

文章编号: 0258-7025(2005)01-0026-05

# 自由电子抽运 X 射线激光的理论探讨

仲进安<sup>1</sup>, 郭隐彪<sup>2</sup>, 朱爱军<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 桂林电子工业学院电子工程系, 广西 桂林 541004; <sup>2</sup> 厦门大学物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005)

**摘要** X 射线激光是激光物理与等离子物理中的一个重要研究领域。目前, X 射线激光研究多采用毛细管放电、高功率激光的多脉冲和短脉冲等抽运方式, 而且绝大多数研究局限于软 X 射线波段。借鉴自由电子激光器的组成结构, 提出一种产生 X 射线激光的新方案: 用钨制成毛细管的空心电极取代自由电子激光器内的摇摆器, 内充特定金属蒸气, 如铜蒸气之类, 使自由电子激光器变成自由电子抽运 X 射线激光器。运用电子碰撞电离、强流粒子束平衡体系理论方程与等离子复合特性等理论对这种新型 X 射线激光器的工作原理及其方案的可行性作了进一步的理论分析与探讨。

**关键词** 激光技术; X 射线激光; 三体复合; 电子碰撞电离; 电子束

**中图分类号** TN 248.6 **文献标识码** A

## Theoretical Investigation of Free-Electron Driven X-Ray Lasers

ZHONG Jin-an<sup>1</sup>, GUO Yin-biao<sup>2</sup>, ZHU Ai-jun<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Department of Electronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China )  
(<sup>2</sup> The School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China )

**Abstract** X-ray lasers are an important area in the fields of laser and plasma physics. At present, the studies of X-ray lasers focus mostly on Z-pinch carbon discharge and the short and multiple laser pulse from high power lasers, and most of which confine in Soft X-ray laser. Inspired by the device of free-electron lasers, a newly designed device of X-ray laser is put forward. This device is converting free electron laser tool into free electron pumped laser tool through replacing wiggler by capillary hollow tungsten electrode which is full of specially metal steam such as copper steam. Its working principle and feasibility are analysed and proved by many theory such as electron impact ionization, equilibria system of high-energy particle beams and recombination properties of plasma produced.

**Key words** laser technique; X-ray laser; three-body recombination; electron impact ionization; electron beam

## 1 引 言

由于 X 射线激光光子能量比普通的激光光子能量大几个数量级, 尤其是波长短于 0.2 nm 的 X 射线激光, 要求激活介质的原子序数较大, 并且发生内层电子电离, 从而使较外层的电子得以向内层跃迁, 即形成反转粒子跃迁, 这样就要求很高的抽运强度。根据初步估算, 产生波长短于 0.155 nm 的激光所需抽运源的强度要求大于  $10^{21}$  W/cm<sup>2</sup>, 用毛细管放电抽运、高功率激光多脉冲抽运和短脉冲抽运

等办法都难以实现<sup>[1,2]</sup>, 目前对 X 射线激光的研究局限于软 X 射线波段<sup>[3~8]</sup>。

自由电子激光器是由真空中的自由电子与电磁波相互作用产生受激相干辐射。近来有关专家提出采用极短的脉冲式电子束射入均匀等离子体中, 利用等离子静电场作为摇摆器, 以获得 X 射线波段自由电子激光<sup>[6]</sup>。本文受此启发, 提出用内充金属蒸气的钨制空心电极取代自由电子激光器的摇摆器, 用高能电子束作为抽运源<sup>[9,10]</sup>, 构成新型 X 射线激光器。

收稿日期: 2003-07-30; 收到修改稿日期: 2004-03-29

基金项目: 国家 863 计划(8638042416)资助项目。

作者简介: 仲进安(1970—), 男, 江苏海安人, 桂林电子工业学院助教, 主要从事光电应用技术研究。E-mail: zhongjinan\_0@163.com

## 2 激光器构成及其工作原理

图 1 所示为激光器构成原理。用耐高温钨制作一个类似于毛细管的空心电极, 内充金属蒸气作为激活介质。两路电子束经磁场偏转将空心电极的两端同时封住, 并且两路电子束参数相同, 这样才能使空心电极内金属蒸气不会外逸。空心电极外部抽成真空, 以防止氧化, 两端用耐高温陶瓷隔热, 由于耐高温陶瓷在  $2700\sim 2800^\circ\text{C}$  之间会熔化, 激光腔内温度控制在  $2650^\circ\text{C}$  以下。此外, 在该电极上加负电压, 且负电压的大小可调节。

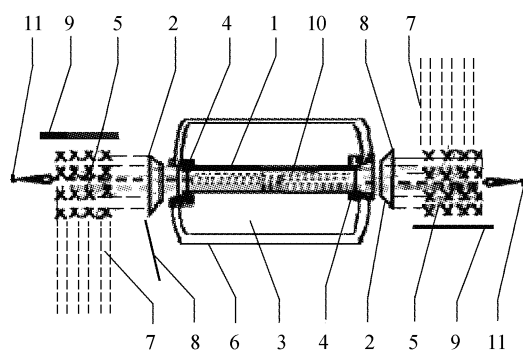


图 1 自由电子抽运激光器示意图

1: 空心钨电极; 2: 圆锥透镜; 3: 真空; 4: 耐高温陶瓷; 5: 电磁场; 6: 玻璃泡; 7: 电子束; 8: 挡板; 9: 辅助电极板; 10: 金属蒸气; 11: X 射线激光

Fig. 1 Schematic diagram of free electron pumped laser

1: hollow tungsten electrode; 2: conical lens; 3: vacuum; 4: higher temperature porcelain; 5: magnetic field; 6: bulb; 7: electron beam; 8: block; 9: secondary electric board; 10: metal steam; 11: X-ray laser

激光器两端有参数相同的电子束周期性偏转装置。该装置由辅助电极板、钨制空心电极与挡板组成, 各部分同步运转, 使两路电子束周期性地同时轰击钨管内的铜蒸气。两路电子束视为两个互为反向的德布罗意波, 在激活介质 Cu 蒸气中传播并相遇, 在激光器内形成驻波。自由电子随之高速振动, 并不断与 Cu 原子的内层电子碰撞, 使内层电子的能量变大, 脱离原轨道跑到外层轨道运行或成为自由电子, 进而使 Cu 原子电离。此时 Cu 蒸气成了等离子体, 该等离子体由高速运动的自由电子和 Cu 离子组成。

要产生 X 射线激光, 就要使原子内离原子核最近的内层电子被激发到高能级轨道上去形成反转粒子。Cu 原子的电子组态为  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^1$ , 它的特征波长如表 1 所示, 图 2 为能级轨道简图。

表 1 铜原子的特征波长

Table 1 Characteristic wavelength of Cu atom

Elements	$K_{\alpha 2}$	$K_{\alpha 1}$	$K_{\beta 1}$	$L_{\alpha 1}$
Cu	0.1545 nm	0.1541 nm	0.1392 nm	1.3336 nm

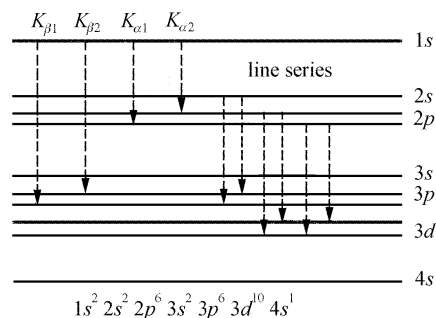


图 2 铜原子 X 射线能级轨道简图

Fig. 2 Energy level of Cu atom for X-ray

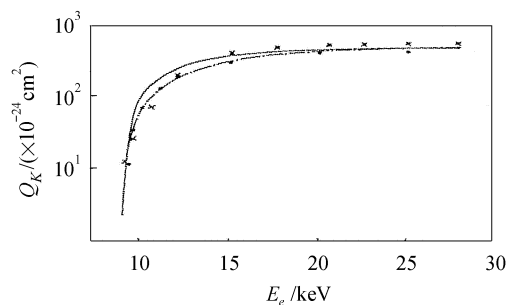


图 3 Cu 的 K 层电离截面与入射电子能量的关系  
Fig. 3 Relation between K-ionization cross section of Cu and energy of electron impact

产生波长小于  $0.2\text{ nm}$  X 射线激光的必要条件就是使  $1s$  轨道上的电子跃迁到高能级上去, 形成反转粒子。由泡利不相容原理可以知道, 内层电子一般不可能发生跃迁。但采用高能电子碰撞电离的方法使内层电子电离产生空穴, 此刻原子处在较高的能量状态(激发态), 较外层的电子有可能填充到空穴上产生 X 射线光子。

图 3 反映 Cu 靶在电子的轰击下 Cu 的 K 层电离截面与入射电子能量的关系。表 2 是不同能量的电子轰击 Cu 靶得到的 Cu 的 K 层电离截面的实验数据<sup>[5]</sup>。

根据图 3 与表 2 可以估算出能量为  $25\sim 28\text{ keV}$  自由电子与 Cu 原子碰撞时其 K 层电离截面最大或接近最大。于是可通过控制电子束的能量和调节加在电极上的负电压大小控制激光器内的自由电子振动幅度的大小, 即自由电子自身能量  $E$  的大小, 使其达到  $25\sim 28\text{ keV}$ , 这样使 Cu 原子 K 层,  $L$

层和  $M$  层电子被最大程度地剥离成自由电子。

表 2 电子轰击 Cu 靶获得的 K 层电离截面的实验数据

Table 2 Experiment results of K-ionization cross sections of Cu by electron impact

$E_e / \text{keV}$	$Q_K / (\times 10^{-24} \text{ cm}^2)$	$E_e / \text{keV}$	$Q_K / (\times 10^{-24} \text{ cm}^2)$
9.0	$14.0 \pm 1.8$	17.5	$479.2 \pm 34.5$
9.5	$28.2 \pm 2.7$	20.0	$526.5 \pm 37.9$
10.5	$70.7 \pm 6.5$	22.5	$558.8 \pm 40.2$
12.0	$212.8 \pm 15.5$	25.0	$580.1 \pm 41.8$
15.0	$411.0 \pm 29.6$	28.0	$574.1 \pm 39.4$

### 3 三体复合 X 射线激光机理

#### 3.1 电子碰撞抽运

先从单个高能电子来估算。假定单个高能电子在  $\Delta t = 120 \text{ ns}$  时间内能量损失  $\Delta E = 1 \text{ MeV}$ , 电子的经典半径  $r_e = 2.82 \times 10^{-13} \text{ cm}$ , 估算它的抽运强度  $I_0$

$$I_0 = \frac{\Delta E}{\pi r_e^2 \Delta t} = \frac{1 \times 10^6 \times 1.6021 \times 10^{-19} \text{ J}}{3.14 \times (2.82 \times 10^{-13} \text{ cm})^2 \times 1.2 \times 10^{-10} \text{ s}} = 3.2 \times 10^{21} \text{ W/cm}^2. \quad (1)$$

但用单个高能电子不能使金属蒸气完全电离, 要采用一束高能电子作抽运源。图 1 中, 用电子束加速器产生能量尽可能高的电子束。另外, 电子束的电子密度尽可能大。电子束经磁场偏转后再经圆锥透镜聚焦。焦点恰好位于空心电极的孔的入口处, 且空心电极的孔径与焦点处的电子束的束斑直径相等。

图 4 是脉冲装置的示意图。Marx 发生器用来产生负电压, Marx 发生器 A 经开关装置 1 与两个辅助电极板相连接, Marx 发生器 B 经开关装置 2 与空心电极相连接, 开关装置 1 和开关装置 2 均在  $t_1$  时刻断开, 在  $t_2$  时刻重新合上。Marx 发生器 A 产生的负电压为  $U_A$ , 加到两个辅助导电板, 使电子束偏转; 通过开关装置 1 断开时间辅助控制导电板的脉冲电压  $U_A$  的脉宽, 进而控制电子束脉冲的脉宽。图 5(a) 是辅助导电板的脉冲电压波形。Marx 发生器 B 产生的负电压为  $U_B$  加到空心电极上, 目的是让大量电子聚集到空心电极的内壁和外壁上, 这里负电压  $U_B$  越高, 高聚集到空心电极内外壁上的电子就越多。Marx 发生器 C, 开关装置 3 与空心电极相连接, 开关装置 3 在  $t_1$  时刻断开, 在  $t_2$  时刻合上; Marx 发生器 C 产生的负电压为  $U_C$ , 加到空心电极

上, 使聚焦后电子束在铜蒸气中传播时不发散。图 5(b) 为空心电极的脉冲电压波形。

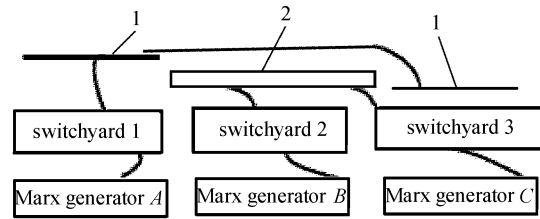


图 4 脉冲装置的示意图

1: 辅助电极板; 2: 空心钨制电极

Fig. 4 Schematic diagram of pulsed operation device

1; secondary electric board; 2; hollow tungsten electrode

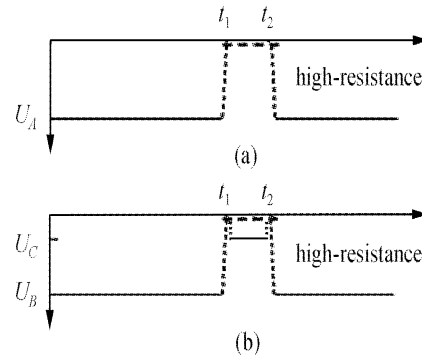


图 5 辅助导电板(a)和空心钨制电极(b)的脉冲电压波形

Fig. 5 Pulse voltage of secondary electric board (a) and hollow tungsten electrode (b)

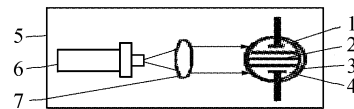


图 6 开关装置结构示意图

1, 4: 电极; 2: 金属板; 3: 玻璃泡; 5: 基座; 6: 激光器; 7: 光学透镜

Fig. 6 Structure of switchyard

1, 4; electrode; 2; metal board; 3; bulb; 5; base; 6; semiconductor laser; 7; optical lens

图 6 为开关装置结构示意图, 由一个半导体激光器和一个被抽成真空的玻璃泡组成。玻璃泡两端有两个电极, 一个电极与 Marx 发生器相连, 一个电极与空心电极或辅助导电板相连, 几个金属板固定在两个电极之间。控制好金属板与金属电极以及金属板与金属板之间的距离, 使其在激光照射时发生电子隧穿效应, 两个电极之间导通, 这相当于开关合上。当激光停止照射, 两个电极之间不能导通, 与开关相连接的辅助导电板或空心电极呈高阻状态, 这相当于开关断开。开关的开与合与半导体激光器是

否发射激光照射电极有关。因此可通过控制激光器来控制开关装置的开合,进而控制轰击 Cu 蒸气的电子束脉冲的脉宽。

激光器工作之初,在空心电极的孔中插入一根铜柱,它的外径与空心电极孔的内径相等。用高功率激光照射空心电极,当空心电极温度升到 2590℃ 时,铜已成液体即将气化,这时用高能电子轰击,铜在吸收了瞬间极高能量后气化并电离,铜离子密度迅速增大,铜离子密度的增大速率为

$$\frac{\partial n_i(t)}{\partial t} = \frac{n_b(t)}{\tau_e}, \quad (2)$$

式中  $n_i$  为铜离子密度,  $n_b$  为束电子密度,  $\tau_e$  为特征电子碰撞电离时间。

在气化过程中,铜蒸气不断膨胀,并有部分外逸,气压不断下降。当气压下降一定值,就发生电子雪崩。铜蒸气中的铜原子在束电子轰击下迅速电离成正离子和次级电子,这两种次级粒子进一步引起铜蒸气中的铜原子电离,可描写为

$$\frac{\partial n_e(t)}{\partial t} = \frac{n_b(t)}{\tau_e} + \frac{n_e(t)}{t_e} - \frac{n_e(t)}{t_s}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial n_i(t)}{\partial t} = \frac{n_b(t)}{\tau_e} + \frac{n_e(t)}{t_e}, \quad (4)$$

式中  $n_e$  为等离子体内自由电子的密度。

### 3.2 强流电子束-等离子体柱平衡方程

铜蒸气被电离成等离子后,与电子束形成一平衡体系。真空中强流带电粒子束在通过金属管的自洽平衡的基本方程是流体方程和麦克斯韦方程

$$\frac{\partial}{\partial t} n + \nabla \cdot (nv) = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} p + v \cdot \nabla p = -e \left( E + \frac{1}{c} v \times B \right), \quad (6)$$

式(5),(6)中,  $n$ ,  $v$  和  $p$  分别代表宏观平衡电子流体的密度、速度和动量。电子速度  $v$  可分解为

$$v = v_r \hat{e}_r + v_\theta \hat{e}_\theta + v_z \hat{e}_z, \quad (7)$$

式中  $v_r$  为电子在金属管横截面沿径向的速率,  $\hat{e}_r$  为径向单位矢量,  $v_\theta$  为电子在金属管横截面沿切向的速率,  $\hat{e}_\theta$  为切向单位矢量,  $v_z$  为电子沿金属管轴向的速率,  $\hat{e}_z$  为沿金属管轴向的单位矢量。

同样,束电子束速度  $v_b$  和等离子体的自由电子速度  $v_e$  可分解为

$$v_b = v_{br} \hat{e}_{br} + v_{b\theta} \hat{e}_{b\theta} + v_{bz} \hat{e}_{bz}, \quad (8)$$

$$v_e = v_{er} \hat{e}_{er} + v_{e\theta} \hat{e}_{e\theta} + v_{ez} \hat{e}_{ez}. \quad (9)$$

根据方程(5)与(6)并计入束和等离子体温度的影响,假定等离子体形成静止的本底,推导出强流电子束在通过金属管内的等离子体柱的自洽平衡的基

本方程

$$\frac{U_r}{r} + \frac{dU_r}{dr} = 4\pi e^2 (n_i - n_e - n_b), \quad (10)$$

$$E_{ez} = \frac{1}{n_e^2} \left[ n_b \sqrt{E_{bz}} - \frac{cB_\theta \sqrt{m_e}}{4\sqrt{2}\pi e r} - \frac{c \sqrt{m_e}}{4\sqrt{2}\pi e} \frac{d(B_\theta)}{dr} \right]^2, \quad (11)$$

$$T_b \frac{d(n_b^2)}{dr} = 4\gamma_b \frac{E_{b\theta}}{zk} - \frac{2}{c \sqrt{m_e}} \sqrt{2E_{bz}} - \frac{U_r}{k}, \quad (12)$$

$$T_e \frac{d(n_e^2)}{dr} = 4\gamma_e \frac{E_{e\theta}}{zk} - \frac{2}{c \sqrt{m_e}} \sqrt{2E_{ez}} - \frac{U_r}{k}, \quad (13)$$

式(10)~(13)中,  $B_\theta$  为方位角自磁场,  $T_b$  为束电子的动力学温度,  $T_e$  为等离子体电子的动力学温度,  $r$  为电子束半径,  $m_e$  为单个电子的质量,  $k$  为系数。  $E_{ez} = \frac{1}{2} m_e v_{ez}^2$  为等离子体内自由电子动能轴向的分量;  $E_{e\theta} = \frac{1}{2} m_e v_{e\theta}^2$  为等离子体内自由电子动能在横截面上的分量;  $E_{bz} = \frac{1}{2} m_e v_{bz}^2$  为束电子在等离子体中动能轴向的分量;  $E_{b\theta} = \frac{1}{2} m_e v_{b\theta}^2$  为束电子在等离子体中的动能在横截面上的分量;  $U_r = eE_r$  为由电场  $E_r$  形成的径向电势;  $\gamma_b = [1 - (v_{b\theta}/c)^2 - (v_{bz}/c)^2]^{-1/2}$ ;  $\gamma_e = [1 - (v_{e\theta}/c)^2 - (v_{ez}/c)^2]^{-1/2}$ 。

实际上,铜蒸气在电离成等离子体柱后承受两路电子束夹击,通过等离子体柱的束电流几乎为零,即束电子速度  $v_b$  轴向分量  $v_{bz} \approx 0$ , 等离子体的自由电子速度  $v_e$  轴向分量  $v_{ez} \approx 0$ , 束电子和等离子体的自由电子在轴向处于高速振动状态。

### 3.3 等离子体柱复合特性理论分析

由三体复合基本原理,产生复合 X 射线激光的要求是:1) 迅速产生高剥离度离子的等离子体;2) 快速降低等离子体的电子温度;3) 维持适当等离子体的电子密度;4) 捕获效应尽可能小。若物质被电离并产生裸核或类氢离子等这样高剥离度的离子,而且电子的温度还比较低,这时通过三体复合会形成激发态与基态之间的粒子数反转,产生 X 射线激光。

由第二部分叙述可知,使等离子体柱内自由电子的能量保持在 25~28 keV 可使等离子体柱内大量铜原子 K 层被电离。

忽略自磁场  $B_\theta$  方位角的影响,认为等离子体柱已被充分电离,即等离子体内自由电子的密度达最大值,由式(11),当  $E_{bz}$  取最大允许值时,通过控制  $n_b$  大小控制  $E_{ez}$  的大小。由于  $E_{ez}$  远大于  $E_{e\theta}$ ,所以等离子体内自由电子的能量  $E_e \approx E_{ez}$ ,因此  $E_e$  在时刻  $t_2$  之前可预先控制。

形成强流电子束-等离子体柱平衡体系过程所

需时间为  $t_2 - t_1$ , 这一过程很短。通过预先控制等离子体内的自由电子的能量使得  $t_2$  时刻它们的平均能量约 28 keV, 等离子体内铜离子的 K 层电离截面最大或接近最大, 上述条件 1) 得到满足。

不考虑等离子体内自由电子密度径向分布和径向电场影响, 由式(13)可知, 等离子体内自由电子的动力学温度  $T_e$  由  $E_\infty$  与  $E_d$  的大小决定, 即由自由电子自身能量大小决定。束停止轰击, 等离子体中束电子从等离子体逸出, 束电子密度  $n_b$  瞬间降到零。在  $t_2$  时刻, 电子抽运完全通过等离子体内的高速振动的自由电子与铜离子碰撞来实现, 此刻等离子体内自由电子在与铜离子碰撞中能量迅速下降(这是由于这类碰撞是非弹性碰撞)。于是上述条件 2) 得到满足。

另外, 在  $t_2$  时刻, Marx 发生器 B 上大量的电子经过开关装置 2 聚集到空心电极的内壁和外壁上, 并渗入等离子体内, 等离子体内自由电子密度得以维持, 抑制了捕获效应, 上述 3), 4) 两个条件得到满足。

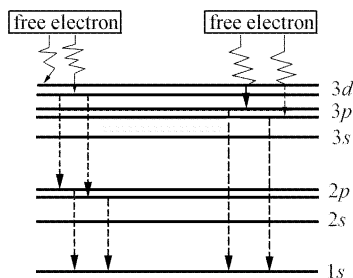


图 7 三体复合 X 射线激光的 Cu 离子能级原理图

Fig. 7 Cu ion energy level diagram for X laser produced by three-body recombination processes

现在具体分析其运转过程: 在抽运源的作用下, 激活物质 Cu 原子被电离, 形成高剥离度离子并与自由电子组成等离子体, 在快速冷却过程中离子与自由电子三体碰撞复合。图 7 所示为三体复合 X 射线激光的 Cu 离子能级原理图。由于三体复合速率与主量子数的四次方成正比, 所以在冷却过程中优先复合到 Cu 离子的高壳层中, 形成激发态的离子, 再通过碰撞或级联辐射激发复合到高壳层中的电子向较低能态跃迁。如果下能级的退激发速率快于上能级的占据速率, 则会在上下能级之间出现粒子数反转。等离子体中出现粒子数反转区域足够大, 时间足够长, 几何条件足够好, 就会发射 X 射线激光。

## 4 结 论

激光波长与抽运强度有直接的联系; 波长越短, 则所需的抽运强度越高。本文提出新的抽运方式, 采用极短脉冲高能高密度的电子束轰击金属蒸气, 形成金属原子内层电子被高度电离的等离子体柱, 沿柱方向产生短波长的 X 射线激光自发辐射放大。随着加速器技术发展与完善, 产生电子束的能量与密度将会越来越高, 在 X 射线激光研究的实际中采用电子束抽运的可能性将会增大。

## 参 考 文 献

- Zhang Jie. Development of X-laser research [J]. *Physics*, 1995, **24**(3):129~136  
张 杰. X 射线激光研究的进展概述[J]. *物理*, 1995, **24**(3):129~136
- U. Teubner, J. Bergmann, B. van Wonterghem *et al.*. Angle-dependent X-ray emission and resonance absorption in a laser-produced plasma generated by a intensity ultrashort pulse [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **70**(6):794~797
- Zhong Fangchuan, Deng Jian, Qing Ling *et al.*. Characteristic of plasma X-ray emissions generated by femtosecond and nanosecond laser pulses [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(3):364~368  
钟方川, 邓 健, 覃 岭等. 飞秒和纳秒激光脉冲作用下等离子体 X 射线辐射特性[J]. *光学学报*, 1999, **19**(3):364~368
- Shen Baifei, Xu Zhizhan. The path to the water window X-ray lasing [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(6):703~707  
沈百飞, 徐至展. 实现水窗波段 X 射线激光的途径[J]. *光学学报*, 1995, **15**(6):703~707
- Liu Jiansheng, Li Ruxin, Xu Zhizhan *et al.*. Theoretical investigation of ISPI X-ray lasers in C and N [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(6):706~711  
刘建胜, 李儒新, 徐至展等. 碳、氮原子内壳层光电离 X 射线激光的理论探讨[J]. *光学学报*, 2001, **21**(6):706~711
- Liu Shengguang, Li Yongguil. A wiggler mechanism for SASE-FEL [J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(2):88~90  
刘圣广, 李永贵. 一种 SASE-FEL 用摇摆器机制探讨[J]. *激光技术*, 2003, **27**(2):88~90
- Wang Qi, Cheng Yuanli, Zhang Xinlu *et al.*. Study on capillary discharge-pumped soft X-ray laser in Ne-like Ar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(2):97~100  
王 骐, 程元丽, 张新陆等. 毛细管放电激励类氖-氩离子 X 光激光研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(2):97~100
- Cheng Yuanli, Zhao Yongpeng, Xiao Yifan *et al.*. Experimental investigation on ablation character of capillary discharge [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5):538~542  
程元丽, 赵永蓬, 肖亦凡等. 毛细管快放电中的管壁烧蚀[J]. *中国激光*, 2004, **31**(5):538~542
- He Fuqing, Long Xianguan, Liu Mantian *et al.*. K-ionization on cross sections of the copper atom 9~28 keV-electron impact [J]. *Chinese J. Atomic and Molecular Physics*, 1995, **12**(2):133~138  
何福庆, 龙先灌, 刘慢天等. 9~28 keV 电子引起的 Cu 的 K 壳层电子电离截面[J]. *原子与分子物理学报*, 1995, **12**(2):133~138
- R. B. Miller. The Introduction to Intense Charged Particle Beams [M]. Beijing: Beijing Energy Press, 1990  
R. B. 米勒. 强流带电粒子束导论[M]. 北京:北京原子能出版社, 1990