

类镍氪 32.8 nm 激光系统的增益特性理论研究

赵永蓬 江水森 丁宇洁 李连波 崔怀愈 姜 杉

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要 为了研究类镍氪 32.8 nm 激光输出所需的等离子体状态,利用 Cowan 程序计算了类镍氪 32.8 nm 激光系统的有关原子参数。根据能级参数,建立并求解了准稳态近似下的有关能级速率方程,计算获得了激光上、下能级的相对粒子数密度和相对增益系数随电子温度和电子密度的变化规律,并分析了 $3d^9 4p$ 、 $3d^9 4d$ 和 $3d^9 4f$ 组态的能级对激光产生的影响。通过理论计算得到实现类镍氪 32.8 nm 激光输出所需的最佳等离子体状态。最佳电子温度约为 75 eV,最佳电子密度约为 10^{18} cm^{-3} 。计算结果为未来开展毛细管放电抽运类镍氪 32.8 nm 激光实验提供了理论依据。

关键词 原子与分子物理学; 类镍氪; 软 X 射线激光; 32.8 nm; 相对增益系数; 电子密度; 电子温度

中图分类号 O434 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.0702001

Theoretical Research on Characteristics of the Gains in Nickel-Like Krypton 32.8 nm Laser System

Zhao Yongpeng Jiang Shuisen Ding Yujie Li Lianbo Cui Huaiyu Jiang Shan

(National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract In order to study the plasma state for Ni-like Kr 32.8 nm laser, the atomic parameters of the Ni-like Kr 32.8 nm laser system are calculated with Cowan physical code. Based on the level parameters, the rate equations of energy level are established and solved under the quasi-steady-state approximation. The relative population density and the relative gain coefficient between the upper and lower levels of the laser are calculated with different electron temperatures and electron densities. The influence of the sub-levels of $3d^9 4p$, $3d^9 4d$ and $3d^9 4f$ configurations on laser generation is analyzed as well. The optimum plasma state for Ni-like Kr 32.8 nm laser generation is obtained through theoretical calculation. The best electron temperature is about 75 eV and the optimum electron density is about 10^{18} cm^{-3} . These calculation results provide theoretical foundation for the experiment of Ni-like Kr 32.8 nm laser pumped by capillary discharge in the future.

Key words atomic and molecular physics; Ni-like Kr; soft X-ray laser; 32.8 nm; relative gain coefficient; electron density; electron temperature

OCIS codes 140.3430; 140.7240; 340.7480

1 引 言

自从 1994 年 Rocca 等^[1]成功获得了毛细管放电抽运类氪 46.9 nm 软 X 射线激光以来,世界上已有许多研究小组在该研究领域进行积极探索,取得了许多丰硕成果。目前,采用毛细管放电抽运电

子碰撞方案已经实现了类氪 46.9、69.8、72.6 nm^[1-3],类氪硫 60.8 nm^[4]和类氪氯 52.9 nm^[5]的软 X 射线激光的输出。然而,采用毛细管放电抽运电子碰撞方案实现的软 X 射线激光的最短波长一直停留在 46.9 nm,极大地阻碍了该

收稿日期: 2014-01-08; 收到修改稿日期: 2014-02-09

基金项目: 国家自然科学基金(61078034,61275139)

作者简介: 赵永蓬(1973—),男,博士,教授,主要从事软 X 光激光和极紫外光源等方面的研究。

E-mail: zhaoy3@hit.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

方案的发展。因此探索实现更短波长的软 X 射线激光输出的可能性,具有重要的意义。要想产生更短波长的软 X 射线激光,可选择更高 Z 值的气体介质,所以本文开展了类镍氪 32.8 nm 激光的理论研究,以指导未来的毛细管放电 32.8 nm 激光实验研究。采用光场感生电离 (OFI) 方案进行类镍氪 32.8 nm 软 X 射线激光研究,已经取得一定进展。1994 年 Lemoff 等^[6] 在理论上计算了类镍氪 32.8 nm 激光的增益系数为 $7.5 \sim 94 \text{ cm}^{-1}$, 预言了该激光产生的可能性; 2002 年 Sebban 等^[7] 在世界上首次采用 OFI 方案成功实现了类镍氪 32.8 nm 软 X 射线激光输出; 2009 年 Lin 等^[8] 采用 OFI 方案实现了类镍氪 32.8 nm 软 X 射线激光的饱和输出。毛细管放电抽运电子碰撞方案与 OFI 方案相比,具有激光光束质量好、增益长度积长、能量转换效率高和装置结构简单等优点,但是该方案在激光的实现上要比 OFI 方案困难很多。如何有效控制等离子体的状态是实现毛细管放电抽运类镍氪 32.8 nm 激光输出的关键。在毛细管放电抽运方案中对于等离子体电子温度、电子密度和离子温度、离子密度等状态的控制要远比 OFI 方案复杂得多,这是因为该方案中通过 Z 箍缩最终形成的等离子体状态与毛细管直径、毛细管管壁烧蚀物质、放电电流幅值、放电电流上升沿、初始气压和初始等离子体状态等诸多因素有关。目前,国际上对实现类镍氪 32.8 nm 激光输出所需的等离子体状态,还没有详细的理论计算。因此,从理论上研究类镍氪 32.8 nm 激光系统的能级粒子数分布和增益特性,对于有效控制等离子体的状态具有指导作用,也为进行毛细管放电抽运类镍氪 32.8 nm 激光实验提供理论依据,对于今后的实验工作有着十分重要的意义。

2 类镍氪 32.8 nm 激光系统的相关原子参数的计算

利用 Cowan 程序,适当选择其各控制卡参量,系统计算了类镍氪 32.8 nm 激光系统的相关原子参数,包括类镍氪 32.8 nm 激光系统的能级、能级

间能量间隔、能级间的辐射跃迁波长、振子强度、自发辐射衰减速率、电子碰撞激发截面、电子碰撞激发速率系数及消激发速率系数等。

考虑和类镍氪 32.8 nm 激光跃迁有关的 $3d^{10}$ 、 $3d^9 4p$ 、 $3d^9 4d$ 和 $3d^9 4f$ 这 4 个组态的能级,其中类镍氪 32.8 nm 激光上能级为 $3d^9 4d \ ^1S_0$, 激光下能级为 $3d^9 4p \ ^1P_1$, 基态能级为 $3d^{10} \ ^1S_0$, 类镍氪 32.8 nm 激光系统的能级跃迁如图 1 所示。利用 Cowan 程序计算了 $3d^{10}$ 组态对应一个能级 1S_0 , $3d^9 4p$ 组态对应 3D_2 、 3D_1 、 1D_2 、 1P_1 、 3P_0 、 3D_3 、 3F_2 、 3P_1 、 3F_4 、 3P_2 和 3F_3 共 11 个能级, $3d^9 4d$ 组态对应 3S_1 、 3P_2 、 1P_1 、 3D_3 、 3G_3 、 1D_2 、 3P_1 、 3D_1 、 3F_2 、 3F_3 、 3P_0 、 1S_0 、 3G_4 、 3F_4 和 3G_5 共 15 个能级, $3d^9 4f$ 组态对应 3P_1 、 3P_2 、 1D_2 、 3D_3 、 1F_3 、 3D_1 、 3D_2 、 3F_2 、 3F_3 、 3G_3 、 1P_1 、 3F_4 、 1G_4 、 3H_4 、 3G_4 、 3H_5 、 3G_5 、 3P_0 和 3H_6 共 19 个能级, 这 4 个组态对应的全部能级共 46 个。表 1 给出了激光上、下能级和基态能级间的跃迁参数, 其中 g_f 、 A_s 、 ΔE 和 λ 分别表示振子强度、自发辐射速率、能级间能量间隔和跃迁波长。由于从 $3d^9 4d \ ^1S_0$ 能级到 $3d^{10} \ ^1S_0$ 能级的跃迁为光学禁戒跃迁, 而且自发辐射速率非常小, 所以表 1 没有给出该跃迁的自发辐射速率和跃迁波长。从表 1 可知, 计算所得的由激光上能级 $3d^9 4d \ ^1S_0$ 向激光下能级 $3d^9 4p \ ^1P_1$ 跃迁产生激光波长为 32.80 nm, 这与 Sebban 等^[7] 实验获得的类镍氪软 X 射线激光波长一致。

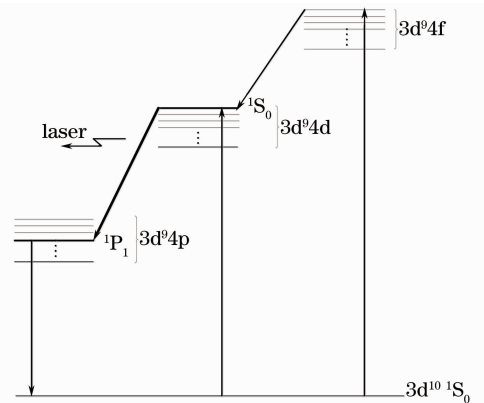


图 1 类镍氪 32.8 nm 激光系统的能级跃迁示意图
Fig. 1 Schematic diagram of energy level transitions in the Ni-like Kr 32.8 nm laser system

表 1 激光上、下能级和基态能级间的跃迁参数

Table 1 Parameters of energy level transitions between the upper, lower and ground levels

| Energy level transition | g_f | A_s / s^{-1} | $\Delta E / \text{cm}^{-1}$ | λ / nm |
|--|---------|------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| $3d^9 4p \ ^1P_1 \sim 3d^{10} \ ^1S_0$ | 0.62566 | 3.051×10^{11} | 855078.2 | 11.69 |
| $3d^9 4d \ ^1S_0 \sim 3d^{10} \ ^1S_0$ | 3.97550 | — | 1159947.4 | — |
| $3d^9 4d \ ^1S_0 \sim 3d^9 4p \ ^1P_1$ | 0.70514 | 4.371×10^{10} | 304869.1 | 32.80 |

3 激光上、下能级粒子数和增益的理论计算和分析

对处于第 i 激发态的 m 价离子,其能级速率方程为

$$\frac{dN_i^m}{dt} = \sum_{j=i+1}^{n_m} (A_{j,i}^m + n_e C_{j,i}^m) N_j^m + \sum_{j=g}^{i-1} n_e C_{j,i}^m N_j^m - \sum_{j=g}^{i-1} (A_{i,j}^m + n_e C_{i,j}^m) N_i^m - \sum_{j=i+1}^{n_m} n_e C_{i,j}^m N_i^m, \quad (1)$$

式中 N_i^m 表示第 i 激发态的粒子数密度, g 表示基态, n_m 表示 m 价离子的最后一个激发态, n_e 表示电子密度, $A_{i,j}^m$ 表示自发辐射速率, $C_{i,j}^m$ 和 $C_{j,i}^m$ 表示电子碰撞激发速率系数或消激发速率系数。

由于离子的激发态寿命短,因而它们之间的平衡是容易建立的。计算时,采用准稳态近似,即

$$\frac{dN_i^m}{dt} = 0. \quad (2)$$

根据 Kim 等^[9]报导的速率方程求解方法,对各能级粒子数密度进行如下归一化处理:

$$\sum_{i=g}^{n_m} M_i = 1, \quad (3)$$

式中 M_i 为相对粒子数密度,表示每个能级的粒子数密度 N_i^m 占总粒子数密度 N_1 的比例,其表达式为

$$M_i = \frac{N_i^m}{N_1}. \quad (4)$$

根据(2)、(3)、(4)式,求解(1)式即可得到各个能级分布的相对粒子数密度 M_i ,进而可计算得到激光上、下能级跃迁的相对增益系数为

$$G_{ul}/N_1 = 2.03 \times 10^{-31} \times$$

$$A_{ul} \lambda_{ul}^3 \frac{1}{T_e^{1/2}} g_u \left(\frac{M_u}{g_u} - \frac{M_l}{g_l} \right) (\text{cm}^{-4}), \quad (5)$$

式中 u 表示激光上能级, l 表示激光下能级, G_{ul} 表示激光上下能级跃迁的增益系数, A_{ul} 表示激光上下能级间的自发辐射速率, λ_{ul} 表示激光上、下能级跃迁产生激光的波长, T_e 表示电子温度, g_u 和 g_l 分别表示激光上、下能级的统计权重。

Kim 等^[9]采用与本文相同的方法,计算了类氦系统的粒子数分布和增益特性,计算结果表明 $3p^1 S_0 \sim 3s^1 P_1$ (46.9 nm)、 $3p^3 P_2 \sim 3s^1 P_1$ (69.8 nm) 和 $3p^3 D_2 \sim 3s^3 P_1$ (72.6 nm) 跃迁在电子密度 $10^{18} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 范围内有较大的相对增益,可能获得激光输出。实验上采用毛细管放电抽运方案,已获得了 46.9、69.8、72.6 nm^[1-3] 激光输出,与上述理论计算结果相符。此外, Rocca 等^[10] 获得类氦 46.9 nm 激光时,电子密度在 $3 \times 10^{18} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 范围内,也与理论计算结果相符。由于 Kim 等^[9] 的理论计算结果与实验结果相符,表明本文采用的理论计算方法是合理的。

在理论计算过程中,对以下三种情况进行了分析:只考虑类镍氦 32.8 nm 激光系统的激光上能级 $3d^9 4d^1 S_0$ 、激光下能级 $3d^9 4p^1 P_1$ 和基态能级 $3d^{10} S_0$ 这 3 个能级;不考虑 $3d^9 4f$ 组态,只考虑组态 $3d^{10}$ 、 $3d^9 4p$ 和 $3d^9 4d$ 的 27 个能级;考虑这 4 个组态上的全部 46 个能级。当电子温度为 75 eV 时,在这三种情况下激光上能级 $3d^9 4d^1 S_0$ 和激光下能级 $3d^9 4p^1 P_1$ 的相对粒子数密度和相对增益系数随电子密度的变化曲线分别如图 2 和图 3 所示。图 2 表明随着电子密度的增加,激光上下能级的相对粒子数密度均增加,在电子密度大于 10^{17} cm^{-3} 以后,激光上能级的相对粒子数密度趋于饱和。图 3 结果表明,相对增益系数存在极值,因此存在最佳的电子密度。从图 2 和图 3 还可以看出,第一种情况的曲线和其他两种情况的曲线对比相差很大,这说明除了激光上、下能级和基态能级以外的其他能级对于激光上、下能级粒子数分布以及增益也有很大影响,不能忽略。

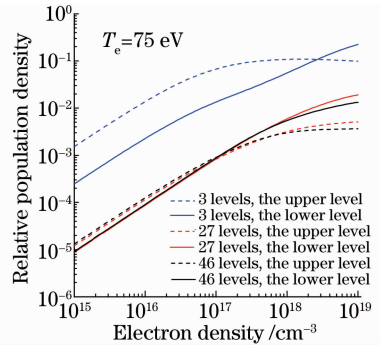


图 2 三种不同情况下相对粒子数密度与电子密度的关系
Fig. 2 Relationships between relative population density and electron density under three different situations

为了分析 $3d^9 4p$ 、 $3d^9 4d$ 和 $3d^9 4f$ 这三个组态上除了激光上、下能级和基态能级以外的其他 43 个能级对激光能级的影响,在考虑激光上能级、激光下能级和基态能级的基础上,逐一添加其他 43 个能级进行计算分析。计算结果表明,从基态能级 $3d^{10} S_0$ 到 $3d^9 4f$ 组态能级的电子碰撞激发速率很小,但电子碰撞消激发速率和自发辐射速率相对较大,极少数的粒子会布居到 $3d^9 4f$ 组态的能级上,因此该组态对激光上、下能级和基态能级的粒子数影响很小。

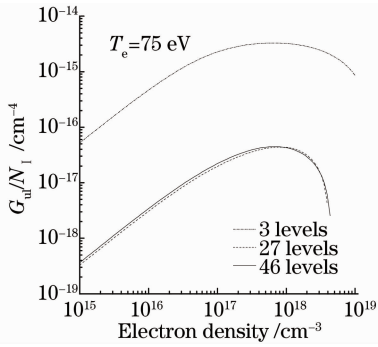


图 3 三种不同情况下相对增益系数与电子密度的关系

Fig. 3 Relationships between relative gain coefficient and electron density under three different situations

粒子从 $3d^9 4p$ 组态能级到基态能级属于电偶极允许跃迁, 自发辐射过程远大于其他过程, 导致 $3d^9 4p$ 组态能级上布居的粒子 (包括激光下能级 $3d^9 4p \ ^1P_1$ 的粒子) 会很快被排空, 较少的粒子会布居在 $3d^9 4p$ 组态能级上, 因此 $3d^9 4p$ 组态中除激光下能级以外的其他能级对激光上下能级的影响较小。

粒子从基态到 $3d^9 4d$ 组态能级的电子碰撞激发过程属于亚稳态单极激发, 电子碰撞激发速率远大于电子碰撞消激发速率。粒子从 $3d^9 4d$ 组态到基态属于光学禁戒跃迁, 自发辐射速率较小。因此通过亚稳态单极激发, $3d^9 4d$ 组态中除了激光上能级以外的其他能级的粒子数积累, 会导致基态和激光上能级的粒子数布居减少, 对激光能级的影响较大。

从以上分析可以看出, $3d^9 4f$ 和 $3d^9 4p$ 组态对激光上下能级粒子数布居影响较小, 图 2 和图 3 中考虑 3 个能级时相对粒子数密度和相对增益系数远大于考虑 27 和 46 个能级, 主要是来源于 $3d^9 4d$ 组态的影响。为了更加准确地研究类镍镱 32.8 nm 激光的上下能级粒子数分布和增益特性, 考虑 $3d^{10}$ 、 $3d^9 4p$ 、 $3d^9 4d$ 和 $3d^9 4f$ 组态的所有 46 个能级, 计算了类镍镱 32.8 nm 激光的上、下能级粒子数分布和增益特性。

在电子温度分别为 50、75、100 eV 的情况下, 激光上能级 $3d^9 4d \ ^1S_0$ 和激光下能级 $3d^9 4p \ ^1P_1$ 的相对粒子数密度与电子密度的关系如图 4 所示。从图中可以看出在不同电子温度下, 相对粒子数密度随电子密度的增加而增加, 这是因为电子密度越大, 离子受到电子碰撞的几率越大, 从而有更多的离子被激发。在低电子密度区域内, 激光下能级到基态的主要跃迁过程为自发辐射过程, 而激光上能级到下能级的跃迁过程主要为电子碰撞消激发过程。由于自发辐射速率远大于电子碰撞消激发速率, 导致激

光下能级的相对粒子数密度小于激光上能级从而形成粒子数反转。但是, 激光上能级到下能级的电子碰撞消激发速率随着电子密度增大而增大, 当电子密度增大到某一数值时, 激光上下能级间的粒子数反转遭到破坏, 此时无法产生激光, 因此存在最佳的电子密度, 对应最大的反转粒子数密度和增益。

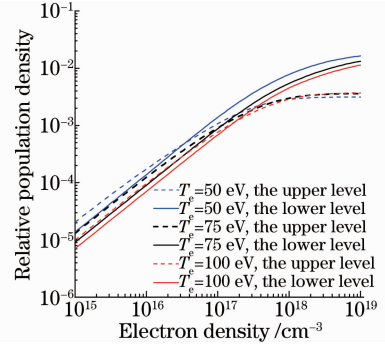


图 4 不同电子温度下相对能级粒子数密度与电子密度的关系

Fig. 4 Relationships between relative population density and electron density with different electron temperatures

为了得到最佳电子密度, 在电子温度分别为 50、75、100、150、200 eV 的情况下, 计算了相对增益系数与电子密度的关系, 如图 5 所示。由图 5 可知在不同电子温度下, 存在最佳的电子密度, 对应于最大的相对增益系数, 与上述的分析一致。此外, 随着电子温度的增加, 其对应的最佳电子密度值也随之增加。

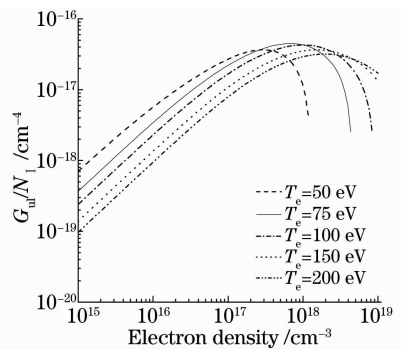


图 5 不同电子温度下相对增益系数与电子密度的关系

Fig. 5 Relationships between relative gain coefficient and electron density with different electron temperatures

为了研究电子温度对增益的影响, 计算了如图 5 所示的各电子温度下最大相对增益系数与电子温度的关系, 如图 6 所示。从图 6 中可以看出电子温度低于 70 eV 时, 相对增益系数随电子温度增加而增加, 当电子温度超过 80 eV 时, 相对增益系数随电子密度增加而下降, 在电子温度处于 70~80 eV 之间, 约为 75 eV 处, 相对增益系数最大。因此, 根据

上述计算结果,若实验上实现类镍氦 32.8 nm 激光输出,等离子体的电子温度范围控制在 70~80 eV 之间可获得较大的增益。当电子温度为最佳值 75 eV 时,电子密度在 10^{18} cm^{-3} 附近存在较大的相对增益系数。

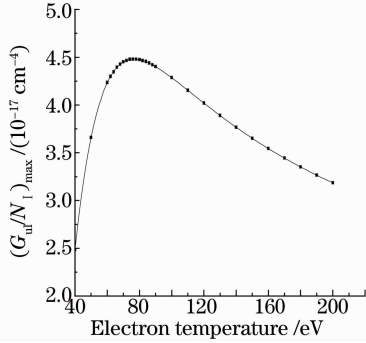


图 6 最大相对增益系数与电子温度的关系

Fig. 6 Relationship between maximum relative gain coefficient and electron temperature

采用毛细管放电机获得类氦氦 46.9 nm 激光时的等离子体状态为:电子温度 60~80 eV、电子密度在 $3 \times 10^{18} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 范围内^[10]。从上述的理论计算结果可知,实现类镍氦 32.8 nm 激光输出的最佳电子温度约为 75 eV 和最佳电子密度约为 10^{18} cm^{-3} ,该等离子体状态与获得类氦氦 46.9 nm 激光的等离子体状态相似。由于采用毛细管放电机已经成功地获得了 46.9 nm 激光的饱和输出^[10],因此实验中通过控制放电电流幅值、初始气压等实验参数,有实现毛细管放电类镍氦 32.8 nm 激光输出的可能性。

4 结 论

计算了类镍氦 32.8 nm 激光系统的相关原子参数,建立并求解准稳态近似下有关能级的速率方程,分析了 $3d^9 4p$ 、 $3d^9 4d$ 和 $3d^9 4f$ 组态的能级对激光产生的影响,并讨论了类镍氦 32.8 nm 激光系统的能级粒子数和增益随电子温度和电子密度的变化

规律。理论计算结果表明, $3d^9 4p$ 和 $3d^9 4f$ 组态的各能级的存在对激光上、下能级的粒子数反转影响较小, $3d^9 4d$ 组态各能级粒子数的积累对激光上、下能级粒子数反转影响较大。此外,计算结果表明,产生类镍氦 32.8 nm 激光增益的最佳电子温度约为 75 eV,最佳电子密度约为 10^{18} cm^{-3} 。通过与实验上产生 46.9 nm 激光时的等离子体状态相比较,采用毛细管放电抽运,实验上有实现类镍氦 32.8 nm 激光输出的可能性。

参 考 文 献

- 1 J J Rocca, V Shlyaptsev, F G Tomasel, *et al.*. Demonstration of a discharge pumped table-top soft X-ray laser[J]. *Phys Rev Lett*, 1994, 73(16): 2192-2195.
- 2 Luan Bohan, Zhao Yongpeng, Wu Yinchu, *et al.*. Experimental investigation of lasing condition for soft X-ray laser pumped by capillary discharge[J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(9): 1189-1192.
栾伯哈, 赵永蓬, 吴寅初, 等. 毛细管放电抽运软 X 光激光产生条件的实验研究[J]. *中国激光*, 2005, 32(9): 1189-1192.
- 3 Y P Zhao, S Jiang, Y Xie, *et al.*. Demonstration of soft X-ray laser of Ne-like Ar at 69.8 nm pumped by capillary discharge[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(17): 3458-3460.
- 4 F G Tomasel, J J Rocca, V N Shlyaptsev, *et al.*. Lasing at 60.8 nm in Ne-like sulfur ions in ablated material excited by a capillary discharge[J]. *Phys Rev A*, 1997, 55(2): 1437-1440.
- 5 M Frati, M Seminario, J J Rocca. Demonstration of a 10- μ J tabletop laser at 52.9 nm in neonlike chlorine[J]. *Opt Lett*, 2000, 25(14): 1022-1024.
- 6 B E Lemoff, C P Barty, S E Harris. Femtosecond-pulse-driven, electron-excited XUV lasers in eight-times-ionized noble gases [J]. *Opt Lett*, 1994, 19(8): 569-571.
- 7 S Sebban, T Mocek, D Ros, *et al.*. Demonstration of a Ni-like Kr optical field ionization collisional soft X-ray laser at 32.8 nm [J]. *Phys Rev Lett*, 2002, 89(25): 253901.
- 8 P H Lin, M C Chou, M J Jiang, *et al.*. Seeding of a soft-X-ray laser in a plasma waveguide by high harmonic generation[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(22): 3562-3564.
- 9 D E Kim, D S Kim, A L Osterheld. Characteristics of populations and gains in neon-like argon (Ar IX)[J]. *J Appl Phys*, 1998, 84(11): 5862-5866.
- 10 J J Rocca, D P Clark, J L A Chila, *et al.*. Energy extraction and achievement of the saturation limit in a discharge-pumped table-top soft X-ray amplifier [J]. *Phys Rev Lett*, 1996, 77(8): 1476-1479.

栏目编辑:史 敏