

# 内壳层跃迁——实现超短波长激光的途径\*

王琛<sup>1,2,†</sup> 李汉明<sup>2,3</sup> 李英骏<sup>2,3</sup> 张杰<sup>2</sup> 王世绩<sup>1</sup>

(1 上海激光等离子体研究所 上海 201800)

(2 中国科学院物理研究所光物理实验室 北京 100080)

(3 中国矿业大学物理系 北京 100083)

**摘要** 内壳层跃迁机制是实现超短波长激光的一种很有潜力的方案. 随着近年来超短超强激光技术和 X 射线激光实验方法的进展, 实现内壳层跃迁机制的超短波长硬 X 射线激光不再是遥不可及的梦想. 文章详细介绍了内壳层跃迁机制 X 射线激光的原理, 并讨论了开展内壳层跃迁机制 X 射线激光实验的一些实际相关问题.

**关键词** X 射线激光, 内壳层跃迁, 纵向驱动

## Inner-shell transitions——an approach to ultra-short wavelength lasers

WANG Chen<sup>1,2,†</sup> LI Han-Ming<sup>2,3</sup> LI Ying-Jun<sup>2,3</sup> ZHANG Jie<sup>2</sup> WANG Shi-Ji<sup>1</sup>

(1 Shanghai Institute of Laser Plasma, Shanghai 201800, China)

(2 Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

(3 Department of Physics, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract** Employing the inner-shell transition mechanism is a potential way to obtain ultra-short wavelength lasers. It is not a hopeless dream to produce an ultra-short wavelength hard X-ray laser using this mechanism, in light of the recent great developments in ultra-fast and ultra-intense laser technology as well as experimental X-ray laser research. In this paper the principle of inner-shell X-ray lasers is introduced and some possible approaches to the realization of such lasers are discussed in detail.

**Key words** X-ray laser, inner-shell transition, longitudinally pumping geometry

## 1 引言

当爱因斯坦首次提出关于辐射跃迁  $A, B$  系数的时候, 没有人会想到直到半个世纪之后, 激光才得以问世. 而当 X 射线激光在实验室中一出现, 如何获得波长更短的激光就开始获得了相当的关注.

X 射线激光就是指波长处于 X 射线波段的激光, 它兼具有波长短和相干性好的特点, 因此具有相当大的潜在应用前景. 自 1984 年美国利弗莫尔实验室(LLNL)首次在实验室成功地演示了 X 射线激光以来<sup>[1-3]</sup>, X 射线激光的研究受到了广泛的重视, 并获得了很大的发展. 目前在实验室中可以获得了波

长从 7—100nm 的 X 射线激光的饱和输出<sup>[1-13]</sup>, 并且也演示了最短到 3.5nm 的 X 射线激光输出<sup>[14]</sup>. 但是严格说来, 这些还都是处于软 X 射线波段. 获得波长更短的偏硬 X 射线激光仍然是该领域的一个重要的目标.

## 2 通常 X 射线激光的原理

目前虽然已经在软 X 射线激光方面获得了很

\* 国家自然科学基金(批准号:19974074)、国家高技术研究发展计划(批准号:863804-7-8)、国家重点基础研究发展计划(批准号:G1999075200)资助项目

2004-08-23 收到

† 通讯联系人. Email: wangch@mail.shenc.ac.cn

大的进展,但是按照与其类似的方法,激光的波长却很难再向短波长推进。比起普通激光,从激光的原理角度来说,X射线激光没什么不同,都是三能级或是四能级的粒子数反转结构,但实现起来却有更大的难度。激光通常是通过原子(或离子)外壳层的电子在布居反转的能级之间跃迁产生的。因此,要获得更短波长的激光,工作物质就需要选用高 $Z$ 材料,并且要电离到高电离度的具有特殊电子结构的高温高密度等离子体状态,比如类氦、类镍等状态。这就对驱动源提出了很高的要求,通常需要采用大型的激光装置来驱动。另一方面,作为增益介质的高温高密度等离子体的维持时间非常短;并且在X射线波段,反射光学元件效率很低,因此难以发挥谐振腔的作用,只能采用无腔的单通自发辐射放大(ASE)的方式运转。客观上限制了增益介质的长度,也就是说,需要更大的增益系数才能实现一定强度的输出。

基于上述的两个主要的难点,目前的X射线激光的实现通常是在大型激光装置上采用电子碰撞激发的机制获得的。在这种实验方案下,通过高功率激光线聚焦驱动靶形成柱状类氦或类镍等离子体,然后通过ASE最终实现X射线激光的输出。由于可用元素是有限的,因此采用这种方式,最短能够达到的波长也只能是类镍金 $3.5\text{nm}$ 。因此要想获得波长更短的硬X射线激光,必须考虑其他方式。其中内壳层跃迁是很有潜力的一种机制。

### 3 内壳层空穴的产生

顾名思义,内壳层跃迁机制指的就是利用原子(或离子)的内壳层之间的电子跃迁来实现激光的过程。在高 $Z$ 元素材料中,靠近原子核的内壳层之间的能级差很大,因此如果能够实现维持一定时间和尺度的粒子数反转,那么获得 $\lambda < 2\text{nm}$ 甚至更短的硬X射线波段的激光输出就有可能。采用内壳层机制产生X射线激光的思想其实很早就已经提出<sup>[15]</sup>,但是由于过去缺乏相应的实验条件,难以进行实验,至今尚无成功地演示,但已有了相当数量的理论文章和实验方案出台<sup>[15-21]</sup>。内壳层空穴的产生是实现内壳层跃迁机制X射线激光的前提,有不少的物理过程和方法可以在原子(或离子)的内壳层产生空穴。其中引人关注的主要有光电离(photoionization)、电子碰撞电离、激发等。

#### 3.1 光电离<sup>[15-19]</sup>

光电离是一种效率非常高的产生内壳层空穴的机制。它是入射光子与原子之间相互作用,光子被吸

收,同时打出电子使原子电离的过程。其独特之处在于光子被完全吸收,没有剩余能量。因此通过选择合适的入射光子的能量,可以使入射光子与相应电子轨道能量发生共振。此时,在此轨道上的电子的电离截面将远远大于其他轨道的电子,也就使得可以有选择地电离相应轨道上的电子。选择合适的入射光子能量,并滤去可能引起外壳层电子光电离的低能部分,就有可能在原子内部产生足够多的内壳层空穴。

#### 3.2 电子碰撞电离

电子碰撞电离是另一种产生原子(或离子)内壳层空穴的可行方案。高能电子束与原子(或离子)碰撞,有一定几率直接电离内壳层电子而形成空穴。但是与光子的作用不同,电子碰撞电离不存在共振,因此效率要比光电离低得多。但是理论计算表明,当选择适当的入射电子能量时,仍然可能产生内壳层电子碰撞电离截面比外壳层更大的情况,也能够产生内壳层的空穴。例如,对Sc、Ti等原子,利用大约6倍于材料原子 $L_2$ 能级束缚能的超短脉冲电子束驱动,对应 $L_2$ 能级的碰撞电离截面是最大的,可能产生空穴。但尽管如此,此电子束对外层的 $M_1$ 等电子也有相当大的碰撞电离截面,可能需要依靠上下能级之间略微不同的衰减速度,才有可能产生持续时间为几飞秒的粒子数反转<sup>[20]</sup>。

#### 3.3 电子碰撞激发

除了电离,利用电子碰撞激发也可能产生内壳层空穴。激发机制是通过电子与原子(或离子)碰撞相互作用,激发原子(或离子)的内壳层电子到更外的壳层,进而形成空穴。如同常规的电子碰撞激发机制一样,在电子能量接近某一内壳层电子的激发阈值时,非偶极跃迁(单极跃迁)的截面可能大大增加,甚至会超过偶极跃迁。对闭合壳层等电子系列(类氦、类镍等)单极激发的截面是最大的;而对于某些非闭合壳层原子(离子),同样存在比较大的单极激发截面,有可能产生内壳层的空穴。例如Hooker发现在光场电离产生的类氦氩等离子体中,利用电子单极碰撞 $2s \rightarrow 3s$ 的激发,有可能产生 $2s$ 空穴,从而实现 $2p$ 与 $2s$ 之间的粒子数反转<sup>[21]</sup>。除了上述的例子,从理论上考虑,还有很多情况可以利用单极激发机制产生内壳层空穴:例如类镍离子的 $3p \rightarrow 4p$ 激发、惰性气体的最外层 $s$ 电子激发等。具体是否能成为合适的内壳层激发X射线激光的方案,还需要仔细计算各相关壳层的能级、寿命等相关参数。值得注意的是,在类氦(或类镍)等离子体中,

除  $2s \rightarrow 3s$  (或  $3p \rightarrow 4p$ ) 单极激发外,还存在更强的  $2p \rightarrow 3p$  (或  $3d \rightarrow 4d$ ) 外壳层单极激发,后者正是目前绝大多数 X 射线激光实现的基础.如何有效地选择前一种单极激发而抑制后一种,可能需要对激光等离子体产生的条件进行有效的控制,这也是进行此类实验的难点.

除了上述主要和有潜力的机制以外,还有另外一些产生内壳层空穴的途径,如原子-离子电荷交换、离子碰撞电离或激发<sup>[22]</sup>、超强激光场与团簇作用<sup>[23]</sup>等,但是前景并不很好,目前的研究也还都是刚刚起步.

## 4 利用内壳层空穴机制实现 X 射线激光

有了内壳层空穴以及由此得到的粒子数反转,还不能产生激光的输出.对于内壳层跃迁机制的 X 射线激光来说,还有一些特殊的难点.

### 4.1 特定能级间的粒子数反转

只要在原子(或离子)内壳层有空穴产生,就会存在有粒子数反转.但是要产生激光,必须要在特定能级即激光上下能级之间形成足够的粒子数反转才有效.内壳层空穴产生后,处于其外各壳层的电子都有相应的几率跃迁到该空穴而发光,这对于产生单色性好的激光是很不利的.一种有效的方法是电离次外壳层的电子,也就是说,离子在产生的内壳层空穴之外只有一种电子,这就可以比较好地选择和控制在上下能级.例如,电离 Na, Mg 等元素的  $2p$  电子,产生  $2p$  壳层的空穴,而形成  $3s$  对  $2p$  的粒子数反转.但是这样电离次外壳层的方式难以产生波长更短的 X 射线激光输出.

### 4.2 吸收效应

即使产生了特定能级之间的粒子数反转,要获得有效的增益还要考虑到增益介质中光吸收的影响.介质对发射谱线的吸收不但减小了出射谱线的强度,而且还会复合空穴,从而大大地减小有效的净增益系数.据 Kim 等人的模拟计算,在利用 10fs 脉宽光电离 Ca 从  $L_{23} \rightarrow M_1$  空穴反转的机制中,单纯由粒子数反转产生的增益系数 ( $G_{inv}$ ) 可能高达  $500\text{cm}^{-1}$ ,而在考虑吸收之后的净增益 ( $G_{eff}$ ) 则只有约  $50\text{cm}^{-1}$ ,甚至更低<sup>[16]</sup>.在通常反转增益并不太大的情况下,考虑了吸收之后,极有可能不能获得正的有效增益.

### 4.3 增益介质长度

相比上述两点,内壳层跃迁机制激光最难实现

的一点是增益介质的长度.一般说来,内壳层空穴的寿命非常短,决定了其粒子数反转的持续时间也非常短(10fs 量级).这就需要通过超短的脉冲或上升沿非常陡峭的驱动源来实现.另一方面,由于不能采用谐振腔,要获得能为实验观察到的信号,必须有足够长度的增益区.特别是对于 X 射线激光,工作物质通常为高温高密度的等离子体,本身的自发辐射就很强.通常,在增益长度积 ( $GL$ ) 达到 5 时,才可能观察到有明显强度分布特征的 X 射线激光.因此,即使在有效增益达到  $50\text{cm}^{-1}$  的情况下,也至少需要 1mm 的增益区长度.在如此短的增益维持时间情况下,获得长度达到毫米量级的增益介质长度,必须要考虑到行波驱动.其中可能只有纵向驱动的方案是比较现实的一种方法.

在 X 射线激光的实验研究中,通常采用的是横向的驱动方式,即驱动激光的辐照入射方向与 X 射线激光柱状等离子体垂直的方式.这种方式原理简单,稳定性好.经过多年的发展,一系列实用的线聚焦方案(如柱面透镜、离轴球面反射、柱面透镜列阵、列阵光劈等系统)已经比较成熟,用于相应的 X 射线激光实验,取得了良好的应用效果<sup>[2]</sup>.但是,近年来,随着超短脉冲激光(特别是飞秒激光)应用于 X 射线激光实验,横向驱动方式也逐渐显示出一些不足之处,突出表现在行波驱动方面.利用超短脉冲激光辐照产生的等离子体中 X 射线激光增益区的维持时间非常短,甚至短于光从增益区的一端传播到另一端的时间.这样在 X 射线激光光束传播到增益区末端时就会遇到老化的等离子体,从而大大减弱 X 射线激光的输出强度.行波驱动就是指按照 X 射线激光的方向和速度来逐步地离化、驱动等离子体的方式,从而保证 X 射线激光光束始终处于被激发的等离子体增益区内不断放大.对横向驱动来说,尽管已经发展出了诸如台阶镜之类的准行波驱动的方案,但却大大地增加了实验实施的复杂程度.特别是内壳层机制之类对时间要求特别精确的情况,很难实现或者根本就达不到要求.在这种情况下,只能考虑纵向驱动的方案.纵向驱动指驱动激光沿着等离子体柱的轴向也就是出射激光传播的方向进行驱动的方案,能够自动并且精密地实现行波抽运,如图 1 所示.目前的方法一般是,采用长焦距的透镜或球面反射镜把驱动激光聚焦到一个点上,那么在焦点前后的一小段范围内,光束的发散很小,就可以近似地认为是一段轴向的线聚焦<sup>[24-27]</sup>.由于增益介质,特别是高温高密度等离子体对驱动激光的强烈吸收

作用,随着长度的增加,驱动强度将会显著地下降。因此纵向抽运的抽运长度不可能很长,通常在几毫米的范围内才可能得到比较满意的效果。

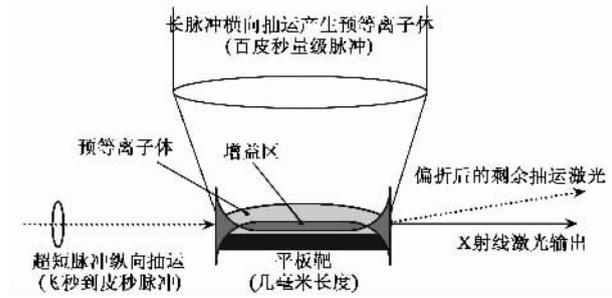


图1 纵向驱动方案示意图

## 5 一种可行的内壳层 X 射线激光方案

如上所述,内壳层跃迁机制 X 射线激光在实验上有很大的困难,目前仍然主要处于理论模拟阶段。在实验上实现内壳层 X 射线激光的难点很多,几乎存在于下面列出的每一步中:

- (1)超短或超快上升沿的超强驱动源;
- (2)产生足够多的内壳层空穴;
- (3)激光特定上下能级之间的粒子数反转;
- (4)内壳层空穴湮灭,即吸收的影响;
- (5)足够的增益介质长度。

尽管如此,但随着近年来超短超强激光技术的发展,进行相应实验演示的条件也逐渐成熟。例如图2就可能是一种可进行尝试的内壳层 X 射线激光实验方案。利用超短(飞秒量级)超强激光打高 Z 材料靶产生的上升沿陡峭的高能 X 射线(XR),经过滤片滤去低能部分后,可以用来纵向驱动增益介质(激光辐照靶产生的预等离子体或气体靶),以产生 X 射线激光(XRL)的输出。这种方案是利用光电离机制产生内壳层空穴,并且采用纵向抽运的方式保证一定长度的增益区长度。因此原则上来说,有可能在实验上获得一定的结果。此方案最困难的一点还在于 X 射线驱动源。利用超短脉冲强激光打靶产生的 X 射线具有的陡峭上升沿,能够满足内壳层 X 射线激光实验的要求;但是其高能部分的能流密度是否足够,则可能是一个大问题,需要经过具体的理论模拟和实验进行相应的研究。

## 6 结束语

内壳层跃迁机制是一种可能实现超短波长激光的一种重要的途径,尽管目前还没有实验演示成功,

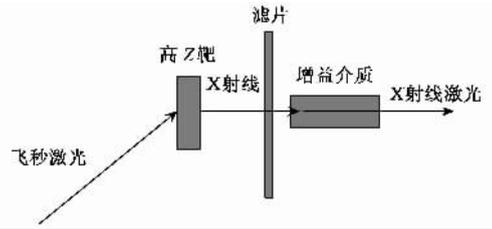


图2 一种可进行尝试的内壳层 X 射线激光实验的原理图

但是其理论方面已经进行了比较充分的研究,并且随着超短超强激光技术的发展,相应的实验实施也会逐步成为可能。在所有的方案中,利用纵向驱动方式的光电离的方式,有望获得一定的实验结果。但总的来说,内壳层跃迁机制 X 射线激光的实现,还任重道远。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] R. C. 埃尔顿著,范品忠译. X 射线激光. 北京:科学出版社,1996[ Elton R C ( Fan P Z trans. ). X-ray laser. Beijing Science Press, 1996 ( in Chinese ) ]
- [ 2 ] 彭惠民等主编. X 射线激光. 北京:国防工业出版社,1997 [ Peng H M et al. X-ray laser. Beijing: National Defense Industry Press, 1997 ( in Chinese ) ]
- [ 3 ] Matthews D L et al. Phys. Rev. Lett. ,1985 ,54 :110
- [ 4 ] Wang S J et al. Chin. Phys. Lett. ,1991 ,8 :618
- [ 5 ] Carillon A et al. Phys. Rev. Lett. ,1992 ,68 :2917
- [ 6 ] Koch J A et al. Phys. Rev. Lett. ,1992 ,68 :3291
- [ 7 ] DaSilva L B et al. Opt. Lett. ,1993 ,18 :1174
- [ 8 ] Rocca J J et al. Phys. Rev. Lett. ,1996 ,77 :1476
- [ 9 ] Zhang J et al. Science ,1997 ,276 :1097
- [ 10 ] Lin J Y et al. Opt. Commun. ,1998 ,158 :55
- [ 11 ] Kalachnikov M P et al. Phys. Rev. A ,1998 ,57 :4778
- [ 12 ] Tommasini R et al. J. Opt. Soc. Am. B ,1999 ,16 :1664
- [ 13 ] Sebban S et al. Phys. Rev. A ,2000 ,61 :043810
- [ 14 ] MacGowan B J et al. Phys. Rev. Lett. ,1990 ,65 :420
- [ 15 ] Duguay M A et al. Appl. Phys. Lett. ,1967 ,10 :350
- [ 16 ] Kim D et al. Phys. Rev. A ,2001 ,63 :023806
- [ 17 ] Moon S J et al. Phys. Rev. A ,1998 ,57 :1391
- [ 18 ] Moribayashi K et al. Phys. Rev. A ,1999 ,59 :2732
- [ 19 ] Meyer S et al. Inst. Phys. Conf. Ser. ,1998 ,159 :313
- [ 20 ] Kim D et al. Phys. Rev. A ,1999 ,59 :R4129
- [ 21 ] Hooker S M. Opt. Commun. ,2000 ,182 :209
- [ 22 ] Kravchuk V L et al. Phys. Rev. A ,2001 ,64 :062710
- [ 23 ] McPherson A et al. Nature ,1994 ,370 :631
- [ 24 ] Lemoff B E et al. Phys. Rev. Lett. ,1995 ,74 :1574
- [ 25 ] Sebban S et al. J. Opt. Soc. Am. B ,2003 ,20 :195
- [ 26 ] Li R et al. Phys. Rev. E ,1998 ,57 :7093
- [ 27 ] Ozaki T et al. Phys. Rev. Lett. ,2002 ,89 :253902