

电子束泵浦氦的光腔效应

高劭宏◇著

DIANZISHU BENGPUMP YU DE GUANGQIANG XIAOYING



黑龙江大学出版社
HEILONGJIANG UNIVERSITY PRESS

电子束泵浦氦的光腔效应

高劲宏◇著

常州大学图书馆
藏书章

DIANZISHU BENGPU HE DE GUANGQIANG XIAOYING



黑龙江大学出版社
HEILONGJIANG UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

电子束泵浦氩的光腔效应 / 高劭宏著. -- 哈尔滨 :
黑龙江大学出版社, 2012.6
ISBN 978 - 7 - 81129 - 453 - 8

I. ①电… II. ①高… III. ①电子束泵浦 - 氩 - 光腔
振荡模式 IV. ①TN245

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 184096 号

电子束泵浦氩的光腔效应

DIANZISHU BENGPU YA DE GUANGQIANG XIAOYING

高劭宏 著

责任编辑 李 丽 肖嘉慧
出版发行 黑龙江大学出版社
地 址 哈尔滨市南岗区学府路 74 号
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 880 × 1230 1/32
印 张 8.375
字 数 180 千
版 次 2012 年 6 月第 1 版
印 次 2012 年 6 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978 - 7 - 81129 - 453 - 8
定 价 21.00 元

本书如有印装错误请与本社联系更换。

版权所有 侵权必究

目 录

1	绪论	1
1.1	研究背景及其理论与实际意义	1
1.2	国内外发展状况	3
2	强流相对论电子束装置的运行	23
2.1	强流相对论电子束装置	24
2.2	电子束稳定性运行的测量	40
	本章小结	48
3	胶片的相对标定及谐振腔片的镀制	50
3.1	5FW 感光胶片的相对标定	50
3.2	谐振腔片的镀制	59
	本章小结	72
4	Ar 的 260 nm 中心谱区光腔效应的观察	74
4.1	前言	74
4.2	实验装置	75
4.3	Ar 的第三谱带 200 ~ 300 nm 谱区强度与气压关系的观察	76
4.4	小信号增益的测定	82
4.5	谐振腔的调节	88

4.6	Ar 的第三谱带260 nm中心谱区光腔效应的实验观察	93
	本章小结	102
5	用量子化学从头算法探索 Ar 的260 nm中心谱区的来源	104
5.1	量子化学从头算的基本原理	105
5.2	分子的电子组态与电子状态	158
5.3	双原子分子及其离子势能函数	168
5.4	用 Gaussian98 程序计算的结果	178
5.5	用 HONDO98 程序对 Ar_2^+ 系统的计算	187
	本章小结	194
	参考文献	197
	附 录	217
	后 记	261

1 绪论

1.1 研究背景及其理论与实际意义

远紫外(UV)和极紫外(XUV)的相干辐射的产生目前是量子电子学领域的主要研究目标之一。近些年,准分子激光器已经证明能高效率地在远紫外和真空紫外(VUV)产生高功率的相干辐射。准分子的寿命很短,约为 10^{-13} s,而且只存在于受激发态,基态的准分子可以很快地离解为原子,使低能级自动排空(即无“瓶颈”效应),从而自发地形成粒子数反转,量子效率高,使得它成为高功率、高效率运转的激光。输出最高能量可达KJ量级(KrF^+),能量转换效率达7%以上。其波长范围从可见(558 nm, HgCl)延伸到真空紫外区(126 nm, Ar_2^+)^[1]因此,准分子激光器在工业、医疗、军事、物理、化学等领域有着广泛的应用。^[1-6]由于准分子激光波长短,用透镜、反射镜对其聚焦、偏转,其焦点光斑小,适合于作细微加工、雕刻或光刻。由于准分子激光光子能量高,足以打断有机材料分子的化学键,但周围材料的温度却不会因此而升高。利用这种“冷”化学反应可广泛用来进行材料的加工处理。高功率密度的准分子激光器还可

于激光烧蚀、制造薄膜、进行半导体材料加工。准分子激光器在医疗领域也有广泛的应用。其特点是能精确地切割各种生物组织,并且切割后没有热损伤,不破坏正常组织。高功率的短脉冲准分子激光器经聚焦后可产生高功率密度,由此产生很强的电场,可使原子产生高剥离态。因此,可用来作强场物理和原子参数及 X 光激光的研究。

虽然准分子激光器的研究已取得了很大的进展,但是,迄今为止在 UV 及 VUV 区只存在为数不多的激光器,而在极紫外区还没有实用的激光器。为使激光应用向更短波长延伸和覆盖整个紫外波段,1985 年,Basov 和 Sauerbrey 等人分别提出用等电子序原理构造离子准分子产生激光的方案。^[7-9]从理论上讲,离子准分子与相应的等电子序的中性准分子具有基本相同的电子结构。因而具有相似的能级分布与光谱特性,可实现高功率、高效率输出,但输出的激光波长更短。因此,离子准分子的研究对于实现高功率、高效率的短波长激光输出具有非常重要的意义。

1988 年,Langhoff 提出稀有气体第三谱带是由离子准分子跃迁而产生的^[10],使人们对稀有气体第三谱带的研究又产生了极大的兴趣。稀有气体第三谱带的来源是一个始终没有得到解决的问题。迄今为止,对这一谱带的来源流行着两种解释:第一种解释是以假设二价离子准分子参与辐射过程为前提的,即 Langhoff 的观点^[10];第二种解释是以假设一价离子准分子参与辐射过程为前提的^[11,12]。虽然这两种假设都不能令人完全信服并圆满地解释实验现象,但第三谱带起源于离子准分子的跃迁却得到了广泛的认同。因此,研究 Ar 的第三谱带的激光振荡现象,对于探索稀有气体的第三谱带来源,实现离子准分子的激

光振荡,在理论上和应用上具有重大意义。

本书所介绍的 Ar 的 260 nm 谱带是 Ar 的第三谱带(160~300 nm)的一部分。

1.2 国内外发展状况

“离子准分子”的概念最早是由日本 Keio 大学的 Iwata 等人在 1984 年提出来的。^[13]众所周知,稀有气体双原子分子系统的激发态可形成稳定的分子,称为准分子。当其向基态跃迁时,在 UV 和 VUV 区辐射强烈的宽带谱。他们把对这一系统的研究拓展到对一个稀有气体原子与一个带正电的硼离子 B^+ 组成的系统的研究。 B^+ 在基态具有 $(1s^2 2s^2)$ 闭壳层结构。简单地类推,可以预期 B^+ 的激发态 $(2s^1 2p^1, ^1P)$ 与一个基态的稀有气体原子可以形成准分子态,其向基态跃迁的概率应该是很大的。他们用 *ab initio* 法计算了 NeB^+ 和 ArB^+ 分子离子的势能曲线,并由此预言了这两种物质在 VUV 区的辐射谱(NeB^+ , 139 nm; ArB^+ , 204 nm)。其中辐射的上能级是 NeB^+ 或 ArB^+ 的第一激发态,且是束缚态,而下能级为弱束缚态,具有准分子跃迁的特征。所以,这两种物质称为离子准分子。1985 年,苏联 Lebedev 研究所的 Basov 等人和联邦德国(今德国)Wurzburg 大学的 Sauerbrey 等人各自独立地提出了基于等电子序原理构造离子准分子的物理思想。^[7-9]等电子序原理就是以中性准分子为依据,以具有相同电子结构的离子代替中性准分子中的原子或离子。相同的外层电子结构决定了这样形成的分子离子同与其等电子序的中性准分子具有相似的能级结构,但整体上不再是电

中性的了。等电子序的离子准分子与中性准分子一般具有相似的光谱特性,但离子准分子跃迁波长要短得多。预期 Li 的二价离子准分子的跃迁 $^1\Sigma^+ \rightarrow ^1\Sigma^+ (Li^{++}Li \rightarrow Li^+Li^+)$ 产生的波长约为 20 nm, 已经进入 XUV 区。因此,以已知中性准分子的束缚-自由跃迁为线索可以推测出与之等电子序的离子准分子也应具有相应波长更短的束缚自由跃迁。根据这一原理,他们提出了离子准分子在 VUV 和极紫外波段产生受激辐射的可能性。

鉴于短波长激光的重大应用价值,“离子准分子”这一概念一提出,就引起各国科学家的极大兴趣。美国、日本、德国、法国和中国等国家均开展了离子准分子的研究,并取得了显著的成就。目前主要集中在碱金属卤化物离子准分子 $(AX)^+$ 、稀有气体碱金属离子准分子 $(RgA)^+$ 、稀有气体卤化物离子准分子 $(RgX)^+$ 和稀有气体离子准分子等方面的研究。

1.2.1 碱金属卤化物离子准分子

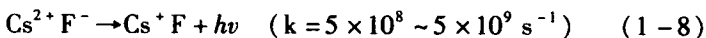
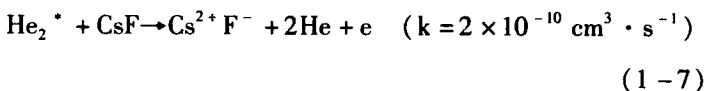
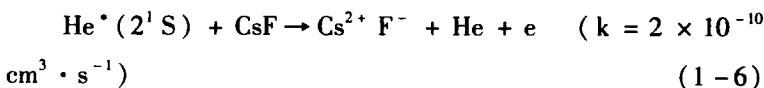
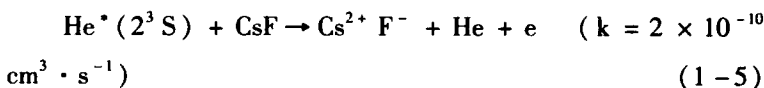
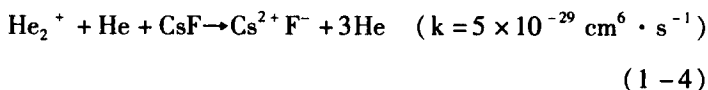
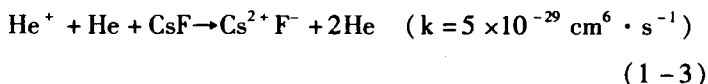
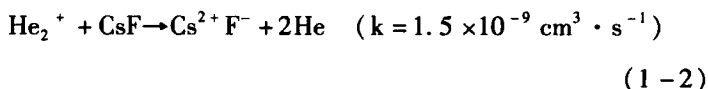
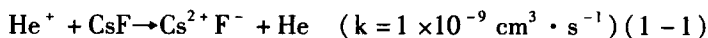
在碱金属卤化物离子准分子研究方面, Sauerbrey 等人首先提出了碱金属卤化物离子准分子的概念。^[9] 稀有气体卤化物准分子 (RgX) 的上能级的结合主要是离子型的。 RgX 化合物可以描绘成一个带正电的稀有气体离子 (Rg^+) 和一个带负电的卤素离子 (X^-) 的结合。对于 Rg^+ 离子,其外壳层电子组态是 $(np^5, ^2P)$ 。对于 X^- 离子,其外壳层电子组态是 $(np^6, ^1S)$ 。当 Rg^+ 离子与 X^- 离子之间交换一个电子时,偶极矩发生变化,从而发射光子。因为在大多数情况下,稀有气体卤化物准分子的低能级势能曲线是排斥的,因此最后产生基态的原子 $Rg(np^6,$

1S) 和 $X(np^5, ^2P)$ 。根据等电子序原理, 双原子分子离子 ($A^{2+}X^-$) 与稀有气体卤化物准分子 (RgX) 具有相似的电子结构。一个双电离的碱金属离子 (A^{2+}) 与一个稀有气体离子 (Rg^+) 具有相同的电子组态 ($np^5, ^2P$)。它与带负电的卤素离子 (X^-) 可形成离子型结合的化合物 ($A^{2+}X^-$)。与稀有气体卤化物相似, 当它向与单电离的碱金属离子和中性的卤素原子相关的弱束缚态跃迁时辐射光子。Sauerbrey 等人对其上能态 ($A^{2+}X^-$) 采用 Rittner 势能描述、对排斥态 ($A^+ + X$) 采用 Born - Mayer 势能描述, 计算了某些碱金属卤化物离子准分子的结合能、平衡核间距和辐射波长等。计算结果表明, 上能态 ($A^{2+}X^-$) 的结合能具有 $12 \sim 16$ eV 数量级, 平衡核间距为 $2 \text{ \AA}$ 左右; 而 ($A^+ + X$) 态展现出非常弱的结合能 (100 meV 量级) 和相对大的平衡核间距 ($3 \sim 4 \text{ \AA}$)。对于轻卤素和重碱金属组成的卤化物, $A^{2+}X^-$ 态相对于自电离是稳定的。从 $A^{2+}X^-$ 中的卤素离子向碱金属离子的电子跃迁预期导致辐射 $A^{2+}X^- \rightarrow A^+ + X + h\nu$ 。辐射寿命的典型值是 1 ns 。在假定碱金属卤化物离子准分子和稀有气体卤化物跃迁偶极矩是相同的前提下来估算跃迁概率。预期跃迁是均匀展宽的。利用反射法计算线宽, 给出 $\Delta\lambda/\lambda = 0.025$ 。这个值几乎不依赖于具体的系统。由此得到 10^{-16} cm^2 数量级的受激发射截面。与原子系统或等离子体复合激光器相比, 这种离子准分子跃迁应该产生很高功率的光输出。估计饱和强度能超过 10 MWcm^{-2} 。因为稀有气体卤化物不存在稳定的分子, 其产生激光的上能态只能通过活性反应来形成。而对于碱金属卤化物离子准分子, 情况是不同的。由于存在着稳定的碱金属卤化物分子, 对于 $A^{2+}X^-$ 态, 可能有很多泵浦方法。这些泵浦方法包

括构成分子的组分激发后的反应性形成,用带电粒子(电子、轻离子或重离子)直接激发碱金属卤化物或光泵。对于铯卤化物,还可利用亚稳态的氩或氙进行碰撞激发转移。Steigerwald、邢达、Yang 和 Kubodera 等人分别用高能 Ar 离子束、高能电子束和激光等离子体产生的 X 射线(LPX)激发加热的并充有缓冲气体的 CsF 蒸气,观察到两个中心位于 152 nm 和 185 nm 的连续谱带,并将它们分别确认为 Cs^{2+}F^- 离子准分子 $\text{D} \rightarrow \text{X}$ 和 $\text{B} \rightarrow \text{X}$ 跃迁的结果。^[14-21] Steigerwald 等人用高能 Ar 离子束激发方式观察到 KF^+ 、 Rb^{2+}F^- 离子准分子的荧光谱。^[15] Kubodera 等人 LPX 激发,观察到 Rb^{2+}F^- 和 $\text{Cs}^{2+}\text{Cl}^-$ 离子准分子的荧光谱。^[21] 同时发现,随着碱金属卤化物蒸气压的增加,辐射强度上升。在某个蒸气压下,强度达到峰值。对更高的蒸气压,光强开始下降。这是由于碱金属卤化物蒸气对 UV 辐射的自吸收引起的。对 CsF 蒸气而言,其吸收截面的面积为 $3.1 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ 。荧光强度的减少也意味着有强烈的淬灭过程。邢达、Yang、Kubodera、Frey 等人还分别对这些辐射系统在 LPX 和电子束泵浦条件下的辐射过程进行了动力学分析。^[18,19,21-23] 以 $(\text{CsF})^+$ 为例,在 LPX 泵浦条件下,CsF 分子由基态 (Cs^+F^-) 被激发到离子准分子的上能态 $(\text{Cs}^{2+}\text{F}^-)$ 的唯一途径是光电离: $h\nu + \text{Cs}^+\text{F}^- \rightarrow \text{Cs}^{2+}\text{F}^- + \text{e}$ 。由电子引起的去激发可能是它的主要淬灭过程,其淬灭常数估计为 $10^{-7} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ 。计算表明, Cs^{2+}F^- 在 185 nm 处的受激发射截面的面积是 $2.4 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ 。^[14-21] 预计在离靶 1 mm 处,增益系数是 0.24 cm^{-1} ,吸收系数是 0.04 cm^{-1} ,由此获得 0.2 cm^{-1} 的净增益系数。^[23] 1993 年,Toth 等人用 LPX 泵浦,首次在 185 nm 处观察到 Cs^{2+}F^- 离子准分子的光学增益现象,其平均净增益系数

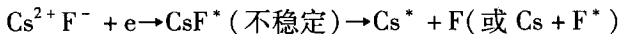
的值为 0.3 cm^{-1} , 同计算结果非常接近。^[24] 这向实现离子准分子激光振荡迈进了一大步。

在电子束泵浦条件下, 碱金属卤化物离子准分子的上能态是通过缓冲气体的原子离子和分子离子的两体或三体碰撞电荷转移和缓冲气体的亚稳态中性碱金属卤化物的 Penning 电离形成的。以充有缓冲气体 He 的 CsF 为例, 由电子束激发的缓冲气体 He, 产生 He 的原子和分子的亚稳态及离子 He^* 、 He_2^* 、 He^+ 和 He_2^+ 等。^[18,19] 这些物质与基态 CsF 通过下面的电荷转移和 Penning 电离生成离子准分子的上能态 ($\text{Cs}^{2+} \text{F}^-$):



在低压条件下, 来自 He_2^+ 的能量转移效率预期是很低的,

泵浦能量主要贮存在 He^+ 中。电荷转移反应通道(1-1)可能占主要地位。可是,当气压增加时, He 的原子离子被它的分子离子所取代,这时,电荷转移反应通道(1-2)的贡献会增加。在第一阶段,电荷转移反应起主要作用。大约100 ns以后,由于大部分能量被寿命较长的中性物质所携带,这时 Penning 电离过程(1-5)~(1-7)可能成为主要的过程。 Cs^{2+}F^- 与电子的离解复合是离子准分子的上能态重要的淬灭过程:



$$k = 0.071 \lambda^3 A / \sqrt{Te} \quad (1-9)$$

在4 eV的电子温度下,速率常数为 $1.5 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。离子准分子的上能态也可以被由电子超弹性碰撞到低能级而淬灭,其速率常数为 $10^{-8} \sim 10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

1.2.2 稀有气体碱金属离子准分子

1985年,Basov等人对稀有气体碱金属离子准分子(RgA^+)进行了概括性的分析,最先提出把这类离子准分子作为潜在的激光器的设想。^[7,8] Iwata、邢达、Markert、Balasubramanian、Petrov和Panin等人对一些具体的稀有气体碱金属离子准分子的电子态进行了 ab initio 计算。^[25-31] (RgA^+) 离子准分子的下能态与 $\text{Rg}(^1\text{S}_0) + \text{A}^+(^1\text{S}_0)$ 渐进态相关;而其上能态与 $\text{Rg}^+(^2\text{P}_0) + \text{A}(^2\text{S})$ 渐进态相关。但对于 He ,其上能态与 $\text{He}^+(^2\text{S}) + \text{A}(^2\text{S})$ 相关。所有的稀有气体碱金属离子准分子的上能态 $\text{Rg}^+ \text{A}$ 都是紧束缚态。这个态的结合能是由稀有气体离子对碱金属原子极化引起的,其数值随着稀有气体的质量增加而增加,随着碱金属质

量的增加而减少,其分布范围在0.35 eV ($\text{Xe}^+ \text{Li}$)到0.85 eV ($\text{He}^+ \text{K}$)之间。^[32]下能态 RgA^+ 是一个非常弱的束缚态,在一般的实验条件下分解为 $\text{Rg} + \text{A}^+$ 。例如, $(\text{XeCs})^+$ 的上能态的结合能为0.59 eV,而其下能态的结合能为0.11 eV。^[33]实验上, Fiedler、Schumann、Millar、Mantel 和邢达等人分别用高能 Ar 离子束、高能电子束和 LPX 激发加热的碱金属蒸气与一种或两种稀有气体的混合物,获得了22种稀有气体碱金属离子准分子的荧光谱(见表1-1)。^[34-44]其分布范围在63.82 nm ($\text{He}^+ \text{K}$)到188.90 nm ($\text{Xe}^+ \text{Li}$)之间。这些荧光谱并非单一的连续谱,而是

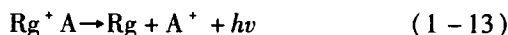
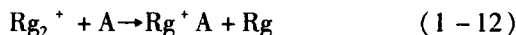
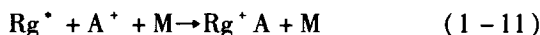
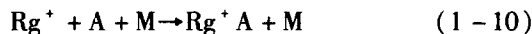
表1-1 已观察到的荧光谱稀有气体
碱金属离子准分子及其跃迁波长/nm

$\text{He}^+ \text{Li}$	$\text{He}^+ \text{Na}$	$\text{He}^+ \text{K}$	$\text{Ne}^+ \text{Li}$	$\text{Ne}^+ \text{Na}$	$\text{Ne}^+ \text{K}$	$\text{Ne}^+ \text{Rb}$	$\text{Ar}^+ \text{Li}$
66.78	65.76	63.82	80.70	79.40	77.18	76.66	124.54
$\text{Ar}^+ \text{Na}$	$\text{Ar}^+ \text{K}$	$\text{Ar}^+ \text{Rb}$	$\text{Ar}^+ \text{Cs}$	$\text{Kr}^+ \text{Li}$	$\text{Kr}^+ \text{Na}$	$\text{Kr}^+ \text{K}$	$\text{Kr}^+ \text{Rb}$
121.30	115.04	113.70	112.26	149.75	144.95	135.70	133.85
$\text{Kr}^+ \text{Cs}$	$\text{Xe}^+ \text{Li}$	$\text{Xe}^+ \text{Na}$	$\text{Xe}^+ \text{K}$	$\text{Xe}^+ \text{Rb}$	$\text{Xe}^+ \text{Cs}$		
131.58	188.90	182.90	167.38	164.10	160.50		

由若干个相隔很近的谱带所组成。说明上能态实际上是由多重能级组成的。同时还发现,在辐射过程中,普遍存在着由于碱金属蒸气的光电离引起的吸收及由激发物质引起的瞬间吸收。

Basov、Lankhorst、Lawless、Schumann、Millar、邢达、Bastiaens、Mantel 和 Kochetov 等人对电子束和 LPX 泵浦下的几个具体的 $(\text{RgA})^+$ 系统的动力学过程进行了不同程度的分析。^[8,33,35,36,40,43,46-50]预期 $\text{Rg}^+ \text{A}$ 离子准分子的形成和辐射衰变

由下面过程产生:



其中, M 表示稀有气体 Rg 或缓冲气体。在激发的初始阶段, 预期借助 Rg^+ 来形成的通道(1-10)是起主要作用的。含有 Rg^+ 的亚稳态形成通道(1-11)对大多数稀有气体碱金属离子准分子来说是放热的, 并且具有较高的速率常数。如果 $\text{Rg}^+ \text{A}$ 的势阱深度比大很多, $\text{Rg}^+ \text{A}$ 离子准分子的形成也包含反应通道(1-12), 这个通道在低压下是低效的。从以上可以判断, 前级粒子的产生过程对稀有气体碱金属离子准分子的形成起着关键的作用。 $\text{Rg}^+ \text{A}$ 离子准分子的主要淬灭过程是电子-离子的离解复合。用上述方程组不能完整地描述所有 $\text{Rg}^+ \text{A}$ 离子准分子的形成和辐射的过程, 因为每一个反应通道对于不同物质的混合物或混合物中不同的物质比所起的作用是不同的。最新的研究表明, 在电子束泵浦下, $\text{Xe}^+ \text{Cs}$ 的增益系数估计超过 0.02 cm^{-1} 。^[43]除了上述的光泵和粒子束泵浦外, 1991 年, Lo 等人首次用脉冲放电作为泵浦手段, 观察到了 $\text{Xe}^+ \text{Cs}$ 和 $\text{Kr}^+ \text{Cs}$ 的离子准分子的荧光谱。^[51]这是令人鼓舞的, 因为在稀有气体碱金属放电中的稳定性问题中, 这似乎是放电激发唯一存在的问题。在放电激发的 Ar/Xe/Cs 混合物中, 等离子体中的电离度高达 10^{-3} 。电子温度也相当高, 约有 1.25 eV。在放电的似稳阶段, 99.9% 的 Cs 被电离。因此, Cs 不再是辐射的主要吸收物。

而在放电后期, Xe^* 是充足的。因此, $\text{Xe}^+ \text{Cs}$ 的形成过程主要由含有 Xe^* 和 Cs 的反应通道(1-10)决定。Kochetov 等人的动力学分析预期, 净增益的峰值可达 $2\% \text{ cm}^{-1}$ 。^[48]

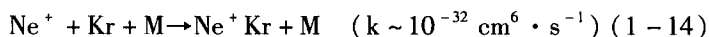
1.2.3 稀有气体卤化物离子准分子

Sauerbrey 等人最早提出了稀有气体卤化物离子准分子的概念。^[9] 卤素分子(XY)一般是以离子键结合的, 具有 $\text{X}^+ \text{Y}^-$ 的形式。若以一个与卤素分子($\text{X}^+ \text{Y}^-$)中的一价卤素正离子(X^+)等电子序的稀有气体二价正离子(Rg^{2+})取代这个卤素正离子, 就有可能形成离子键结合的离子准分子的上能态 $\text{Rg}^{2+} \text{Y}^-$ 。其下能态为 $\text{Rg}^+ \text{Y}$ 。并且假设在上能态平衡核间距附近下能态的势能曲线是平坦的。预期通过电荷转移跃迁, $\text{Rg}^{2+} \text{Y}^-$ 发生辐射。辐射的最短波长估计为 64 nm ($\text{Ne}^{2+} \text{F}^-$)。可能除了 $\text{Ne}^{2+} \text{F}^-$, 其他 $\text{Rg}^{2+} \text{Y}^-$ 化合物相对于自电离是稳定的。 $\text{Rg}^{2+} \text{Y}^-$ 离子准分子可以通过二价正离子 Rg^{2+} 和一价负离子 Y^- 的复合而形成。二价正离子 Rg^{2+} 可以通过稀有气体原子的外层电子的两步电离或内层电子的一步光电离来形成。前一过程在低光子能量下有较强的截面; 而后一过程在高光子能量下有较强的截面。一价负离子 Y^- 可以通过低能光电子与卤素分子的附着来形成。1992 年, 周赤、王骥等人用 LPX 激发, 观察到 $\text{Kr}^{2+} \text{F}^-$ 和 $\text{Ar}^{2+} \text{F}^-$ 离子准分子的荧光谱^[52-55], 其中心波长分别为 148 nm 和 125 nm 。他们同时利用推导的修正的 Rittner 势, 采用 ab initio Gaussian 80 程序, 计算了稀有气体卤化物离子准分子的势能曲线、光谱常数、辐射波长、相关的能级寿命、自发射和受激发射系数及增益截面, 从而给出了产生 XUV 激光的有

关参数和依据,初步认为稀有气体卤化物离子准分子可能是获得 XUV 波段激光的最佳选择之一。^[56]

1.2.4 异核稀有气体离子准分子

早在 1931 年, Druyvesteyn 用直流放电激发 He/Ne 稀有气体混合物, 观察到中心波长分别位于 410 nm 和 424 nm 的两个谱带, 并且指出这些谱带可能属于 He 和 Ne 的化合物。从 1958 年到 1975 年, 人们用放电和电子束激发所有其他异核稀有气体的混合物, 观察到了与 He/Ne 情况类似的 2~5 个中心谱带。^[57] Tanaka 等人将这些谱带的来源确认为异核稀有气体分子离子 (GN)⁺ 的辐射谱。^[57] 这些光谱对应于 G⁺N 电子态到 GN⁺ 电子态的电荷转移跃迁。其中 G 是较轻的稀有气体元素, N 是较重的稀有气体元素。他们还提出了用这些物质实现从可见到 VUV 区激光振荡的可能性。从现在的等电子序原理来看, 由于 (GN)⁺ 分子离子与稀有气体卤化物准分子具有相似的电子结构, 因此异核稀有气体离子准分子确实应该有实现激光振荡的可能性。表 1-2 为观察到荧光谱的异核稀有气体离子准分子及其跃迁波长。1994 年, Schumann 等人对高能电子束激发下的 Ne⁺Kr 离子准分子的动力学过程进行了分析。^[50] 1995 年, Tischler 等人对低能电子束激发下的 He⁺Ar 离子准分子的动力学过程进行了分析。^[58] 对高能电子束激发 Ne/Kr 混合物的动力学分析表明, Ne⁺Kr 离子准分子主要通过 Ne⁺ 和 Kr 的三体碰撞过程而形成:



其中, M 是 Ne 或者 Kr。Ne⁺Kr 的产额主要受中性粒子对