

光场感生电离 X 射线激光^{*}

卢兴发 陈德应 夏元钦 王 骐

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

摘要: 从理论和实验两个方面对近年来被认为很有希望实现台上 X 射线激光的新的泵浦机制——基于光场感生电离的复合机制和电子碰撞机制所取得的进展作了较为详尽的总结, 对进一步开展 X 射线激光, 特别是基于光场感生电离的 X 射线激光的研究具有一定的参考价值。

关键词: 光场感生电离 复合和电子碰撞 X 射线激光

X-ray lasers by optical field-induced ionization

Lu Xingfa, Chen Deying, Xia Yuanqin, Wang Qi

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

Abstract: This paper summarized in detail the evolution of X-ray lasers in both recombination and electron collisional excitation regimes following optical field induced ionization in theory and experiment, and these regimes are deemed to be new promising approaches for tabletop X-ray lasers. This work is valuable to the research of X-ray lasers, and in particular the research of X-ray lasers following optical field-induced ionization.

Key words: optical field-induced ionization recombination and electron collision X-ray lasers

引 言

X 射线激光是目前可以得到的瞬间亮度最高、频带窄、波长最短的相干光源。X 射线激光的这些特点使得它在生物活体细胞和亚细胞结构的 X 射线激光成像, 激光产生的等离子体状态诊断, 高密度集成电路光刻等需要极高的时间和空间分辨的微观过程的研究领域具有广阔的应用前景。为使 X 射线激光得到广泛的应用, 以减小泵浦激光器的体积和降低运行费用为目的的台上 X 射线激光的研究在 X 射线激光研究领域一直倍受人们的关注, 并且也取得了一定的进展。近年来, 基于光场感生电离的复合机制和电子碰撞机制被认为很有希望实现台上 X 射线激光的新的泵浦机制, 并且随着超短脉冲、超高功率激光器的发展, 激光强度的大幅度提高, 为这一领域的研究提供了理想的驱动源, 也使得这一领域的研究异常活跃。所以, 这一领域的研究也开始得到人们的密切关注。我们对光场感生电离 X 射线激光的研究进行了综述, 即总结了基于光场感生电离的 X 射线激光的研究在理论和实验方面所取得的进展。

1 高能电子碰撞电离的 X 射线激光

20 世纪 80 年代, X 射线激光的研究取得了突破性的进展。1984 年, 劳伦斯·利弗莫尔实

* 国家 863 高技术计划激光主题、国家自然科学基金和博士点基金资助。

验室(LLNL)的Matthews等人^[1]利用顺序电离及随后的电子碰撞激发,获得了Ne-like Se波长为20.6nm和21.0nm的软X射线激光放大。与此同时,普林斯顿大学的Suckewer等人^[2]利用顺序电离及随后的复合激发,获得了H-like C波长为18.2nm的软X射线激光放大。上述两种机制都是利用能量很高的激光脉冲照射到固体靶上产生等离子体,自由电子通过逆韧致辐射吸收激光能量而被加热到足够高的温度,然后通过碰撞电离产生所需的离子。由于泵浦激光的脉冲能量为几百焦耳,使得泵浦激光器不仅体积庞大而且运行费用昂贵,所以,世界范围内只有很少几个实验室可以开展相应的工作。此后,人们开始寻求降低泵浦激光能量的途径,以减小泵浦激光器的体积和运行费用,使得X射线激光得到广泛的应用。所以,自从80年代末以来,台上X射线激光的研究在X射线激光研究领域一直倍受人们的关注,并且也取得了一定的进展。Hara等人^[3]和Kim^[4]等人利用绝热冷却复合泵浦机制,在泵浦激光能量为几个焦耳的情况下,分别获得了L-like Al波长为15.4nm和H-like C波长为18.2nm的软X射线激光放大。Basu等人^[5]利用电子碰撞泵浦机制,在泵浦激光能量小于1J的情况下,获得了N-like Nb波长为20.4nm的软X射线激光放大。另外,Rocca等人^[6]在一个放电产生的等离子体中,利用电子碰撞激发,获得了Ne-like Ar波长为46.9nm的XUV激光放大。

2 光场感生电离X射线激光

2.1 光场感生电离X射线激光方案的提出及优点

80年代中期以来,基于CPA(chirped-pulse-amplification)技术的脉宽可以短于10fs,或脉冲能量可以大于100mJ,激光强度可以达到 $10^{20}\text{W}/\text{cm}^2$ 以上的紧凑型超短脉冲、超高功率激光器的出现,不仅开创了现代激光物理学最有前途的分支之一——超强辐射物理和技术,而且也为基于强激光场的光场感生电离的电子碰撞机制和复合机制的X射线激光的研究提供了理想的驱动源。基于强激光场的光场感生电离X射线激光的这两种新的泵浦机制是由加拿大的Corkum, Burnett 分别于1988年^[7]和1989年^[8]提出来的。所谓的光场感生电离(optical-field-induced ionization, OFI)是指原子在强激光场的作用下,当相应的激光电场超过原子的库仑电场时,能够使原子迅速发生隧道电离或越过势垒电离,例如对于氢原子,当激光强度大于 $3.5 \times 10^{16}\text{W}/\text{cm}^2$ 时,相应的激光电场将超过氢原子的库仑电场($E_a = 5.1 \times 10^9\text{V}/\text{cm}$),从而使氢原子迅速发生电离。这两种机制都是利用光场电离的阈值特性,将原子直接电离至所需的离子态,从而获得产生激光作用所需的离子和适合温度的电子,复合机制是通过离子与冷电子三体复合实现集居数反转;电子碰撞机制是通过低温离子与高能电子的碰撞实现集居数反转。

与传统的基于高能电子碰撞电离X射线激光相比,基于OFI的泵浦机制所用的超短脉冲、超高功率激光器,无论是体积上还是费用上都有了很大程度的降低,并且,基于OFI的泵浦机制要求泵浦激光器产生较高的峰值功率,而不是大的激光能量,所以,对于脉宽很窄的超短脉冲、超高功率激光器欲达到较高的功率密度,较低的泵浦能量即可满足要求,从而使得X射线激光可以有较高的重复频率,这对一些实际应用具有重要的意义。基于OFI的泵浦机制还有如下的两个优点。第一,有可能相对于某一离子的基态产生集居数反转。这是因为OFI和随后的三体复合过程快于相关共振谱线的辐射衰减速率,所以,与激发态之间的跃迁相比,可获得更短的激光波长。第二,与传统的基于电子碰撞电离X射线激光相比,基于OFI的X射线激光能更有效地运转,因为它们具有高的量子效率和等离子体特性的可控制性。等离子体特性的可控制性是指通过控制泵浦激光的波长和偏振特性,可在很大范围内控制电子温

度^[9]。

2.2 光场感生电离 X 射线激光理论工作的进展情况

基于 OFI 的电子碰撞机制和复合机制是近年来被认为很有希望实现台上 X 射线激光的泵浦机制之一,且随着超短脉冲、超高功率激光器的发展,激光强度的大幅度提高,也使得这一领域的研究异常活跃。已有美国、加拿大、英国及日本等几个研究小组对基于 OFI 的 X 射线激光进行了大量的理论和实验研究。理论工作主要集中在基于 OFI 的复合机制的理论模拟。1990 年, Burnett 和 Enright^[10]对基于 OFI 的 X 射线激光以瞬时模式和准稳态模式获得增益的方案,在 Jones 和 Ali 模型^[11]的基础上,建立了自己的模型,并对 H-like B 的瞬时模式的增益, L⁺-like Ar 和 H-like C 的准稳态模式的增益进行了计算。准稳态模式以时间尺度超过流体扩展或冷却时间,以及激发态之间跃迁波长较长为特征($> 100\text{ps}$);瞬时模式以时间尺度与基态跃迁的辐射时间相当为特征($\sim 1\text{ps}$)。对 X 射线激光的准稳态模式的增益已进行了大量的分析研究,实验上已证明其可行性。X 射线激光的瞬时模式的增益,在文献 [11][12]中进行了计算,并指出其存在性,但是由于没有适合的方法在瞬时模式所要求的亚皮秒的时间尺度里产生所需的等离子体,所以,以瞬时模式获得增益的方案实验上一直没有得到实现。但随着超短脉冲、超高功率激光器的发展,超短脉冲、超高功率激光器的脉冲宽度($0.1\sim 1\text{ps}$,甚至更短)与以瞬时模式获得增益的方案所要求的时间尺度相匹配,从而使得以瞬时模式获得增益的方案实现成为可能。所以,通过 Burnett 等人的理论分析不仅使人们对基于 OFI 的 X 射线激光的研究有了全新的认识,也使得以瞬时模式获得增益的方案开始得到人们的重视。

1991 年, LLNL 的 Amendt, Eder 等人^[13]使用简化的原子动力学模型,对基于 OFI 瞬时模式的 L⁺-like Ne X 射线激光(9.8nm)进行了理论探讨,分析了饱和效应以及由受激喇曼散射(stimulated raman scattering, SRS)所引起的电子加热过程,并指出更短的激光脉冲宽度,可显著提高效率。1992 年,该研究小组^[14]在原来工作的基础上,进一步深入地研究了基于 OFI 的 X 射线激光的饱和效应,能量效率以及瞬时模式中相对于基态跃迁相关的其它问题。在考虑和不考虑精细结构的两种情况下,对 H-like 和 L⁺-like 离子相对于基态跃迁中的饱和强度(增益减小为小信号增益值一半时所对应的强度)进行了较为详细的计算。文中同时使用较大的篇幅对基于 OFI 的 X 射线激光效率的计算进行了讨论,以 L⁺-like Ne(9.8nm)为例,具体地讨论了电子温度及电子密度的变化对最大增益系数和能量效率的影响。通过该研究小组较为详尽的计算,使人们对基于 OFI 的瞬时模式的 L⁺-like 方案有了更加深入、全面的认识,为进一步开展基于 OFI 的 X 射线激光的研究奠定了基础。

对基于 OFI 的电子碰撞激发机制的理论模拟工作,主要是 1994 年美国 Stanford 大学的 Lemoff 等人^[15]组成的研究小组首次发表了基于这种机制的三个系统 Ne-like Ar(Ar $\textcircled{3}$), Ni-like Kr(Kr $\textcircled{3}$)和 Pd-like Xe(Xe $\textcircled{3}$)的理论计算的结果,计算结果显示每一个系统都能产生很高的增益,理论上的增益值分别为 17cm^{-1} , 94cm^{-1} 和 107cm^{-1} 。随后,该研究小组的 Hooker 和 Harris 等人又提出了基于 OFI 电子碰撞机制的以类铍离子作为激光介质的新方案,与该小组先前提出的几个系统的主要差别是:对于先前的系统激光跃迁发生在 $\Delta n = 0$ 的能级间,而新提出的系统激光跃迁发生在 $\Delta n \neq 0$ 的能级间,从而使得同样跃迁波长所要求的电离激光强度比先前系统大大降低,并给出了 Be-like N(N $\textcircled{4}$), Be-like Ne(Ne \times), Be-like Al(Al $\textcircled{4}$)三个系统的理论计算结果。

国内的哈尔滨工业大学光电子技术研究所、北京应用物理与计算数学研究所等单位,对基

于 OFI 的 X 射线激光的研究进行了一些理论计算。前者主要开展了基于 OFI 的电子碰撞激发机制的类镍氪系统($\text{Kr } \textcircled{3}$)的理论模拟^[16]。利用在现有的各种强场电离理论与实验符合得很好的由 Ammosov, Delone 和 Krainov 等人^[17]提出的复杂原子隧道电离模型(即 ADK 模型),计算了 Kr iv 至 $\text{Kr } \textcircled{3}$ 的电离速率随光强的变化关系,进而根据阈值激光强度 I_{th} 的定义和简单的一维准经典库仑势垒压制电离(barrier-suppression ionization, BSI)模型^[18]计算出类镍氪系统光场电离所需的阈值激光强度。以准静态隧道电离模型和准经典阈上电离理论为基础,建立了描述圆偏振光场电离电子能量分布的简单模型,并编制了相应的数值计算程序,计算了圆偏振光场电离产生的类镍氪等离子体中电子的剩余能量分布。利用 Cowan 程序^[19]计算了类镍氪系统的偶极跃迁原子参数,得到了类镍氪激光系统有关能级的能量值、能级寿命、能级间偶极跃迁矩阵元、振子强度、自发辐射速率。另外,将 Cowan 程序推广到了任意电子能量分布的情形,利用 Cowan 程序计算出的平面波玻恩近似下的电子碰撞强度值,然后求出电子碰撞激发截面,最后将激发截面对上述计算出的电子能量分布进行积分,得到了电子碰撞激发速率系数。对反转粒子数密度、小信号增益系数等的进一步计算正在进行之中。

2.3 光场感生电离 X 射线激光实验工作的进展情况

基于 OFI 的 X 射线激光的实验研究在 1993 年取得了突破性进展,日本 RIKEN 研究所的 Nagata 等人^[20]首次观察到光场感生电离复合机制 X 射线激光增益,他们采用长脉冲激光预电离与随后的短脉冲激光场电离相结合的实验方案。在他们的实验中,首先将一台脉宽为 20ns,波长为 248nm 的 KrF 激光器出射的激光束线聚焦于放在真空室内的固体锂靶上,相应的功率密度为 10^9 W/cm^2 ,在真空室内产生 Li^+ 等离子体,经过一定时间的延迟,另一台与先前 KrF 激光器同步的脉宽为 0.5ps,能量为 50mJ,波长为 248nm 的亚皮秒 KrF 激光器出射的激光通过光场感生电离产生完全离化的锂离子,亚皮秒 KrF 激光被一个焦距为 300mm 的消色差透镜点聚焦于靶上方 0.5mm 处的 Li^+ 等离子体中,焦斑为 $10\mu\text{m}$,相应的功率密度为 10^{17} W/cm^2 ,上述两台激光器的重复频率都为 3Hz。由等离子体所发出的 X 射线辐射由光谱仪及光谱仪出射狭缝处的微通道板进行检测。对于 H-like $\text{Li } 13.5\text{nm}$ ($\text{Lyman-}\alpha, n=2-1$) 跃迁,由观测到的轴向光谱和离轴光谱强度的对比表明产生增益,并且由轴向谱线强度随着增益长度增加的非线性增长测得小信号增益系数为 20cm^{-1} ,相应的增益长度为 2mm,所以,增益长度积 $gl=4$ 。这个实验的成功,充分证明了基于 OFI 复合机制 X 射线激光的可行性,也给基于 OFI 的 X 射线激光的研究注入了新的动力。

1994 年,LLNL 的 Eder 等人^[21]在泵浦光的波长为 $0.8\mu\text{m}$ 及其二次谐波 $0.4\mu\text{m}$ 的两种情况下,对基于 OFI 复合机制的 H-like $\text{Li } 13.5\text{nm}$ 跃迁的辐射谱线进行了测量,当泵浦光的波长为 $0.4\mu\text{m}$ 时,谱线强度随增益长度的增加有非线性增长,并测得小信号增益系数为 30cm^{-1} ,相应的增益长度为 1.5mm,故增益长度积 $gl=4.5$;而当泵浦光的波长为 $0.8\mu\text{m}$ 时,谱线强度随增益长度的增加无非线性增长。该实验不仅进一步证明了基于 OFI 复合机制 X 射线激光的可行性,且说明该实验中波长较长的泵浦光不利于基于 OFI 复合机制 X 射线激光的产生。

1996 年,普林斯顿大学的 Krushelnick 等人^[22]在实验中观测到,对于 H-like $\text{Li } 13.5\text{nm}$ ($\text{Lyman-}\alpha, n=2-1$) 的跃迁,谱线强度随增益长度的增大有非线性增长,并且在靶的长度大于 2mm 时,谱线的强度不再呈现非线性增长。该实验与日本 RIKEN 研究所的实验不同之处在于,该实验中预脉冲激光的能量较高,所以,预脉冲激光在真空室内产生的是 Li^{2+} 等离子体,而日本 RIKEN 研究所的实验中预脉冲激光产生的是 Li^{1+} 等离子体。

上述几个实验中所采用的都为固态靶,而德国的几个研究小组采用气态靶开展了基于 OFI 的复合机制 X 射线激光的实验研究。1995 年,德国的 Fill 和瑞典的 Borgstrom 等人^[23]组成的研究小组,所采用的气体靶分别为 He, N₂, CO₂, O₂, SF₆ 和 Ar 等,气体靶是利用置于真空室内的与泵浦激光系统同步的脉冲喷嘴来产生。利用掠入射的单色仪及单色仪出射狭缝处的无窗光电倍增管对横向与纵向的 XUV 时间积分谱进行了测量,观察到 H-like He, Li-like N, Li-like C, Li-like O, Na-like S 和 Na-like Ar 的辐射谱线以及谱线强度随激光强度的增加有非线性增长。对于 Li-like N 的 2p-3d 跃迁,理论上谱线增益的峰值为 7cm^{-1} ,但实验中没有测到 Li-like N 相对于基态或准基态的任一谱线的增益。同时,实验中通过改变增益介质的长度测得了激发态之间跃迁所产生的 XUV 谱线的增益值,对于 Li-like N 51.19nm 的 3d-5f 跃迁和 B-like N 47.24nm 的 2p-3d 跃迁,测得的峰值增益系数分别为 $28 \pm 9\text{cm}^{-1}$ 和 $29 \pm 8\text{cm}^{-1}$,相应的增益长度为 0.8mm。

1995 年,德国 Hannover 大学的 Chichkor 等人^[24]的实验中采用的 O₂, CO₂ 和 N₂ 等的气体靶与 Fill 等人采用的类似,是由有三个输出气孔的脉冲喷嘴来产生。实验中观察到相对于基态的 G-like O 37.41nm 的 2p_{3s}-2p² 跃迁和 N-like O 61.66nm 的 2p_{3s}-2p³ 跃迁的谱线强度随输出孔数个数的增多(即增益长度的增大)呈现非线性增长,增益系数的值分别大于 10cm^{-1} 和 25cm^{-1} ,相应的增益长度约为 1mm,所以,增益长度积 gl 的值分别为 1 和 2.5。在气体靶分别为 CO₂ 和 N₂ 时,也观察到 G-like O 37.41nm 的 2p_{3s}-2p² 跃迁和 Be-like C 53.82nm 的 2s_{3s}-2s_{2p} 跃迁以及 B-like N 45.21nm 的 3s-2p 跃迁的谱线,但并没有观察到谱线强度随增益长度增大的非线性增长。

Chichkor 等人的实验在泵浦光的波长较长的情况下,获得了相对于基态的 G-like 和 N-like O 的 XUV 激光辐射放大,并且认为三体复合泵浦为主要的泵浦机制,所以,该实验结果与上述 Eder 等人的实验结果形成鲜明的对比,说明波长较长的泵浦光也可以产生基于 OFI 的复合机制 X 射线激光,也进一步证明了 Chichkor 等人提出的复杂离子更有利于获得相对于基态跃迁的 X 射线激光的观点。因为对于复杂离子激光下能级高于离子基态,从而为激光下能级提供了排空通道,例如与 H-like Li 离子相比, G-like O 离子更有利于集居数反转的获得。另外,Chichkor 等人与 Fill 等人的实验,都采用了由脉冲喷嘴产生的 O₂, N₂ 和 CO₂ 等气体靶,对于 N₂ 和 CO₂ 都没有获得相对于基态跃迁的 X 射线激光辐射放大,但对于 O₂ 靶,在 Chichkor 等人的实验中获得了相对于基态跃迁的 XUV 激光辐射放大,Fill 等人的实验中却没有获得,Fill 等人认为是由于谱的时间积分特性,持续几个纳秒的总的辐射掩盖了相对于基态跃迁的瞬时放大的辐射。这两个实验也说明即使在实验条件相似的情况下,实验条件的选择对能否获得理想的实验结果起着重要的作用。

上述的几个基于 OFI 复合机制的实验中,增益长度积 gl 的值没有超过 5,也就是说增益长度 l 的值仅为 1~2mm,较小的 l 值导致较小的增益长度积。 l 值小的主要原因是场电离所引起的折射,当入射激光聚焦于气体或等离子体中时,光轴上的激光强度为最高,导致轴上的电离度最高,因此,轴上的电子密度也最高,电子密度存在梯度使得入射光束发生折射,引起入射光束的散焦,从而限制了入射光束在轴向的传播,所以,人们开始寻求减小折射效应增大值的方法。减小折射效应的一种方法是使用较大的焦斑^[25],然而这就需要入射激光具有较高的能量;第二种方法是获得非常平滑的横向强度分布,甚至于使轴上的强度为局部最小^[26];第三种避免电离引起折射的方法是在场电离之前,在轴上产生一个密度最小的等离子体通道^[27],

这种方法可以使激光强度在一个较长的长度范围内保持很高的值。1996 年, Princeton 大学的 Korobkin 等人^[28]利用充满预先形成的等离子体的毛细管的波导效应,也较好地解决了场电离所引起的折射问题。对于 H-like Li 13.5nm (Lyman- α , $n = 2 - 1$) 跃迁,利用毛细管的波导效应,使得增益介质的长度增加到接近 5mm,测得小信号增益系数为 11cm^{-1} ,相应的增益长度积 $gl = 5.5$ 。这是基于 OFI 复合机制的 X 射线激光所取得的最大的增益介质长度,也是最大的增益长度积。

美国 Stanford 大学的 Lemoff 等人组成的研究小组在 1994 年发表了基于 OFI 的电子碰撞激发机制 X 射线激光理论计算的结果之后,该研究小组于 1995 年成功地获得了 Pd-like Xe 41.8nm $4d^9 5d^1 S_{\sigma} 4d^9 5p^1 P_1$ 跃迁的 XUV 激光放大^[29]。他们采用重复频率 10Hz,能量 70mJ,脉宽 40fs,波长 800nm 的掺钛蓝宝石(Ti:sapphire)激光系统作为驱动源,出射激光经 1/4 波片变为圆偏振光,由焦距为 50cm 的透镜聚焦于差动排气式的靶室内,聚焦后的功率密度为 $3 \times 10^{16}\text{W}/\text{cm}^2$ 。靶室与外面真空室通过薄的铜片隔离,入射激光在薄的铜片上打出直径小于 500 μm 的针孔,靶室内的气体向外喷出,靶室外的真空室连续抽真空以维持靶室内的气压平衡。由靶室出射的 XUV 辐射由 1.5m 的掠入射的单色仪及单色仪出射狭缝处的微通道板、预放大器和 Box car 平均积分器组成的检测系统进行检测。在靶室内气压 1600Pa 时,通过改变增益长度测得增益系数为 13cm^{-1} ,由于在这个气压下电离引起的折射不是一个严重的问题,增益长度的值大于 8mm,所以,相应的增益长度积 gl 的值达到 11,这是迄今为止基于光场感生电离的 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 Lemoff 等人的实验中,测得的 Pd-like Xe 41.8nm 的 XUV 激光辐射的增益值与他们在文献[15]中理论上所计算的增益值相比低一个数量级,可能是理论上所用的模型并没有考虑高能电子有可能在比激光上能级寿命更短的时间里离开增益区,从而减少对激光泵浦起作用的电子的数量,所以,在进一步的研究中,对激光泵浦起作用的电子数量应从理论上充分考虑,实验上进行验证。基于 OFI 电子碰撞激发机制的 Pd-like Xe 41.8nm 的工作波长长于基于复合机制的 H-like Li 13.5nm 的工作波长,但如果激光强度足够高,也就是在激光脉宽不变的情况下,进一步提高激光器的能量,或者在激光器的能量不变的情况下,进一步压缩激光脉宽,而且也可以考虑使用中空波导等方法形成一个通道,使泵浦激光束能够得到更有效的聚焦,基于 OFI 电子碰撞激发机制也可以获得更短的波长,例如在激光强度为 $5 \times 10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$ 时,可以生成 N-like Xe,则激光波长可达 10nm 左右。虽然基于 OFI 电子碰撞激发机制的 Pd-like Xe 41.8nm 的工作波长相对于复合机制的 H-like Li 13.5nm 的工作波长较长,但是 Pd-like Xe 的增益长度积大于 H-like Li 的增益长度积,所以,基于 OFI 电子碰撞激发机制的激光强度可能有较强的输出,有可能达到实际应用的要求而获得广泛的应用;基于 OFI 的复合机制在获得更短波长方面有优势,如果获得的激光波长进入“水窗”波段,将在生物活体细胞和亚细胞结构的 X 射线激光成像等方面得到广泛的应用。

对基于 OFI 的电子碰撞激发机制,虽然进行了较为深入的研究,但在 Lemoff 等人^[29]测得 Pd-like Xe 41.8nm 的 XUV 激光辐射以后,到目前为止还没有见到其它基于这种机制获得增益的报道,所以,基于 OFI 的电子碰撞激发机制无论是从理论上还是实验上,都需要进一步研究。在进一步的研究中,除了对电离后的电子温度及靶室气压等实验参数进行研究之外,也可以考虑改变一下靶室的结构,比如可以考虑采用脉冲喷嘴的结构或者其它结构。另外,George 等人^[30]采用重复频率 10Hz,能量 200mJ,脉宽 250fs,波长 790nm 的掺钛蓝宝石(Ti:sapphire)

激光系统,在泵浦光分别为线偏振和椭圆偏振的两种情况下,对 L_i -like N 和 Be -like N 的 X 射线辐射进行了测量,发现椭圆偏振光的情况下辐射谱线的强度高于线偏振光情况下的辐射谱线的强度。这个实验不仅在一定程度上证明了 Hooker 和 Harris 等人提出的基于 OFI 电子碰撞机制的以类铍离子作为激光介质的方案,而且也给进一步开展基于 OFI 的电子碰撞激发机制的 X 射线激光的研究以一定的启示,只要我们能有效地控制电子温度,靶室气压等实验参数,以及选择适当的靶室结构,对基于 OFI 的电子碰撞激发机制的 X 射线激光的研究必将会得到更大的进展。

3 光场感生电离 X 射线激光实验研究的国内进展及展望

国内的一些高校和研究所在对基于 OFI 的 X 射线激光的进行理论研究的同时,也开展了相应的实验研究,但实验研究相对于国外起步较晚。哈尔滨工业大学光电子技术研究所可调谐激光技术国家级重点实验室,利用购于美国光谱物理公司的重复频率 10Hz,能量 60mJ,脉宽 105fs,波长 800nm 的掺钛蓝宝石(Ti sapphire)激光系统正开展 N_i -like Kr($Kr \text{ } \textcircled{3} 31.9\text{nm}$)及 Pd -like Xe($Xe \text{ } \textcircled{3} 41.8\text{nm}$)的 XUV 激光的实验研究。靶室的结构类似于 Lemoff 等人所采用的结构,靶室与外面真空室也是通过薄的铜片隔离,由靶室出射的 X 射线辐射由 0.5m 真空紫外单色仪和单色仪出射狭缝处增益可达 10^6 的两级 Chevron 结构的微通道板及 4400 信号检测与分析系统等组成的信号检测系统进行检测。实验上已完成了聚焦系统、气体靶室、检测系统等的设计、加工及整个实验装置的联调,并已开展了初期物理实验,进一步的实验工作正在进行之中。

由于 N_i -like Kr 系统具有较高的理论增益和较低的阈值强度,具有很高的研究价值和较强的可行性,如果能够实现 N_i -like Kr 31.9nm 的 XUV 激光放大,就可以将基于 OFI 电子碰撞机制的 XUV 激光向短波长推进一步,这将对基于 OFI 的 X 射线激光的研究具有重要的意义。随着超短脉冲、超高功率激光器的进一步发展,为基于 OFI 的 X 射线激光的研究将提供更加有利的驱动源,所以,基于 OFI 的 X 射线激光的研究在 X 射线激光的研究领域将占据越来越重要的地位。

参 考 文 献

- 1 Matthews D L, Hagelstein P L, Rosen M D *et al.* Phys Rev Lett, 1985; 54(2): 110~ 113
- 2 Suckewer S, Skinner C H, Milchberg *et al.* Phys Rev Lett, 1985; 55(17): 1753~ 1756
- 3 Hara T, Ando K, Kusakabe N *et al.* J A P, 1989; 29: 1010~ 1012
- 4 Kim D, Skinner C H, Umesh G *et al.* Opt Lett, 1989; 14(13): 665~ 667
- 5 Basu S, Hagelstein P L, Goodberlet J G *et al.* Appl Phys B, 1993; 57(5): 303~ 307
- 6 Rocca J J, Shlyaptsev V, Tomasel F G *et al.* Phys Rev Lett, 1994; 73(16): 2192~ 2195
- 7 Corkum P B, Burnett N H. OSA Proceedings Series, 1988; 2: 225
- 8 Burnett N H, Corkum P B. J O S A B, 1989; 6(6): 1195~ 1199
- 9 Corkum P B, Burnett N H, Brunel F. Phys Rev Lett, 1989; 62(11): 1259~ 1262
- 10 Burnett N H, Enright G D. IEEE J Q E, 1990; 26(10): 1797~ 1808
- 11 Jones W W, Ali A W. A P L, 1975; 26(6): 450~ 451
- 12 Peyraud J, Peyraud N. J A P, 1972; 43(7): 2993~ 2996
- 13 Amendt P, Eder D C, Wilks S C. Phys Rev Lett, 1991; 66(20): 2589 ~ 2592
- 14 Eder D C, Amendt P, Wilks S C. Phys Rev A, 1992; 45(9): 6761~ 6772
- 15 Lemoff B E, Barty C P J, Harris S E. Opt Lett, 1994; 19(8): 569~ 571
- 16 王 骥, 张杉杉, 卢兴发 *et al.* 光学学报, 1999; 19(2): 201~ 205

高斯光束通过位相板后的变化*

罗时荣 吕百达

(四川大学激光物理与化学研究所, 成都, 610064)

摘要: 对基模和高阶高斯光束通过位相板后的变化作了详细的计算分析。研究表明, 位相板可以改变光场分布和用功率含量百分比定义的 M_c^2 因子, 甚至使 $M_c^2 < 1$, 但不能改善用二阶矩定义的光束传输因子 M^2 。

关键词: 高斯光束 位相板 光束传输因子 M^2

Changes in Gaussian beams passing through a phase plate

Luo Shirong, L Baida

(Institute of Laser Physics & Chemistry, Sichuan University, Chengdu, 610064)

Abstract: Changes in fundamental and higher-order Gaussian beams propagating through a phase plate have been studied numerically in detail. The results have shown that the phase plate can change the field distribution and M_c^2 factor based on the power content definition, even $M_c^2 < 1$. However, the beam propagation factor M^2 based on the second moments definition can not be improved by using the phase plate.

Key words: Gaussian beam phase plate beam propagation factor M^2

* 国家高技术 863-416-2 课题资助。

- 17 Ammosov M V, Delone N B, Krainov V P. Sov Phys JETP, 1986; 64(6): 1191~ 1194
- 18 Augst S, Strickland D, Meyerhofer D D *et al.* Phys Rev Lett, 1989; 63(20): 2212~ 2215
- 19 Cowan R D. U of Calif Press, Berkeley, Calif, 1981; Secs. 8-1, 16-1 and 18-13
- 20 Nagata Y, Midorikawa K, Kubodera S *et al.* Phys Rev Lett, 1993; 71(23): 3774~ 3777
- 21 Eder D C, Amendt P, Dasilva L B *et al.* Physics Plasmas, 1994; 1(5): 1744~ 1752
- 22 Krushelnick K M, Tighe W, Suckewer S. J O S A B, 1996; 13(2): 306~ 311
- 23 Fill E, Bargstrom S, Larsson *et al.* Phys Rev E, 1995; 51(6): 6016~ 6027
- 24 Chichkov B N, Egbert A, Eichmann H *et al.* Phys Rev A, 1995; 52(2): 1629~ 1639
- 25 Amendt P, Eder D C, London R A *et al.* SPIE, 1993; 1860: 140
- 26 Sullivan A, Hamster H, Gordon R A *et al.* SPIE, 1994; 2012: 234
- 27 Durfee III C G, Milchberg H M. Phys Rev Lett, 1993; 71(15): 2409~ 2412
- 28 Kozubkin D V, Nam C H, Suckewer S. Phys Rev Lett, 1996; 77(26): 5206~ 5209
- 29 Lemoff B E, Yin G Y, Gordon C L *et al.* Phys Rev Lett, 1995; 74(9): 1574~ 1577
- 30 Pretzler G, Fill E E. Phys Rev E, 1997; 56(2): 2112~ 2117

* * *

作者简介: 卢兴发, 男, 1970 年生, 博士生。主要从事强光场下的原子电离及基于光场感生电离 X 射线激光的研究。