

文章编号: 0258-7025(2001)08-0701-04

# 基于 OFI 线偏振光激励等离子体的 电子能量分布讨论\*

陈建新 王 骥 陈德应

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室 哈尔滨 150001)

**提要** 在准静态隧道电离理论模型和准经典阈上电离理论模型的基础上, 建立了一个描述线偏振光场电离电子能量分布的简单模型, 推导出了既易于理解又相对简单适用的描述线偏振光场的电子能量分布函数解析表达式。数值计算了类硼氮系统的电子能量分布曲线, 并对计算结果进行了分析。最后与现有实验结果进行比较, 给出其适用范围。

**关键词** 线偏振光场, 电子能量, 类硼氮系统

**中图分类号** O 531 **文献标识码** A

## Discussion of the Electron Energy Distribution Driven by Linearly Polarized Laser

CHEN Jian-xin WANG Qi CHENG De-ying

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

**Abstract** A simple model to describe the electron energy distribution in plasma produced by linearly polarized optical-field induced ionization is constructed on the basis of quasiclassical above threshold ionization theory and quasi-static tunneling ionization theory. Resolved function expression is deduced which is simple and comprehended. The curve of B-like N system is calculated. At the same time, the result is analyzed and the applied area is given.

**Key words** linearly polarized laser, electron energy distribution, B-like N system

### 1 引 言

近年来, 基于 OFI (Optical-Field-Induced Ionization) 的复合机制和电子碰撞机制一直被认为是很有希望实现台上 X 射线激光的新的抽运机制<sup>[1,2]</sup>。在基于光场感生电离复合机制和电子碰撞机制 X 射线激光研究中, 电子能量(或温度)都是一个至关重要的参数。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不同于稳态的 Maxwell 分布<sup>[3,4]</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 OFI 等离子体。而且, 许多微观动力学过程, 如电子碰撞激发、消激发、三体复合等过程的速率以及对基于光场

感生电离复合机制的 X 射线激光的增益进行理论模拟都与电子能量的分布(即电子能谱)密切相关。推导出既易于理解又相对简单适用的描述线偏振光场的电子能量分布函数显得尤为重要。迄今为止, 人们对线偏振光场电离产生的电子能量分布进行了大量的理论研究<sup>[4-7]</sup>和实验测量<sup>[8,9]</sup>。现有的理论研究, 有的需要联合数个复杂的物理模型并借助庞大的数值计算程序<sup>[4,7]</sup>, 令实验物理学家望而生畏; 有的则通过大型的计算机程序, 给出数值解, 却未给出电子能量分布的解析表达式<sup>[6]</sup>, 使人难以理解其物理内涵。由于在有些情况下, 例如, 在低价离子中释放到基态的软 X 射线中, 获得受激放大的等离子体的密度较低, 只考虑阈上电离加热就可以了。因此, 本文在准静态隧道电离理论模型和准经典阈上电离理论模型的基础上, 建立了一个描述线偏振光场电离电子能量分布的简单模型。推导出了既易于理解又相对简单适用的描述线偏振光场的电子能量

\* 国家 863 高技术激光技术主题和国家自然科学基金(编号: 60078010)资助课题。

收稿日期: 2000-12-22; 收到修改稿日期: 2001-02-26

分布函数解析表达式。数值计算了类硼氮系统的电子能量分布曲线,并对计算结果进行了分析。最后与现有实验结果进行比较以给出其适用范围<sup>[8]</sup>。

## 2 线偏振光场中的有质动力势和电子在激光场中的剩余能量

准经典阈上电离理论模型<sup>[10]</sup>中引入了一个特定的电离时刻  $t_0$ ,并认为电离后电子与激光场的相互作用可以用经典的方法进行描述,当激光场为线偏振,电离激光为双曲正割型脉冲时,即

$$E(t) = E_0 \operatorname{sech} \left[ \frac{1.76(t - t_{\max})}{\tau_p} \right] \sin(\omega t) \quad (1)$$

单个电子在激光场中的剩余能量(阈上电离能(Above Threshold Ionization Energy))为

$$\varepsilon = 2U_p \cos^2(\omega t) \quad (2)$$

其中  $U_p$  为线偏振光场中的有质动力势,其表达式为

$$U_p = \frac{e^2 E_0^2 \operatorname{sech}^2 \left[ \frac{1.76(t - t_{\max})}{\tau_p} \right]}{4m_e \omega^2} \quad (3)$$

## 3 线偏振光场感生电离的电子能量分布模型的建立

为了在受激放大的等离子体的密度较低且只考虑阈上电离加热就可以的情况下获得电离的电子能量分布函数的解析表达式,在未进行推导之前作如下三点简化和假设:1) 由于受激放大的等离子体的密度较低,故在计算电子能量分布时忽略了电子-电子碰撞导致的等离子体热化和电子-离子碰撞的逆韧致吸收,即在计算电子剩余能量时采用公式(2);2) 强场电离后离子的剩余电子具有远远高于激光频率的自然频率,因而交变场电离速率对激光频率的依赖很弱,可用准静态隧道电离速率公式来计算,即用 ADK 模型计算电离速率;3) 在线偏振激光场作用下,原子的电离通常为逐级电离<sup>[11]</sup>。

电子能量分布函数所描述的是单位能量间隔里电子的数目。由于电离产生的电子数目和电子能量都为随时间变化的量,因此可以通过描述单位时间里电子数目变化的表达式以及电子能量变化的表达式求得单位能量间隔里电子数目的表达式,即电子能量分布函数。所以下面分为两步给出电子能量分

布函数的表达式。

第一步,单位时间里电子数目变化的表达式。

设电离产生的最高电荷态为  $Z_{\max}$ ,电荷态  $j$  在时刻  $t$  的相对离子数(离子数密度)为  $N_j(t)$ ,从电荷态  $j-1$  到电荷态  $j$  的电离速率为  $W_j[E(t)]$ ,并且电离速率的值根据假设(2)由文献[12]中的准静态隧道电离速率公式(7)求得。根据假设(3)原子的电离为逐级电离的情况下,各电荷态相对布居数随时间的演变规律可由下列一阶耦合微分方程组求出

$$\begin{cases} \dot{N}_0(t) = -W_1[E(t)]N_0(t) \\ \dots\dots \\ \dot{N}_j(t) = W_j[E(t)]N_{j-1}(t) - W_{j+1}[E(t)]N_j(t) \\ \dots\dots \\ \dot{N}_{Z_{\max}}(t) = W_{Z_{\max}}[E(t)]N_{Z_{\max}-1}(t) \\ \sum_{j=0}^{Z_{\max}} N_j(t) = 1 \end{cases} \quad (4)$$

设时刻  $t$  发生的各阶电离所产生的相对电子数为  $n(t)$ ,则根据(4)式,由各电荷态相对布居数随时间的变化率,可求得单位时间里电子数目变化的表达式为

$$\frac{dn(t)}{dt} = \sum_{j=1}^{Z_{\max}} W_j[E(t)]N_{j-1}(t) \quad (5)$$

第二步,单位时间里电子能量变化的表达式。

由(2)式可知,在某一时刻产生的电子剩余能量是由电离时刻的激光场的电场强度或激光强度以及电离时刻的激光电场的位相值  $\omega t = \varphi$  决定。由(2)式可以求得单位时间里电子能量变化的表达式为

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \frac{2}{\tau_p} \varepsilon(t) \cdot \{-\omega \tan(\omega t) \tau_p - 1.76 \tanh[1.76(t - t_{\max})/\tau_p]\} \quad (6)$$

式中  $\tanh[\ ]$  为双曲正切函数。

由(5)式和(6)式可知单位时间里电子数目及电子能量的变化由电离时刻的  $t$  值唯一地确定,所以单位能量间隔里电子的数目也由电离时刻的  $t$  值唯一地确定。又由(2)式可知,电离时刻的  $t$  值唯一地确定了在某一时刻产生的电子的剩余能量。因此以电离时刻  $t$  为中间变量,通过电离时刻  $t(0 \sim t_{\max})$  的改变,相应地给出电离产生的电子的剩余能,同时给出由电离时刻的  $t$  值唯一地确定的单位时间电子数目及电子能量的变化值,从而得到单位能量间隔里电子数目的值,也就是以电离时刻  $t$  为中间变量,可计算出  $dn(t)/d\varepsilon(t) \sim \varepsilon(t)$  曲线,即得出电离后

电子的初始能量分布  $f_e(\varepsilon)$ 。由(5)式和(6)式可得单位能量间隔里电子数目,即电离后电子的能量分布函数为

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

由(7)式可见,电子能量分布与原子种类(决定电离率)、峰值光强(决定电子剩余能),电离时刻的激光电场的位相值以及脉冲形状等因素有关。由(7)式也可以看到,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 Maxwell 分布。

## 4 类硼氮系统的计算结果及讨论

利用公式(4)和(7)分别计算了类硼氮系统电荷态相对布居数随时间的变化及类硼氮等离子体的初始电子能量分布,如图1,2所示。条件为:峰值光强为  $5 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ ,脉冲宽度为 105 fs,入射激光波长为 795 nm,初始粒子数密度为  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。

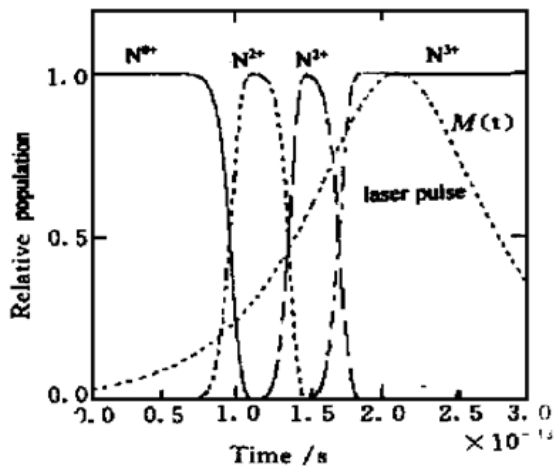


图1 氮的中性原子和前三个电子相对布居数随时间演变  
图中  $M(t)$  表示光强随时间变化

Fig. 1 Calculated time dependent relative population evolution of the neutral atom and the first three ion stages in N,  $M(t)$  reveals the evolution of optical field intensity

从图1可以看到,在峰值光强为  $5 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$  的情况下,N 的中性原子和前三个电荷态依次出现,电荷态 N IV 的相对布居数从小于 1 逐渐增大到 1,并最终成为等离子体中唯一的成分。从图2可以看到

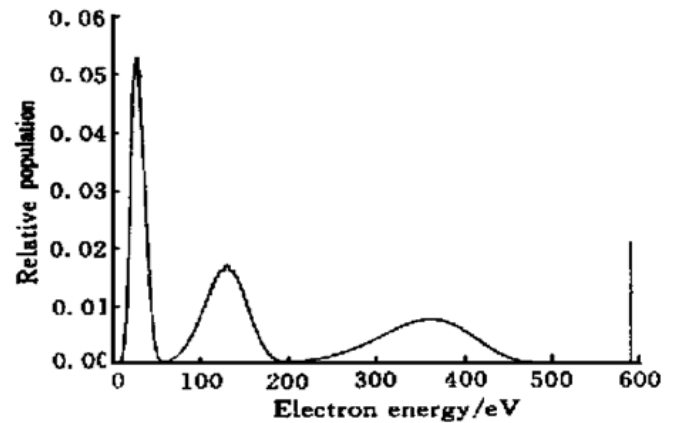


图2 N III 等离子体中初始电子能量分布  
Fig. 2 Calculated electron energy distribution in N III plasma with peak optical field intensity of  $5 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$

类硼氮等离子体的初始电子能量分布有三个显著的峰,这三个峰分别对应于电离产生的三个电子,三个峰对应的电子能量分别为: 29 eV, 129 eV 和 357 eV。图1中氮的四价离子的相对布居数为 0,因此在图2并没有出现第四个峰值。这一点说明了公式(7)的正确性。

值得说明的是,由于我们建立的电子能量分布函数是在近乎无碰撞的光场电离等离子体的前提下,只考虑阈上电离加热,因此利用所建立的电子能量分布函数计算的 He 等离子体光场感生电离产生的电子能量分布结果与文献[8]利用线偏振光场测量的 He 等离子体光场感生电离产生的电子能量分布进行对比发现,计算的电子能量分布曲线的形状与实验结果相似,峰值位置存在一定偏差,说明阈上电离加热为电子加热的主要机制,同时也说明伴随着其他加热过程。

## 5 结 论

本文推导的描述线偏振光场的电子能量分布函数的解析表达式适用于获得受激放大的等离子体的密度较低,只考虑阈上电离加热就可以的情况。对于较复杂的等离子体,电子的加热还必须考虑其他过程,如:电子-电子碰撞导致的等离子体热化和电子-离子碰撞的逆韧致吸收等可能的加热机制。

## 参 考 文 献

- 1 P. B. Corkum, N. H. Burnett. Short-wavelength coherent radiation: generation and applications. *OSA Proceedings Series*, 1988, 2: 225
- 2 N. H. Burnett, P. B. Corkum. Cold-plasma production for

- recombination extreme-ultraviolet lasers by optical-field-induced ionization. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1989, **6**(6): 1195 ~ 1199
- 3 Peixiang Lu, Hidetoshi Nakano, Tadashi Nishikawa *et al.*. Study of commercial terawatt femtosecond laser driven table-top X-ray lasers in gases. High Power Lasers in Energy Engineering, O-39. Nov. 1~ 5. 1999. Osaka Uni. Japan, SPIE-3886
  - 4 Y. F. Shao, S. J. Rose, A. Djaoui. Numerical simulation of optically ionised Li-like neon plasma recombination X-ray lasers. *Chinese Journal of Computational Physics* (计算物理), 1996, **13**(4): 455~ 458 (in Chinese)
  - 5 P. B. Lerner, J. S. Cohen. Formation of hot electrons in noble gases by intense field ionization: a quasistatic tunneling independent-electron model. *Phys. Rev. A*, 1995, **51**(2): 1464~ 1470
  - 6 P. B. Lerner, K. LaGattuta, J. S. Cohen. Comparison of quasi-classical and quasi-static quantum approaches to the ionization of helium by a circularly polarized laser field. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1996, **13**(1): 96~ 100
  - 7 Wang Jianguo, Li Jiaming. Plasma rate equation: recombination X-ray laser. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 1997, **9**(1): 34~ 40 (in Chinese)
  - 8 U. Mohideen, M. H. Sher, H. W. K. Tom *et al.*. High intensity above-threshold ionization of He. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **71**(4): 509~ 512
  - 9 T. E. Glover, J. K. Crane, M. D. Perry *et al.*. Measurement of velocity distributions and recombination kinetics in tunnel ionized helium plasmas. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **75**(3): 445~ 448
  - 10 P. B. Corkum, N. H. Burnett, F. Brunel. Above-threshold ionization in the long-wavelength limit. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, **62**(11): 1259~ 1262
  - 11 D. N. Fittinghoff. Optical field ionization of atoms and ions using ultrashort laser pulses. Livermore, University of California, Ph. D Thesis, 1993. 94~ 105
  - 12 Lu Xingfa, Chen Deying, Xia Yuanqin *et al.*. Ionization rates of atoms in an intense optical field. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(8): 1014~ 1018 (in Chinese)