

离子准分子研究的进展

高劭宏 赵永蓬 王 骐

(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)

摘要: 到目前为止, 已观察到许多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 $(RgX)^+$ 、同核和异核稀有气体离子准分子的荧光谱以及 $Cs^{2+} F^-$ 离子准分子的光学增益现象和 Ar 的离子准分子激光振荡现象。从光谱学和动力学的角度描述这些离子准分子研究的进展, 并指出快速、高强度、大体积和均匀泵浦是实现离子准分子布居反转的关键所在。

关键词: 离子准分子 等电子序 UV~VUV 及 XUV 辐射 激光振荡

Development of the research on ionic excimers

Gao Shaohong, Zhao Yongpeng, Wang Qi

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

Abstract: So far, many alkali halide ionic excimers $(AX)^+$, rare gas alkali ionic excimers $(RgA)^+$, rare gas halide ionic excimers $(RgX)^+$, heteronuclear and isonuclear rare gas ionic excimers as well as the optical gain in $Cs^{2+} F^-$ ionic excimer and the oscillation of argon ionic excimers have been observed. This paper describes the development of the research on these excimers from the point of view of spectroscopy and kinetics and indicates that rapid and uniform pumping with high strength and large size is the key to realization of population reversion of ionic excimers.

Key words: ionic excimer isoelectronic sequence UV~VUV & XUV emission laser oscillation

引 言

迄今为止, 在远紫外(UV)及真空紫外(VUV)区只存在为数不多的激光器, 而在极紫外(XUV)区还没有实用的激光器。因此, 使激光应用向更短波长延伸和覆盖整个紫外波段成为大量电子学领域中富有挑战性的课题之一。1985年, N. G. Basov^[1]等人 and R. Sauerbrey^[2]等人各自独立地提出用等电子序原理构造离子准分子产生激光的方案。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。目前, 已观察到许多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 $(RgX)^+$ 、同核和异核稀有气体离子准分子的荧光谱以及 $Cs^{2+} F^-$ 离子准分子的光学增益现象^[3]和 Ar 的离子准分子激光振荡现象^[4, 5]。我们概述了近年来国内外在离子准分子方面研究的进展情况。

1 碱金属卤化物离子准分子体系

在碱金属卤化物离子准分子研究方面, R. Sauerbrey^[2]等人首先根据 $A^{2+} X^-$ 与已知的稀有气体卤化物准分子 (RgX) 具有相似的电子结构, 对上能态 $(A^{2+} X^-)$ 采用 Rittner 势能, 对排

斥态($A^+ + X$)采用 Born-Mayer 势能, 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~ 16eV 数量级, 平衡核间距为 0.2nm 左右; 而($A^+ + X$)态展现出非常弱的结合能(100meV 量级)和相对大的平衡核间距(0.3~ 0.4nm)。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 1ns。线宽的计算给出: $\Delta\lambda/\lambda = 0.025$ 。这个值几乎不依赖于具体系统。由此得到 10^{-16}cm^2 数量级的受激发射截面。F. Steigerwald, T. T. Yang^[6], S. Kubodera 等人用高能 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 152nm 和 185nm 的连续谱带, 并将它们分别确认为 $\text{Cs}^{2+} \text{F}^-$ 离子准分子 $D \rightarrow X$ 和 $B \rightarrow X$ 跃迁的结果。以后, 人们又观察到 KF^+ , $\text{Rb}^{2+} \text{F}^-$ 和 $\text{Cs}^{2+} \text{Cl}^-$ 离子准分子的荧光谱。其中, 邢达用量子化学 ab initio 法成功地计算了 $\text{Rb}^{2+} \text{F}^-$ 离子准分子的势能结构、跃迁参数, 预言了其辐射特性, 并用电子束激励观察到了 $\text{Cs}^{2+} \text{F}^-$ 离子准分子 $D \rightarrow X$ 的荧光谱^[7]。人们还发现, 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。人们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。以 $(\text{CsF})^+$ 为例, 在 LPX 泵浦条件下, CsF 分子由基态($\text{Cs}^+ \text{F}^-$)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: $h\nu + \text{Cs}^+ \text{F}^- \rightarrow \text{Cs}^{2+} \text{F}^- + e$ 。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, $\text{Cs}^{2+} \text{F}^-$ 在 185nm 处的受激发射截面是 $2.4 \times 10^{-16}\text{cm}^2$ 。预计在离靶 1mm 处, 增益系数是 0.24cm^{-1} , 吸收系数是 0.04cm^{-1} , 由此获得 0.2cm^{-1} 的净增益系数^[8]。1993 年, Cs. Toth^[3] 等人用 LPX 泵浦, 首次在 185nm 处观察到 $\text{Cs}^{2+} \text{F}^-$ 离子准分子的光学增益现象, 平均净增益系数为 0.3cm^{-1} , 同计算结果非常接近。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。

2 稀有气体碱金属离子准分子体系

1985 年, N. G. Basov^[1] 等人对稀有气体碱金属离子准分子 $(\text{RgA})^+$ 进行了概括性的分析, 最先提出把这类离子准分子作为激光介质的设想。 $(\text{RgA})^+$ 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 0.35eV ($\text{Xe}^+ \text{Li}$) 到 0.85eV ($\text{He}^+ \text{K}$) 之间。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 0.59eV, 而其下能态的结合能为 0.11eV。实验上, 人们用高能 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)。其中, 邢达用电子束泵浦, 观察到了 $\text{Kr}^+ \text{Li}$, $\text{Kr}^+ \text{Rb}$, $\text{Kr}^+ \text{Cs}$, $\text{Xe}^+ \text{Li}$, $\text{Xe}^+ \text{Rb}$ 和 $\text{Xe}^+ \text{Cs}$ 离子准分子的荧光谱^[9~ 11]。稀有气体碱金属离子准分子的荧光谱分布范围在 63.82nm ($\text{He}^+ \text{K}$) 到 188.90nm ($\text{Xe}^+ \text{Li}$) 之间。这些荧光谱

表 1 已观察到的稀有气体碱金属离子准分子荧光谱的跃迁波长(nm)

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

并非单一连续谱,而是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。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。预期 $Rg^+ A$ 离子准分子的形成和辐射衰变预期由下面过程产生:



式中, 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)是起主要作用的。含有 Rg^* 的亚稳态形成通道(2)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 $Rg^+ A$ 的势阱深度很大, $Rg^+ A$ 离子准分子的形成也包含反应通道(3),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。 $Rg^+ A$ 离子准分子的主要淬灭过程是电子-离子的离解复合。用上述方程组是不能完整地描述所有 $Rg^+ A$ 离子准分子的形成和辐射过程的,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物质比所起的作用是不同的。最新的研究表明^[12],在电子束泵浦下, $Xe^+ Cs$ 的增益系数估计超过 0.02cm^{-1} 。除了上述的光泵和粒子束泵浦外,1991年, D. Lo 等人首次用脉冲放电作为泵浦手段,观察到 $Xe^+ Cs$ 和 $Kr^+ Cs$ 离子准分子的荧光谱^[13]。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 1.25eV 。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。在放电后期, Xe^* 是充足的。因此, $Xe^+ Cs$ 的形成过程主要由含有 Xe^* 和 Cs 的反应通道(2)决定。L. V. Kochetov 等人的动力学分析预言^[14],净增益的峰值可达 $2\%\text{cm}^{-1}$ 。

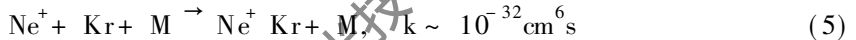
3 稀有气体卤化物离子准分子体系

R. Sauerbrey 等人最早提出了稀有气体卤化物离子准分子的概念^[2]。卤素分子(XY)一般是以离子键结合的,具有 $X^+ Y^-$ 的形式。若以一个与卤素分子($X^+ Y^-$)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,其上能态为 $Rg^{2+} Y^-$,下能态为 $Rg^+ Y$ 。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, $Rg^{2+} Y^-$ 发生辐射。辐射的最短波长估计为 $64\text{nm}(\text{Ne}^{2+} \text{F}^-)$ 。 $Rg^{2+} Y^-$ 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大的截面;而后一过程在高光子能量下有

较大的截面。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,王骥、周赤等人^[15,16]用LPX激发,观察到了中心波长位于148nm的 $Kr^{2+} F^-$ 和中心波长位于125nm的 $Ar^{2+} F^-$ 离子准分子的荧光谱。他们利用修正的Rittner势结合高斯80程序计算了稀有气体卤化物离子准分子势能曲线^[17]。理论计算与实验吻合得相当好,将离子准分子的计算精度提高了一大步。

4 异核稀有气体分子离子体系

早在1931年,M. J. 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410nm和424nm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它异核稀有气体的混合物,观察到了与He/Ne情况类似的两个至五个中心谱带。Y. 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。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。对高能电子束激发Ne/Kr混合物的动力学分析表明^[18], $Ne^+ Kr$ 离子准分子主要通过 Ne^+ 和 Kr 的三体碰撞过程而形成:



式中, M 是 Ne 或者 Kr。 $Ne^+ Kr$ 的产额主要受中性粒子对其淬灭和电子对前级粒子淬灭的影响。

5 同核稀有气体离子准分子体系

1988年,H. Langhoff将稀有气体第三谱带的来源解释为同核稀有气体离子准分子跃迁的结果,并提出其实现可调谐激光振荡的可能性^[19]。这使人们对稀有气体第三谱带又发生极大的兴趣。稀有气体的第三谱带早在60年代就有报道。目前为止,已经发现了所有稀有气体的第三谱带。采用的泵浦方式有电子束激发、离子束激发、 α 粒子激发、 β 粒子激发、高能闪光X射线激发、重离子固态靶激发、质子激发、介质控制放电激发。它们的波长范围几乎覆盖了整个UV,VUV和XUV波段(400~70nm),并且有很宽的带宽,从数十纳米

表2 稀有气体第三谱带的波长范围(nm)

He	Ne	Ar	Kr	Xe
70~80	90~110	150~300	170~500	170~500

到100nm不等(见表2)。在这一谱带,有两个或更多谱带中心,谱带中心的位置随着泵浦方式和压强的改变而改变。其中,Ar的第三谱带的范围是150~300nm,辐射寿命约为5ns。但对第三谱带的来源的解释至今仍存在着争论。1980年,G. Klein等人提出第三谱带来源于 $Ar_2^{2+} (^2\Sigma_u^+)$ 的假说^[20],其中, $^2\Sigma_u^+$ 与 $Ar^+ (3s3p^6, ^2S) + Ar (^1S_0)$ 渐进态相关。根据这一假说, $Ar_2^{2+} (^2\Sigma_u^+) \rightarrow Ar_2^+ (^2\Sigma_g^+) + h\nu$ 和 $Ar_2^{2+} (^2\Sigma_u^+) \rightarrow Ar_2^+ (^2\Pi_g) + h\nu$ 辐射过程分别产生183nm和240nm中心谱带。其中 $^2\Sigma_g^+$ 和 $^2\Pi_g$ 都与 $Ar^+ (3s^23p^6, ^2P) + Ar (^1S_0)$ 渐进态相关。1988年,H. Langhoff根据W. R. Wadt的ab initio计算否定了G. Klein的假说^[19],提出了第三谱带来源于 Ar_2^{2+} 的假说。认为第三谱带是 $Ar^{2+} Ar \rightarrow Ar^+ Ar^+ + h\nu$ 辐射跃迁的结果。W. Krotz等人的重离子束泵浦实验都支持了H. Langhoff的假说^[21]。但是C. Cachoncinille^[22,23]

和 M. Daskaloporitk^[24] 等人的 *ab initio* 计算表明, $\text{Ar}_2^+^*$ 和 Ar_2^{2+} 都参与了第三谱带的辐射, 并且 A. M. Boichenko^[25] 等人的高能质子束实验和 A. Kh. Amirov^[26] 等人的电子束实验又支持了 G. Klein 的假说。1994 年, E. Robert 等人提出了第三谱带可能来源于多种物质参与辐射的假说^[27], 但他对具体哪些物质参与了辐射并未作深入研究, 只是肯定了是离子准分子参与第三谱带的辐射过程。1994 年, 王骥等人用强流相对论电子束泵浦, 在 200nm 处首次观察到了 Ar 的离子准分子激光振荡现象^[4]。这是离子准分子研究方面的一个重大突破。笔者也从事 Ar 的第三谱带的研究, 并于最近在 260nm 处观察到激光振荡现象^[5]。无论第三谱带来源于 $\text{Ar}_2^+^*$ 还是 Ar_2^{2+} , 文献中一致认为, 同核稀有气体离子准分子主要通过前级粒子 Ar^+ 或 Ar^{2+} 与中性粒子 Ar 的三体碰撞而形成的, 其速率常数不小于 $1.2 \times 10^{-30} \text{ cm}^6/\text{s}$ 。 $\text{Ar}_2^+^*$ 或 Ar_2^{2+} 与电子的离解复合是重要的淬灭过程。它们的前级粒子的产生及其淬灭过程依赖于具体的动力学过程。

6 其它方面及存在的问题

在其它类型离子准分子研究方面, 1989 年, T. Yamashita 在充有低压 Ar 气的 Al 电极直流放电过程中, 观察到中心波长为 193nm 的 ArAl^+ 离子准分子的荧光谱带。以上所提到的离子准分子的荧光谱都是在前期粒子处于气相状态下被激发而获得的。1995 年, G. Sliwinski 等人将 0.45% 到 0.7% 的 CsF 掺杂到处于 5K 温度下的 Ar 或 Ne 基质中, 用脉冲电子束激发, 首次观察到基质中产生的 $\text{Cs}^{2+} \text{F}^-$ 离子准分子的荧光谱^[28]。除了双原子离子准分子外, 1997 年, Ph. Delaporte 等人用冷阴极电子枪横向激发处于高温高压下的稀有气体碱金属混合物, 首次观察到中心波长分别位于 159nm, 190nm, 160nm 和 135nm 的 $\text{Kr}_2^+ \text{Cs}$, $\text{Xe}_2^+ \text{Cs}$, $\text{Kr}_2^+ \text{Rb}$ 和 $\text{Ar}_2^+ \text{Cs}$ 稀有气体碱金属三原子离子准分子的荧光谱带^[29]。这是 N. G. Basov 所预期的结果。在电子束泵浦下, 这些离子准分子主要借助于下面的三体过程而形成:



对于 $\text{Kr}_2^+ \text{Cs}$, $k_6 \sim 10^{-30} \text{ cm}^6/\text{s}$, $k_7 \sim 5 \times 10^{-30} \text{ cm}^6/\text{s}$ 。上述实验都是用非选择性激发完成的。1997 年, S. Moeller 等人将碱金属(A)和 Xe 掺杂到液 He 冷却的 Ar 基质中, 用同步辐射作为选择性激发手段, 测量到 $(\text{XeA})^+$ 离子准分子的 VUV 辐射谱, 并首次观察到中心波长分别位于 252nm 和 236nm 的 $(\text{Xe}^2\text{Li})^+$ 和 $(\text{Xe}_2\text{Na})^+$ 三原子离子准分子的荧光谱带^[30]。

虽然离子准分子的研究在几个方面取得了很大的进展, 但是应该看到, 除了少数的增益和激光振荡的报道外, 目前多数离子准分子的研究仍然停留在荧光谱的获得上。与中性准分子相比, 离子准分子的产生速率较慢, 这是因为这些离子准分子是在离子与中性粒子之间的反应中进行的。其次, 离子准分子和它们的前级粒子由等离子体电子所引起的淬灭要比在中性准分子的情况下更迅速, 因为这种反应是通过两个电性相反的物质进行的。这为提高离子准分子上能态的粒子数密度以实现其反转, 高强度、高速率泵浦是必不可少的。从目前常用的两类泵浦方式看, 用 LPX 光电离激发来产生离子准分子, 具有直接布居上能态的优点。但是, LPX 泵浦系统存在着激发过程的空间非均匀性的问题; 而且由于软 X 射线被限制在很小的区域, 很难实现激光器所需要的大体积泵浦。粒子束激发具有高功率、大体积泵浦的优点。在这类泵浦方式下, 像电荷转移那样的动力学在布居上能态中起着重要的作用。但前级粒子的淬灭

过程也起着不可忽视的作用。再者,由于像泵浦速率、激发体积、电子密度均匀性和温度等那样大量的实验参数还不能精确地确定,一个包含离子准分子的产生、淬灭、辐射和泵浦过程的完整的动力学模型还没有令人满意地建立起来。对研究离子准分子激光体系,作者认为主要应解决如下几个关键问题:(1)首先是理论上进行较严格的计算,对物理模型进行深入的理解,特别要对动力学过程进行认真的分析。(2)建立有效的激励手段,这对寻找激光振荡是十分重要的。笔者曾在获得电子束激励氩的离子准分子($\text{Ar}^{2+} \text{Ar}$) 200nm 激光振荡过程中,从离子准分子跃迁上能级寿命很短的特点出发,首先改造了电子束装置,使之除具有强流相对论特点之外,又具有陡前沿特点,最后电流上升前沿小于 10ns,电压上升前沿小于 7ns,束流达 20.3kA。这样可以使激励速率大为提高。因此,快速、高强度、大体积和均匀泵浦是实现离子准分子布居反转的关键所在。

参 考 文 献

- 1 Basov N G, Voltik M G, Zuev V S *et al.* Sov J Q E, 1985; 15(11): 1455~ 1460
- 2 Sauerbrey R, Langhoff H. IEEE J Q E, 1985; 21(3): 179~ 181
- 3 Toth Cs, Young J F, Sauerbrey R. Opt Lett, 1993; 18: 2120~ 2122
- 4 Wang Q, Liu X, Men Z *et al.* CLEQ 94(Cat No. 94 CH34637), Anaheim, CA USA, 1994; 8~ 13: 346
- 5 高劭宏,王振霄,刘学龙 *et al.* 第三次俄中激光物理研讨会论文,俄罗斯,克拉斯诺雅尔斯克. 1996年10月
- 6 Yang T T, Gylys V T, Bower R D *et al.* J O S A, 1992; B9(8): 1272~ 1277
- 7 Xing D, Ueda K, Takuma H. Jpn J A P, 1991; 30(6A): L1012~ L1014
- 8 Kubodera S, Sauerbrey R. Opt Commun, 1992; 94(6): 515~ 520
- 9 Xing D, Wang Q, Tan S *et al.* A P L, 1997; 71(18): 2584~ 2586
- 10 Xing D, Ueda K, Takuma H. A P L, 1991; 59(9): 1028~ 1030
- 11 Xing D, Ueda K, Takuma H. SPIE, 1994; 2321: 731~ 735
- 12 Lawless J L, Lo D. Appl Phys, 1995; B60(103): 391~ 403
- 13 Lo D, Lawless J L. Opt Commun, 1991; 86(2): 151~ 155
- 14 Kochetov I V, Napartovich A P, Lo D *et al.* A P L, 1994; 65(15): 1888~ 1890
- 15 Zhou C, Wang Q, Wang Z *et al.* SPIE, 1992; 1726: 544~ 547
- 16 Wang Q, Zhou C, Ma Z. Appl Phys(B) Lasers Opt, 1995; B61(3): 301~ 304
- 17 王骥,姚勇,周赤 *et al.* 强激光与粒子束, 1992; 4(3): 397~ 404
- 18 Schumann M, Langhoff H. J Chem Phys, 1994; 101(6): 4769~ 4777
- 19 Langhoff H. Opt Commun, 1988; 68(1): 31~ 34
- 20 Klein G, Carvalho M J. J Phys B: At Mol Phys, 1981; 14: 1283~ 1290
- 21 Krotz W, Ulrich A, Busch B *et al.* Phys Rev, 1991; A43(11): 6089~ 6094
- 22 Cachoncinlle C, Pouvesle J M, Durand G *et al.* J Chem Phys, 1992; 96(8): 6093~ 6103
- 23 Cachoncinlle C, Pouvesle J M, Durand G *et al.* J Chem Phys, 1992; 96(8): 6085~ 6092
- 24 Daskalopoulou M, Peyerimhoff S D. Mol Phys, 1993; 79(5): 985~ 994
- 25 Boichenko A M, Derzhiev V I, Zhilkov A G *et al.* Sov J Q E, 1991; 21(12): 1305~ 1309
- 26 Amirov A K, Korshunov O V, Chinnov V F. J Phys B: At Mol Phys, 1994; 27(9): 1753~ 1771
- 27 Robert E, Khacef A, Cachoncinlle C *et al.* Opt Commun, 1995; 117~ 188
- 28 Sliwinski G, Brressler C, Schwentner N. Phys Status Solid B, 1996; 193: 247~ 256
- 29 Delaponte P, Voitik M, Sentis M. A P L, 1997; 70(19): 2526~ 2528
- 30 Moeller S, Guttler P. J Lumin, 1997; 72~ 74: 881~ 882

* * *

作者简介:高劭宏,男,1959年出生。博士生。主要从事离子准分子的研究。