

文章编号: 0253-2239(2003)03-0321-05

# 激光偏振参量对光场感生电离电子碰撞机制等离子体 电离参量的影响\*

陈建新 王 骥 夏元钦 陈德应

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

**摘要:** 以基于光场感生电离电子碰撞机制的类钡氙系统为例, 计算并讨论了不同抽运激光偏振对等离子体的电离速率、阈值激光强度、电子在激光场中的剩余能量、各电荷态相对集居数、初始电子能量分布等电离参量的影响, 计算结果表明, 在相同的激光功率密度下, 激光偏振对类钡氙  $41.8 \text{ nm } 4d^9 5d^1 S_0 - 4d^9 5p^1 P_1$  跃迁的 X 射线激光放大影响很大, 圆偏振激光抽运更有利于类钡氙  $41.8 \text{ nm } 4d^9 5d^1 S_0 - 4d^9 5p^1 P_1$  跃迁的 X 射线激光放大的实现。

**关键词:** 激光物理; 电子碰撞机制; 类钡氙系统; 电离参量; 偏振参量

中图分类号: O437 文献标识码: A

## 1 引 言

20 世纪 80 年代中期以来, 基于啁啾脉冲放大 (CPA) 技术的脉宽可以短于 10 fs, 脉冲能量可以大于 100 mJ, 激光强度可以达到  $10^{20} \text{ W/cm}^2$  以上的紧凑型超短脉冲、超高功率激光器的出现, 为发展台式 X 射线激光的研究提供了理想的驱动源。其中 1988 年<sup>[1]</sup> 和 1989 年<sup>[2]</sup> 加拿大的 Corkum、Burnett 提出的基于强激光场的光场感生电离 (OFI) 的复合机制和电子碰撞机制是近年来被认为很有希望实现台上 X 射线激光的新的抽运机制。1994 年, 美国斯坦福大学的 Harris 小组<sup>[3]</sup> 首次发表了光场感生电离的电子碰撞激发机制的三个系统类氩氙 (Ar IX)、类镍氙 (Kr IX) 和类钡氙 (Xe IX) 的理论计算结果, 该研究小组于 1995 年成功地获得了类钡氙  $41.8 \text{ nm } 4d^9 5d^1 S_0 - 4d^9 5p^1 P_1$  跃迁的 X 射线激光放大<sup>[4]</sup>。随后的几年中, 人们对类镍氙 (Kr IX) 系统进行了大量理论计算和对类钡氙 (Xe IX) 系统进行了许多实验研究<sup>[5~7]</sup>。2001 年法国的 Sebban 小组报道了基于光场感生电离电子碰撞激发机制类钡氙  $41.8 \text{ nm}$  软 X 射线饱和激光放大, 获得的增益长度积的值达到  $15^{[8]}$ 。这是迄今为止光场感生电离的 X 射线激光研究中所达到的最大的增益长度积和最高的重复频率。在文献<sup>[8]</sup>中, 实验上专门研究了基于光场感生电离的电

子碰撞机制类钡氙系统中椭圆偏振光对输出信号强弱的影响。目前在对基于光场感生电离的电子碰撞机制的实验研究中<sup>[4,8]</sup>, 大多采用高重复频率的掺钛蓝宝石激光系统作为驱动源, 此类激光器出射的激光为水平线偏振, 为了产生高能电子, 通常使用 1/4 波片使出射激光变为圆偏振光。实验中, 由于抽运激光入射方向与 1/4 波片并非正好垂直, 经 1/4 波片出射的激光不是圆偏振光, 而是有一定椭圆率的椭圆偏振光。以往的理论研究中, 对抽运激光偏振的计算主要集中在在线偏振和圆偏振上。而对于基于光场感生电离电子碰撞机制的系统来说, 由于实验的原因, 椭圆偏振对它们的影响也很大, 因此, 本文在以往对基于光场感生电离线偏振激励低密度等离子体电离参量研究的基础上<sup>[9,10]</sup>, 以基于光场感生电离电子碰撞机制的类钡氙系统为例, 计算并讨论了不同抽运激光偏振参量对等离子体的电离速率、阈值激光强度、电子在激光场中的剩余能量、各电荷态相对集居数、初始电子能量分布等电离参量的影响, 从而得出抽运激光偏振参量对实现类钡氙  $41.8 \text{ nm } 4d^9 5d^1 S_0 - 4d^9 5p^1 P_1$  跃迁的 X 射线激光放大的影响。

## 2 等离子体电离参量计算

### 2.1 电离速率

电离速率是计算所有等离子体电离参量的基础。对强场电离进行描述的众多理论模型中, 1986 年, 由 Ammosov, Delone 和 Krainov 等<sup>[11]</sup> 提出的准静态隧道电离模型 (即 ADK 模型) 与实验上测量

\* 国家 863 高技术激光技术主题 [863-410-3-9(J)] 和国家自然科学基金 (60078010) 资助课题。

E-mail: jianxchen@163.com

收稿日期: 2001-11-16; 收到修改稿日期: 2002-04-26

的结果符合得很好<sup>[12,13]</sup>,而且该模型相对于非微扰理论等理论模型形式简单,因此本文有关强场电离的理论计算都基于这个模型。该模型给出的圆偏振激光和椭圆偏振激光场中电子的电离速率为

$$W_{st} = \frac{3e}{2\pi} \frac{Z^2}{n^{*4}} \left( \frac{4eZ^3 E_B}{n^{*4} E} \right)^{2n^*-1} \times \exp \left[ -\frac{2}{3} \left( \frac{E_i}{E_H} \right)^{3/2} \frac{E_B}{E} \right] \omega_0, \quad (1)$$

其中  $n^*$  是有效量子数 [ $n^* = Z/(E_i/E_H)^{1/2}$ ],  $Z$  是电离离子的价数,  $E_H$  是氢原子原子的电离能 ( $E_H = 13.6 \text{ eV}$ ),  $E_i$  为  $Z$  阶离子的电离能,  $\omega_0$  是频率的原子单位 ( $\omega_0 = 4.1 \times 10^{16} \text{ s}^{-1}$ ),  $E_B$  是氢原子在第一玻尔半径处的原子场强 ( $E_B = 5.1 \times 10^9 \text{ V/cm}$ )。

目前在基于光场感生电离的电子碰撞机制的 X 射线激光实验研究中<sup>[14,8]</sup>, 大部分采用高重复频率、超短脉冲、超高功率的掺钛蓝宝石激光系统作为驱动源。此类激光器出射的激光脉冲为高斯型或双曲正割型, 所以电离时刻的激光强度和电场强度的值随时间而变化。当激光脉冲为双曲正割型脉冲时, 电场强度随时间变化的表达式为

$$E(t) = E_0 \operatorname{sech} \left[ \frac{1.76(t - t_{\max})}{\tau_p} \right] \times \sqrt{\sin^2 \alpha t + \alpha^2 \cos^2 \alpha t}, \quad (2)$$

其中  $\alpha$  是偏振参量, 当  $\alpha = 1$  时, 为圆偏振光场;  $0 < \alpha < 1$  时, 为椭圆偏振光场。

本文利用(1)式和(2)式分别计算了偏振参量为 1 的圆偏振和偏振参量为 0.6 的椭圆偏振 ( $I_0 = 4 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ ,  $\tau_p = 1.05 \times 10^{-13} \text{ s}$ ) 时, XeI 至 XeIX 电离速率随时间变化的曲线, 结果如图 1、图 2 所示。从图中可以看到, 激光偏振参量对各电荷态的电离速率随时间变化是有影响的, 在相同的激光功率密度下, 随着偏振参量值的减小, 在电离时刻的峰值处 (210 fs), XeVII 至 XeII 的电离速率依次达到最大值。

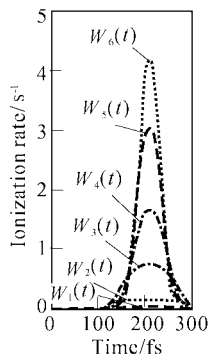


Fig. 1 The ionization rate as the function of the time for the polarized parameter being 1

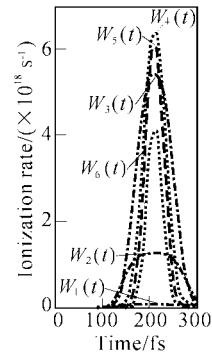


Fig. 2 The ionization rate as the function of the time for the polarized parameter being 0.6

## 2.2 阈值激光强度

电离所需的阈值激光强度  $I_{th}$  或临界激光强度  $I_c$ , 较常用的定义是, 脉冲持续时间  $\tau_p$  内的电离几率大于等于 1 时所需的激光强度。即:  $P = W \times \tau_p \geq 1$ 。此外, 阈值激光强度还可以简单地由 Augst 等<sup>[14]</sup> 提出的一维准经典库仑势垒压制电离 (BSI) 模型来估算。将电离能为  $E_i$  的原子电离到电荷态  $Z$  所需的激光强度为

$$I_{th} = 4.0 \times 10^9 E_i^4 / Z^2. \quad (3)$$

图 3 给出了用准静态隧道电离模型和势垒压制电离模型计算的 XeI 至 XeIX 圆偏振光场的阈值激光强度与电离能的关系。从图中可以看到, 电离氙的九价离子需要的激光强度大约是电离氙的八价离子所需激光强度的 7 倍。这将有利于在某一激光强度下, 氙的八价离子的产生, 使得激光产生的等离子体的主要成分为氙的八价离子。

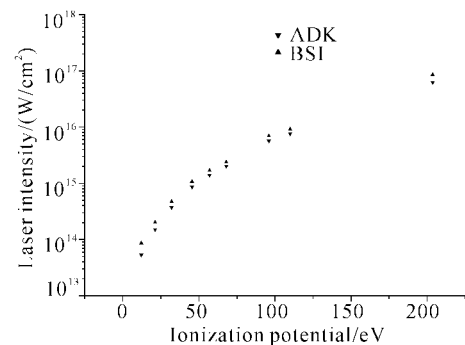


Fig. 3 Calculated threshold laser intensities as the function of the ionization potential

## 2.3 电子剩余能随时间的变化

1989 年 Corkum 和 Burnett 等<sup>[15,16]</sup> 在准经典极限  $h\nu \ll E_{ion} \ll U_p$  条件下, 提出了一个准经典阈上电离理论模型, 较好地解释了光场感生电离产生电子的阈上电离能以及不同偏振光场下电子能量的不同。因此本文有关强场电离产生的电子能量的计算

都基于 Corkum 和 Burnett 等人提出的准经典阈上电离理论模型,此模型给出的单个电子在激光场中的剩余能量(阈上电离能)为

$$\epsilon = 2U_p [\cos^2 \omega t + a \sin^2 \omega t] / (1 + a^2), \quad (4)$$

其中  $U_p$  为激光场中的有质动力势,其表达式为

$$U_p = 9.33 \times 10^{-14} I_0 \operatorname{sech}^2 \left[ \frac{1.76(t - t_{\max})}{\tau_p} \right] \lambda^2, \quad (5)$$

图 4 和图 5 分别给出了偏振参量为 1 的圆偏振和偏振参量为 0.6 的椭圆偏振光场电离电子阈上电离能随电离时刻的变化曲线。

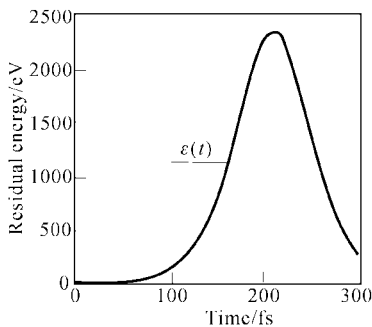


Fig. 4 The residual energy as the function of the time for the polarized parameter being 1

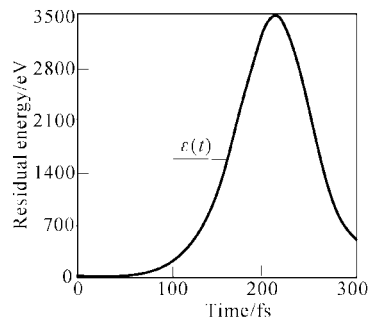


Fig. 5 The residual energy as the function of the time for the polarized parameter being 0.6

### 2.4 各电荷态相对集居数随时间的变化

在原子的电离为电子碰撞电离的情况下,各电荷态相对集居数随时间的演变规律可由下列一阶耦合微分方程组给出:

$$\left. \begin{aligned} \dot{N}_1(t) &= W_1[E(t)]N_0(t), \\ &\dots\dots \\ \dot{N}_j(t) &= W_j[E(t)]N_{j-1}(t) - \\ &\quad W_{j+1}[E(t)]N_j(t), \\ &\dots\dots \\ \dot{N}_{Z_{\max}}(t) &= W_{Z_{\max}}[E(t)]N_{Z_{\max}-1}(t), \\ \sum_{j=0}^{Z_{\max}} N_j(t) &= 1, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

用四阶龙格-库塔法或吉尔法对上述耦合微分方程组进行数值求解,可得到每一时刻的各组分相对集

居数。

图 6 给出了激光强度为  $4 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$  氙的中性原子及前八个离子电荷态相对集居数随时间的变化曲线。 $z^{(0)}$  指时间,  $z^{(1)}, \dots, z^{(9)}$  指氙的中性原子及前八个离子电荷态相对集居数,  $M(t)$  指归一化的激光电场强度。从图中可以看到,随着时间的推移,各阶电荷态依次出现,相应的相对集居数从小于 1 逐渐增大到 1,在电离时刻的峰值处(210 fs),氙的八价离子的相对集居数最终成为等离子体中唯一的成分,这正是实验中所要求的等离子体成分。作进一步的数值计算得出,圆偏振激光激励等离子体中唯一的成分为氙的八价离子需要的最低激光功率密度为  $2.3 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ ,最高功率密度为  $9.6 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ 。

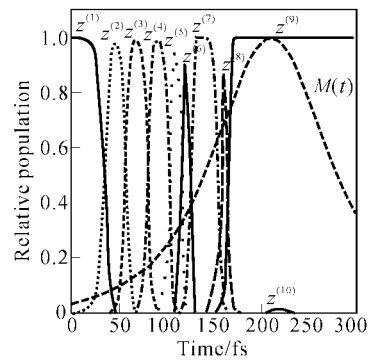


Fig. 6 Evolution of the relative population of the change state in Xe for the polarized parameter being 1

为了说明偏振参量对各组分相对集居数的影响,图 7 给出了激光强度为  $4 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ 、偏振参量为 0.6 的椭圆偏振光场中,各组分相对集居数随时间的变化曲线。从图中可以看到,在相同的激光功率密度下,当偏振参量为 0.6 时,等离子体的成分是氙的八价离子和七价离子的组合,这不利于类钡氙  $41.8 \text{ nm } 4d^9 5d^1 S_0 - 4d^9 5p^1 P_1$  跃迁的 X 射线激光放大。

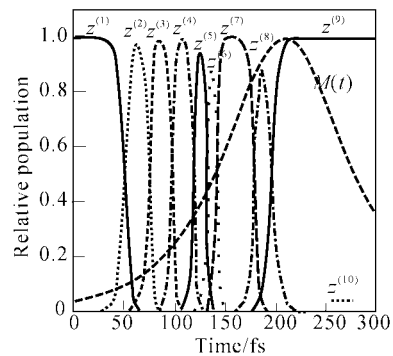


Fig. 7 Evolution of the relative population of the charge state in Xe for the polarized parameter being 0.6

## 2.5 初始电子能量分布

在基于光场感生电离电子碰撞机制的 X 射线激光研究中,电子能量(或温度)是一个至关重要的参量。在以往的研究中发现,由超短脉冲作用下的光场感生电离产生的电子能量分布远不同于稳态的麦克斯韦分布<sup>[17~19]</sup>,因此,仅用通常的平均电子能

量已不能充分描述远离平衡态的光场感生电离等离子体。因此,本文给出电离电子的初始能量分布曲线。关于椭圆偏振光场电离产生电子能量分布的模型建立及详细推导过程将另文介绍,这里给出最终的计算公式及计算结果:

$$\frac{dn(t)}{d\varepsilon(t)} = \frac{dn(t)}{dt} \bigg/ \frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \frac{\sum_{j=1}^{Z_{\max}} W_j [E(t)] N_{j-1}(t)}{\varepsilon(t) \{ \omega(\alpha^2 - 1) \sin 2\omega t / (\cos^2 \omega t + \alpha^2 \sin^2 \omega t) - 3.52 \tanh[1.76(t - t_{\max})/\tau_p] / \tau_p \}} \quad (7)$$

由(7)式分别计算了激光强度为  $4 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ , 偏振参量为 1 和 0.6 时氙的初始电子能量分布曲线,结果如图 8、图 9 所示。

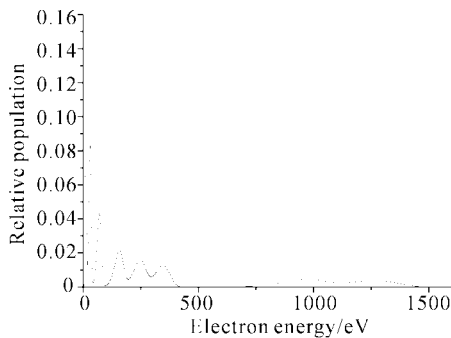


Fig. 8 Calculated initial electron energy distribution produced in Xe for the polarized parameter being 1

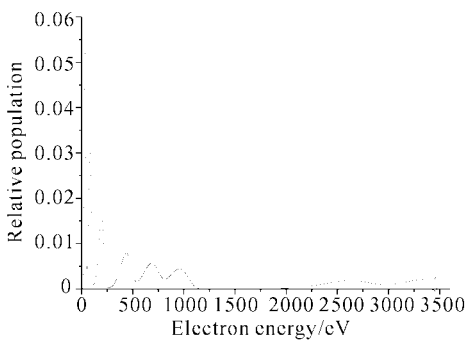


Fig. 9 Calculated initial electron energy distribution produced in Xe for the polarized parameter being 0.6

从图中可以看到,当偏振参量为 0.6 时,初始电子能量分布曲线中第八个显著的峰没有完全形成。为了进一步研究偏振参量对实现类钡氙  $41.8 \text{ nm } 4d^9 5d^1 S_0 - 4d^9 5p^1 P_1$  跃迁的 X 射线激光放大的影响,我们计算了激光功率密度分别为

$4 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ , 偏振参量从 0.2 到 1 的 Xe IX 等离子体中初始电子能量分布,图 10 中给出了等离子体初始电子能量分布曲线,其中可以看到形成第八个峰的相对粒子数随偏振参量变化的情况。从图 10 中还可以看到,当偏振参量为 0.5 时,已经不能实现类钡氙  $41.8 \text{ nm } 4d^9 5d^1 S_0 - 4d^9 5p^1 P_1$  跃迁的 X 射线激光放大。

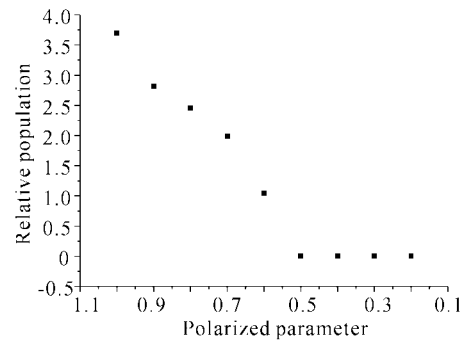


Fig. 10 Relative population as the function of the polarized parameter

**结论** 通过对基于光场感生电离电子碰撞机制的类钡氙系统的不同抽运激光偏振参量对等离子体的电离速率、阈值激光强度、电子在激光场中的剩余能量、各电荷态相对集居数、初始电子能量分布等电离参量影响的计算和分析,得出了在激光功率密度为  $4 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$  时,圆偏振激光抽运更有利于类钡氙  $41.8 \text{ nm } 4d^9 5d^1 S_0 - 4d^9 5p^1 P_1$  跃迁的 X 射线激光放大,在偏振参量为 0.5 的椭圆激光抽运下,将不能实现类钡氙  $41.8 \text{ nm } 4d^9 5d^1 S_0 - 4d^9 5p^1 P_1$  跃迁的 X 射线激光放大。

## 参 考 文 献

1 Corkum P B, Burnett N H. Short-wavelength coherent

- radiation; Generation and applications. *OSA Proc. Series*, 1988, **2**:225
- 2 Burnett N H, Corkum P B. Cold-plasma production for recombination extreme ultra violet lasers by optical-field-induced ionization. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1989, **6**(6): 1195~1199
  - 3 Lemoff B E, Barty C P J, Harris S E. Femtosecond-pulse-driven electron-excited XUV lasers in eight-times-ionized noble gases. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(8):569~571
  - 4 Lemoff B E, Yin G Y, Gordon III C L *et al.*. Demonstration of 10-Hz femtosecond-pulse-driven XUV laser at 41.8 nm in Xe IX. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **74**(9):1574~1577
  - 5 Wang Qi, Zhang Shanshan, Lu Xingfa *et al.*. Parameter study of optical-field ionized Kr IX plasma. *Acta Optica Sinica (光学学报)*, 1999, **19**(2):201~205 (in Chinese)
  - 6 Maya O, Midorikawa K. Ultrahigh gain Ni-like Krypton X-ray laser with optical field ionization. *X-Ray Laser Workshop*, 1999, Osaka Univ., Feb. 8~9, 1999, 8~11
  - 7 Lu Peixiang, Nakano H, Nishikawa T *et al.*. Study of commercial terawatt femtosecond laser-driven table-top X-ray lasers in gases. *Proc. SPIE*, 1999, **3886**:86
  - 8 Sebban S, Haroutunian R, Balcou P *et al.*. Saturated amplification of a collisionally pumped optical-field-ionization soft X-ray laser at 41.8 nm. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **86**(2):3004~3007
  - 9 Chen Jianxin, Wang Qi, Xia Yuanqin *et al.*. Ionization parameter study of optical-field-ionized B-like-N system at low density. *Acta Optica Sinica (光学学报)*, 2002, **22**(4):432~435 (in Chinese)
  - 10 Wang Qi, Chen Jianxin, Xi Yuanqin, Chen Deying. The study of the electron energy distribution driven by elliptical polarized laser. *Acta Physica Sinica (物理学报)*, 2002, **51**(5):1035~1039 (in Chinese)
  - 11 Ammosov M V, Delone N B, Krainov V P. Tunnel ionization of complex atomic ions in an alternating electromagnetic field. *Sov. Phys. JETP*, 1986, **64**(6): 1191~1194
  - 12 Glover T E, Donnellu T D, Lipman E A *et al.*. Subpicosecond Thomson scattering measurements of optically ionized Helium plasmas. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **73**(1):78~81
  - 13 Augst S, Meyerhofer D D, Strickland D. Laser ionization of noble gases by Coulomb-barrier suppression. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1991, **8**(4):858~867
  - 14 Augst S, Strickland D, Meyerhofer D D *et al.*. Tunneling ionization of noble gases in a high-intensity laser field. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, **63**(20):2212~2215
  - 15 Burnett N H, Corkum P B. Cold-plasma production for recombination extreme ultra violet lasers by optical-field-induced ionization. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1989, **6**(6): 1195~1199
  - 16 Corkum P B, Burnett N H, Brunel F. Above-threshold ionization in the long-wavelength limit. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, **62**(11):1259~1262
  - 17 Pretzler G, Fill E E. X rays from optical-field ionized plasmas at low density. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(10):733~735
  - 18 Lu Peixiang, Nakano H, Nishikawa T *et al.*. Study of commercial terawatt femtosecond laser-driven table-top X-ray lasers in gases. *Proc. SPIE*, 1999, **3886**
  - 19 Shao Y F, Rose S J, Djaoui A. Numerical simulation of optically ionized Li-like neon plasma recombination X-ray lasers. *Chinese J. Computational Physics*, 1996, **13**(4):455~458 (in Chinese)

## Influence of Laser Polarization Parameter on the Plasma Ionization Parameter Based on Electron Collisional Scheme of Optical-Filed Ionization

Chen Jianxin Wang Qi Xia Yuanqin Chen Deying

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

(Received 16 November 2001; revised 26 April 2002)

**Abstract:** The influence of laser polarization on the ionization parameters of Pd-like Xe system including ionization rate, threshold intensity, residual energy in the laser field, relative population and original electron energy distribution are calculated and discussed. During calculation, the electron energy distribution based our establishing model is used. The calculated results show that laser polarization significantly effects the amplification of 41.8 nm  $4d^9 5d^1 S_0 - 4d^9 5p^1 P_1$  of Pd-like Xe and circular polarization is in favor of realizing the amplification of X-ray laser at the same laser intensity.

**Key words:** laser physics; electron collisional scheme; Pd-like-Xe system; ionization parameters; polarized parameter