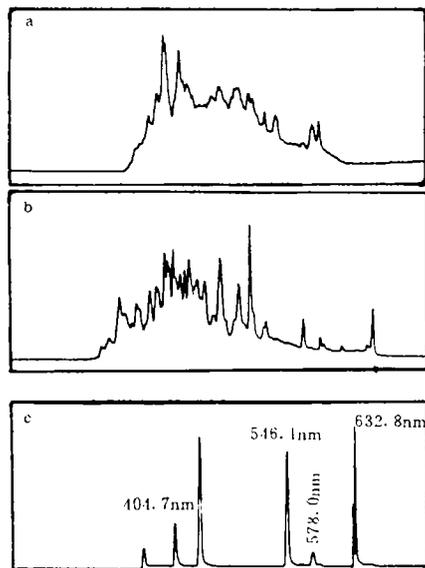


Fig. 5 The emission spectra in different discharge mediums
a - in He/K mixed vapour b - in He
c - in calibration spectrum

三、He/K 蒸气介质中放电 K 的 Penning 电离观测及过程分析

实验中,采用 OMA-II 观测放电荧光。图 5 是测到的纯 He 放电激励谱(图 5a),及 He/K 混合蒸气(400℃)放电荧光光谱。与跃迁谱图对照,可识别出下面的一些谱线。

属 He 原子(He I)激发谱

谱线(nm)	对应跃迁	激发电位(eV)
388.8	He($3p^3P^0$) \rightarrow He($2s^3S$)	23.00
396.4	He($4p^1P^0$) \rightarrow He($2s^1S_0$)	23.73
501.5	He($3p^1P^0$) \rightarrow He($2s^1S_0$)	23.08
587.5	He($3d^3D$) \rightarrow He($2p^3P^0$)	23.07

属 K 原子(K I)激发谱

谱线(nm)	对应跃迁	激发电位(eV)
532.3	K($8s^2S_{1/2}$) \rightarrow K($4p^2P_{1/2}$)	3.94
534.2	K($6d^2D$) \rightarrow K($4p^2P_{1/2}$)	3.93
580.2	K($7s^2S_{1/2}$) \rightarrow K($4p^2P_{1/2}$)	3.76

属 K 离子(K II)激发谱

谱线(nm)	对应跃迁	激发电位(eV)
422.2	$K^+[3p^5(^2P^0_{1/2})4p(1/2)(0)] - K^+[3p^5(^2P^0_{1/2})4s(1/2)(1)]$	23.56
413.4	$K^+[3p^5(^2P^0_{3/2})4p(5/2)(2)] - K^+[3p^5(^2P^0_{3/2})4s(3/2)(2)]$	23.13
426.3	$K^+[3p^5(^2P^0_{3/2})4p(5/2)(2)] - K^+[3p^5(^2P^0_{3/2})4s(3/2)(2)]$	23.13
460.8	$K^+[3p^5(^2P^0_{3/2})4p(3/2)(2)] - K^+[3p^5(^2P^0_{1/2})4s(1/2)(1)]$	23.31
418.6	$K^+[3p^5(^2P^0_{3/2})4p(5/2)(3)] - K^+[3p^5(^2P^0_{3/2})4s(3/2)(2)]$	23.09

图 6 为一组随温度变化时 He/K 混合蒸气中放电荧光光谱图,从图中可以看出如下现象:

(1)480.8nm, 498.0nm 是两个较宽的谱带。它们的峰值强度随温度降低而减小,且在 He, K, He⁺, K⁺ 跃迁谱图中找不到对应的跃迁能级,应来自钾的双原子分子 K₂。

(2)位于 501.5nm, 587.5nm, 388.8nm 的谱的特征是均随温度下降反而有增加趋势,443.8nm 谱线是温度降低到一定时才出现,381.9nm 谱线随温度变化不明显,396.4nm 谱线随温度降低开始降低,后又增高。这些谱线都是 He 原子谱线。这种变化特性是因为,当热管温度降低时,加热区中心 K 原子密度降低,而缓冲气体 He 进入放电区的成分增加,因而 He I

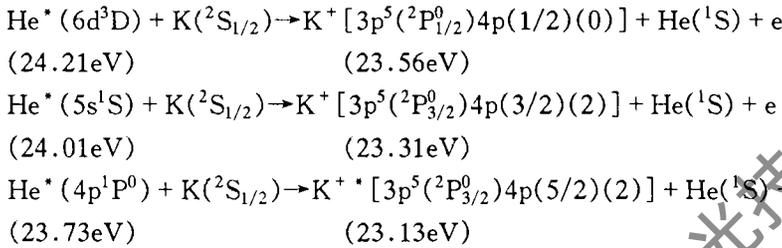
跃迁谱增强。

(3) 波长为 534.2nm, 532.3nm, 580.2nm 谱线, 峰值随温度下降而降低, 说明它们依赖于 K 原子密度, 为 K I 跃迁谱。

(4) 波长为 413.4nm, 460.8nm, 422.2nm, 426.3nm 四条谱线, 峰值在温度降低时, 基本保持不变, 甚至有增高趋势, 说明这四条谱线与 He 原子的存在有关。对照谱图, 它们应属于 K II 跃迁谱。这些跃迁谱上能级的布

居来源于 K 与激发态 He 的碰撞电离激发, 当温度降低时, K 原子密度减少, K⁺ 密度亦应减少。但是由于放电区 He 密度增加, He, K 碰撞总截面与碰撞伙伴的密度乘积成正比, 完全可以保持不变, 甚至略有增加, 这样可以维持相应 K⁺ 密度, 即 He, K 间产生了 Penning 电离。

根据 He/K 混合蒸气中辉光放电产生的激发态 He 原子, 可知可能的 Penning 激发过程如下:



这些反应过程均符合 Penning 电离激发的 Wigner 自旋守恒原则。与这三个过程对应的 He I 能级跃迁波长应分别为 381.9nm, 443.7nm, 396.4nm, 这些谱线在整个实验中强度一直很弱, 有的几乎没出现。说明发生的 Penning 电离过程与其自身的辐射跃迁是竞争的, 且 Penning 电离的几率比较大。

对应 418.6nm 的 K II 跃迁谱线, 当温度降低时很快消失了, 说明该谱线的来源的动力学过程与前面几条谱线不同, 它只与 K 原子密度有关, 预示着其跃迁上能级的粒子数布居来自于电子直接电离激发。再进一步分析, 这条谱线来自 K⁺ [3p⁵(²P_{3/2}⁰)4p(5/2)(3)](23.09eV) 向下的跃迁。根据 Wigner 自旋守恒原则, 为使该能级由 Penning 电离获得布居, 要求是由 He (3d³D) 及 He(3p³P⁰) 与 K 近共振碰撞, 而这两个能级的位能分别为 23.07eV 和 23.00eV, 均小于 23.09eV 的电离激发能, 不足于将 K 电离激发到该能级。由谱图可看出, 与 He 的这两个能级对应的荧光谱线 587.5nm, 388.8nm 都比较强, 说明 He 的这两个激发态粒子数衰减的通道主要是通过荧光辐射, 而不是通过 Penning 电离。可获得 418.6nm 跃迁上能态布居的另一可能为 He(6d³D) 态与 K 碰撞, 其电位是 24.21eV, 它与 K II 的上述能态 23.09eV 失谐量为 1.12eV, 这个失谐量太大了, 因而这种碰撞电离的截面是相当小的。He 的其它能级则因不满足 Wigner 定则, Penning 电离截面将会很小。因而, 418.6nm 这条谱线不能来自 Penning 过程, 而应是来自于电子的直接电离。

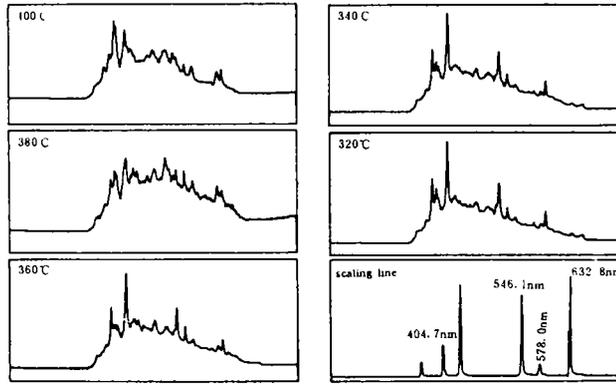


Fig. 6 The emission spectra in He/K mixed vapour at different temperature

版权所有 © 《激光技术》编辑部