

极紫外光梳的耦合输出方式比较研究

肖峥嵘^{1,2}, 朱穆峰^{1,2}, 张津³, 华林强^{1,2*}, 许松坡¹, 刘阳妮⁴, 杨文星⁴, 柳晓军^{1,2**}¹中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 波谱与原子分子物理国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;²中国科学院大学, 北京 100049;³广东大湾区空天信息研究院, 广东 广州 510535;⁴长江大学物理与光电工程学院, 湖北 荆州 434023

摘要 极紫外(XUV)光梳是近些年诞生的一种相干性良好的极紫外光源,它在精密谱测量以及强场物理领域有诸多应用。在极紫外光梳的产生过程中,极紫外光的耦合输出方式决定了其耦合输出效率、光强和频谱范围,是极紫外光梳产生装置中极其重要的一环。基于自主搭建的极紫外光梳平台,分别使用布儒斯特片和微纳光栅进行极紫外光的耦合输出,均可以得到微瓦量级的谐波输出。对比这两种方法可得,微纳光栅方法最终获得的谐波功率更高,空间结构也更加理想。而布儒斯特片易于制作、安装、清洁和更换,但作为透射型元件,其引入的非线性效应不利于极紫外光梳的性能优化。该研究为搭建性能优异的极紫外光梳系统提供了重要参考。

关键词 极紫外; 极紫外光梳; 耦合输出方式; 布儒斯特片; 微纳光栅

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1134015

Comparison of Out-Coupling Methods for Extreme Ultraviolet Comb

Xiao Zhengrong^{1,2}, Zhu Mufeng^{1,2}, Zhang Jin³, Hua Linqiang^{1,2*}, Xu Songpo¹,
Liu Yangni⁴, Yang Wenxing⁴, Liu Xiaojun^{1,2**}¹Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;³GBA Branch of Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510535, Guangdong, China;⁴School of Physics and Optoelectronic Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434023, Hubei, China

Abstract Extreme ultraviolet (XUV) comb is a newly developed coherent laser source in the extreme ultraviolet region. It has numerous applications not only in the field of precision spectroscopic measurement but also in strong field physics. The out-coupling methods for XUV comb are extremely crucial in building an XUV comb as they determine the out-coupling efficiency, light intensity, and spectral range of the comb. Based on a home-build XUV comb system, we use the Brewster plate and the self-designed micro-nano grating to out-couple the generated XUV light. With both methods, we can obtain harmonics with a power of microwatt level. Comparing the two methods, we can obtain higher harmonic power and better spatial structure with the micro-nano grating method, while it is easier to obtain, install, clean, and replace the Brewster plates. However, as a transmitting optical element, it introduces nonlinear effects and thus hinders the performance of the XUV comb setup. Our study provides important information for building an XUV comb setup with outstanding performance.

Key words extreme ultraviolet; extreme ultraviolet comb; out-coupling method; Brewster plate; micro-nano grating

收稿日期: 2022-02-21; 修回日期: 2022-03-30; 录用日期: 2022-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(U21A20435)

通信作者: *hualq@wipm.ac.cn; **xjliu@wipm.ac.cn

1 引言

21 世纪初,科学家们通过对钛宝石激光器的重复频率和载波-包络偏置频率进行精确锁定,首次实现了光学频率梳,简称光梳^[1]。光梳兼具宽光谱和窄线宽的特性,自问世以来,就作为一种便捷的精密测量工具,广泛应用于各个领域,如高精度微波源产生、基本物理常数测量、引力波测量、超稳光学原子钟等^[1-6]。作为光梳技术在高频域($> 2.5 \times 10^{15}$ Hz)的拓展,极紫外(XUV)光学频率梳技术^[7-8]的诞生进一步促进了极紫外波段的精密测量的应用,如开展 He⁺ 和 Li⁺ 等少电子离子的精密谱测量,以实现量子电动力学理论的高精度检验^[9-10],确定核电荷半径和进行基本物理常数的精确测量^[11-13],寻找 Th 钟跃迁谱线^[14-17],利用光梳直接冷却原子、离子^[18]等。

目前,极紫外光梳的实现都是使用非线性频率转换方式,即利用近红外光梳脉冲与稀有气体原子相互作用产生的高次谐波将光梳波长从近红外波段转化到极紫外波段。为实现稀有气体高次谐波过程所必需的峰值光强,还需要通过飞秒激光共振增强腔来进一步实现被锁定在高精度微波源上的驱动光梳的功率放大。在共振增强腔内,产生的高次谐波与高功率红外驱动光梳共线传播,因此,共振增强腔内极紫外光的高效耦合输出是实现高性能极紫外光梳的重要环节。

为了探索高效、便捷的耦合输出方法,科研工作者们展开了不懈的努力^[7-8,19-22]。最先被采用的方法是使用布儒斯特片实现耦合输出^[7-8],具体来讲,就是将晶体薄片按照驱动光的布儒斯特角方向放置,所以线偏振驱动光会完全透射。但对于谐波而言,该入射角度并不对应其布儒斯特角,因此,部分短波长的高次谐波会从布儒斯特片上反射。Gohle 等^[7]利用蓝宝石晶体薄片来耦合输出极紫外光梳,他们采用 1 mm 厚的蓝宝石薄片以入射角为 60.4° 摆放,波长为 800 nm 的 p 偏振驱动光在该表面不发生反射,而该表面对于 30~80 nm 波段的高次谐波则有约 10% 的反射率。随后,其他各种耦合输出方式被提出^[19-22],如掠入射片耦合输出法^[22]、微纳光栅耦合输出法^[19]、小孔腔镜耦合输出法^[20]、非共线耦合输出法^[21]等。这些方法各有特色,例如: Hänsch 小组利用小孔腔镜耦合输出法,实现了目前最短波长(约 12 nm)的极紫外光梳的耦合输出;Ye 小组利用非共线耦合输出法,实现了目前功率最高

的极紫外光梳($\sim 600 \mu\text{W}@97 \text{ nm}$)的耦合输出。这些工作为探索极紫外光梳高效耦合输出方法、提升极紫外光梳性能提供了良好的方案。

本文分别使用蓝宝石晶体布儒斯特片和微纳光栅来实现极紫外光梳的耦合输出,通过对两者的结果进行比较,分析两种方法对极紫外光梳的产生与耦合输出的影响。首先通过理论计算,模拟了蓝宝石晶体布儒斯特片和自主设计微纳结构光栅的耦合输出效率。以此为基础,在实验上分别用两种方法进行极紫外光梳的耦合输出,对比分析了两种方法得到谐波光谱的结果,并且比较两种方法各自的优势,这为搭建性能优异的极紫外光梳系统提供参考。

2 耦合输出效率的理论计算

2.1 布儒斯特片

高次谐波在布儒斯特片上是通过反射的方式实现耦合输出的,使用菲涅耳公式计算其耦合输出效率。p 偏振入射光的反射率为

$$R_{\text{eff}} = \frac{\tan(i_1 - i_2)}{\tan(i_1 + i_2)}, \quad (1)$$

式中: i_1 、 i_2 分别为入射角与折射角。 i_B 为驱动光在该材料上的布儒斯特角,满足

$$\tan i_B = n_2/n_1, \quad (2)$$

式中: n_1 、 n_2 分别为驱动光在真空中与材料中的折射率,且折射角满足 $i_1 + i_2 = \pi/2$ 。控制特定波长入射光为 p 偏振且按照布儒斯特角入射,这样入射光的理论反射率为 0,而其他波长的光则具有一定的反射率。因此,材料的特性将决定极紫外光的耦合输出效率。在极紫外光梳系统中,布儒斯特片是安装在飞秒共振腔内部,因此要求其厚度薄($\approx 0.2 \text{ mm}$)且表面粗糙度好(表面粗糙度 $R_{\text{RMS}} \leq 5 \text{ \AA}$)。目前,仅有二氧化硅、蓝宝石晶体等极少数材料满足上述加工要求。考虑到极紫外波段(10~120 nm)整体的耦合输出效率,选择蓝宝石晶体制作布儒斯特片。如图 1 所示,当入射光波长为 1038 nm,入射角为蓝宝石晶体的布儒斯特角 60.2° 时,30~80 nm 波段的极紫外光有 10% 左右的反射率。

2.2 微纳光栅

微纳光栅是另一种可以高效耦合输出极紫外光梳的器件。作为飞秒激光共振增强腔的一部分,它要求对基频光全反射,而对谐波具有一定的耦合输出。因此,对微纳光栅的设计决定了飞秒激光共振增强腔的增强倍数和极紫外光的耦合输出效率。这

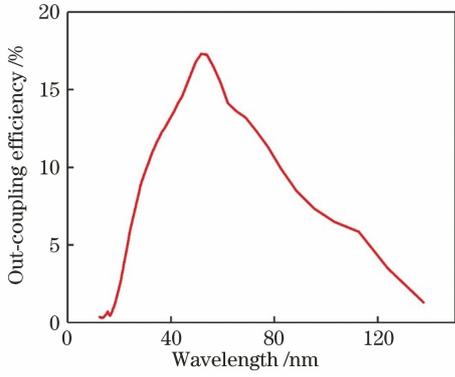


图 1 模拟极紫外光在 Al_2O_3 布儒斯特片上的耦合输出效率
Fig. 1 Simulated out-coupling efficiency of XUV light on Al_2O_3 Brewster plate

里使用严格耦合波法来计算微纳光栅上基频光的反射率和极紫外光的衍射效率^[23-24]。严格耦合波法是基于麦克斯韦方程组对光栅各级衍射效率的严格精密求解,常用于各种光栅结构设计中。在一维情况下,计算横电(TE)模式光场在矩形光栅上的衍射效率。首先,建立如图 2(a)所示的坐标系,其中 Λ 为光栅周期, d 为光栅凹槽深度, θ 为入射角,入射光场可表示为

$$E_{\text{inc}} = \exp[-jk_0 n_1 (\sin \theta x + \cos \theta z)], \quad (3)$$

式中: E_{inc} 为入射电场; $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, λ_0 为入射光波长; n_1 为真空中折射率。入射光进入光栅区域后,衍射光形成各级反射光与透射光,在入射区域与出射区域的电场分布分别为

$$\begin{cases} E_{\text{I}} = E_{\text{inc},y} + \sum_i R_i \exp[-j(k_{xi}x - k_{1,zi}z)] \\ E_{\text{II}} = \sum_i T_i \exp\{-j[k_{xi}x - k_{\text{II},zi}(z-d)]\} \end{cases}, \quad (4)$$

其中

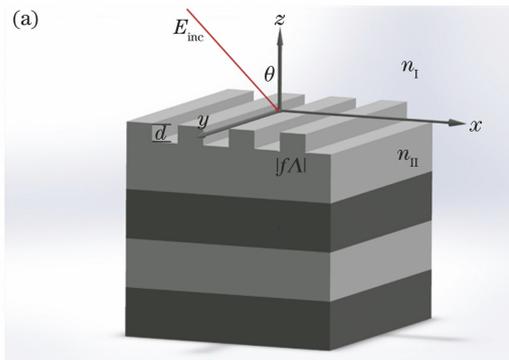


图 2 极紫外光栅结构示意图及其耦合输出效率。(a)极紫外光栅结构示意图;(b)耦合输出效率

Fig. 2 Diagram of extreme ultraviolet grating structure and its out-coupling efficiency. (a) Diagram of extreme ultraviolet grating structure; (b) out-coupling efficiency

$$\begin{cases} k_{xi} = k_0 [n_1 \sin \theta - i(\lambda_0/\Lambda)] \\ k_{l,zi} = \begin{cases} k_0 [n_l^2 - (k_{xi}/k_0)^2]^{1/2} & k_0 n_l > k_{xi}, l = \text{I, II}, \\ -jk_0 [(k_{xi}/k_0) - n_l^2]^{1/2} & k_{xi} > k_0 n_l \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $E_{\text{inc},y}$ 为入射电场的 y 方向分量; R_i 和 T_i 为反射和透射的第 i 级衍射的归一化电场振幅; n_{II} 为介质中折射率。在光栅区域的电场和磁场分别为

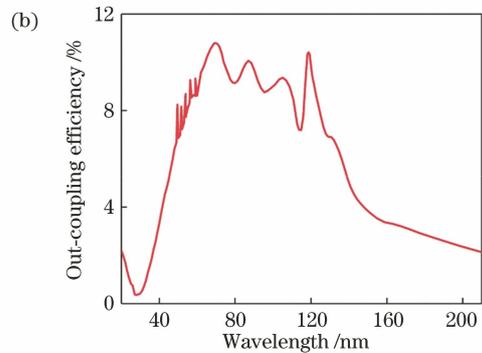
$$\begin{cases} E_{\text{g}} = \sum_i S_{yi}(z) \exp(-jk_{xi}x) \\ H_{\text{g}} = -j \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{1/2} \sum_i U_{xi}(z) \exp(-jk_{xi}x) \end{cases}, \quad (6)$$

式中: ϵ_0 和 μ_0 分别为真空介电常数和真空磁导率; S_{yi} 和 U_{xi} 分别为电场和磁场分量的第 i 级振幅。联立以上公式,根据麦克斯韦方程和边界的连续性,可得光栅的每一级衍射效率为

$$\begin{cases} D_{ri} = R_i R_i^* \text{Re} \left(\frac{k_{1,zi}}{k_0 n_1 \cos \theta} \right) \\ D_{ti} = T_i T_i^* \text{Re} \left(\frac{k_{\text{II},zi}}{k_0 n_1 \cos \theta} \right) \end{cases}, \quad (7)$$

式中: D_{ri} 和 D_{ti} 分别为衍射光栅每一级反射与透射的效率; R_i^* 为 R_i 的共轭; T_i^* 为 T_i 的共轭。

基于以上方法,通过对光栅不同的入射角、周期、深度与占空比进行撒点测算,在保证红外光 0 级反射率达到 99.95% 以上的同时,优化极紫外波段的衍射效率,以获得最大的目标谐波输出效率。通过各种参数的扫描测试,得到微纳光栅的最优参数为:入射光为 s 偏振,入射角为 70° ; SiO_2 和 Ta_2O_5 层交叠形成高反膜;表层为 SiO_2 , 并在其上刻蚀光栅,光栅周期为 420 nm,槽深 40 nm,占空比为 70%。其在 1040 nm 处的反射率约为 99.95%,而在 50~120 nm 的极紫外波段则有 8% 以上的耦合输出效率[图 2(b)],最短工作波长约为 30 nm。



3 两种耦合输出方式的实验比对

实验中使用一台重复频率为 100 MHz 的掺镱光纤激光器作为驱动光源, 锁定其重复频率与载波-包络偏置频率。激光中心波长为 1038 nm, 最高输出功率约为 100 W, 脉宽约为 100 fs。通过飞秒激光共振增强腔对驱动光梳进行功率放大, 共振增强腔内的平均功率可达到 6 kW, 共振增强腔内的焦点大小约为 $8 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$, 峰值功率最高可达 $4 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$, 达到了实现高次谐波所需要的峰值功率^[25-26]。在焦点处, 使用直径为 $150 \mu\text{m}$ 的气体喷嘴输送氙气, 氙气作为高次谐波过程的工作介质, 之后分别使用两种耦合输出方法输出极紫外光梳。

首先使用布儒斯特片法耦合输出极紫外光梳, 具体方案如图 3(a) 所示, 图中 PZT 为压电陶瓷, MA、MB、MC、MD、ME、MF 为高反镜, MF(IC) 为输入耦合镜, SS plate 为水杨酸钠板。布儒斯特片尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 0.33 \text{ mm}$ 的 Al_2O_3 晶体薄片, 晶向为 (001), 沿 z 轴切割, $R_{\text{RMS}} \leq 5 \text{ \AA}$, 未镀膜。在薄片后方放置一个掠入射的极紫外光栅 (Mcpherson Inc.) 以将各阶谐波分离开, 该光栅在波长为 $30 \sim 80 \text{ nm}$ 范围内的衍射效率约为 30%。

空间分离的极紫外光由一块涂有水杨酸钠的铝板来成像。水杨酸钠可以吸收极紫外光并释放蓝色荧光, 并且极紫外波段的量子效率几乎不变, 利用水杨酸钠可以便捷地实现谐波谱的测量。实验中使用的红外光梳功率约为 30 W, 红外光梳在飞秒共振腔内的平均功率约为 4.3 kW。红外驱动光将以完全透射的方式直接穿过 Al_2O_3 薄片 (以入射角 60.2° 摆放), 共线谐波则会被部分反射后耦合输出至共振增强腔外, 并以 87° 掠入射到极紫外光栅上。各阶次谐波在光栅上衍射后在水杨酸钠板上呈现肉眼可见的蓝色荧光, 直接用相机实时拍摄其影像, 如图 3(b) 所示。为了直接测量高次谐波 (如 61 nm 处的 17 次谐波) 的功率, 在水杨酸钠板中间开一个约 2 mm 宽的狭缝, 然后将一个带有铝膜且可工作在极紫外波段的光电二极管 (AXUV100Al, Opto Diode Corp) 粘在后方, 光电二极管在 $20 \sim 80 \text{ nm}$ 范围内的响应为 0.15 A/W 。通过皮安计直接读取光电二极管产生的电流, 即可测量特定级次谐波的功率, 测量到 17 次谐波的功率约为 $0.2 \mu\text{W}$ 。根据水杨酸钠板上荧光的强度, 计算每一阶谐波的功率。通过光栅衍射效率反演推算出耦合输出的各阶次谐波的功率, 结果如图 3(c) 所示。

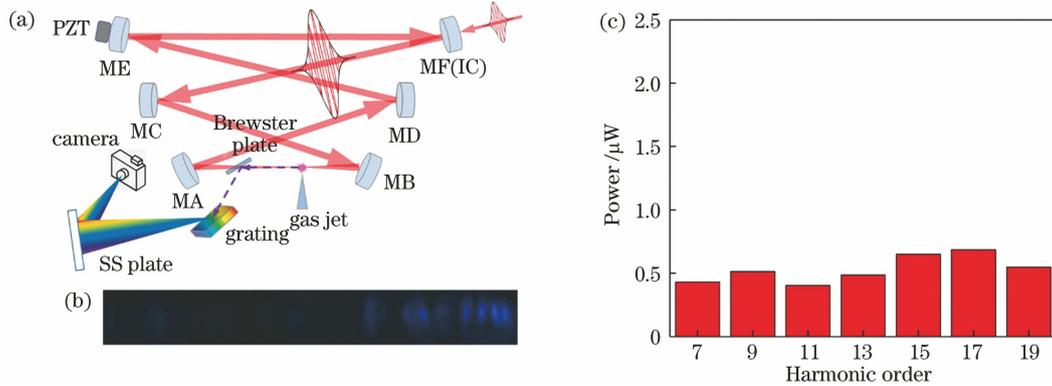


图 3 布儒斯特片输出极紫外光的实验方案与结果。(a) 布儒斯特片耦合输出极紫外光的实验装置; (b) 高次谐波在水杨酸钠板上的成像; (c) 各阶次谐波的功率

Fig. 3 Experimental scheme and results with Brewster plate for XUV light out-coupling. (a) Experimental device with Brewster plate for for XUV light out-coupling; (b) image of high-order harmonics fluorescing on a plate coated with sodium salicylate; (c) power of harmonics

使用微纳光栅 (由同济大学王占山老师课题组加工制作) 测试极紫外光梳的耦合输出, 其工作方案如图 4(a) 所示。微纳光栅整体由 SiO_2 和 Ta_2O_5 层交叠形成高反膜; 表层为 SiO_2 , 并在其上刻蚀光栅, 光栅周期为 420 nm, 槽深为 40 nm, 占空比为 70%。入射光为 s 偏振, 入射角为 70° 。与布儒斯特片不同的是, 两面凹面镜之间的光栅可作为一个反射光学

元件实现腔内飞秒脉冲的共振增强, 且可直接输出各级分开的谐波, 无需引入其他分光元件。实验中使用的红外光梳功率约为 30 W, 飞秒共振腔内功率约为 4.5 kW。微纳光栅以 70° 入射角放置, 红外驱动光将直接反射, 而各阶谐波会以各自波长所对应的衍射角度在水杨酸钠板上成像, 成像结果如图 4(b) 所示。实验中用相同的方法直接测量了 17 次

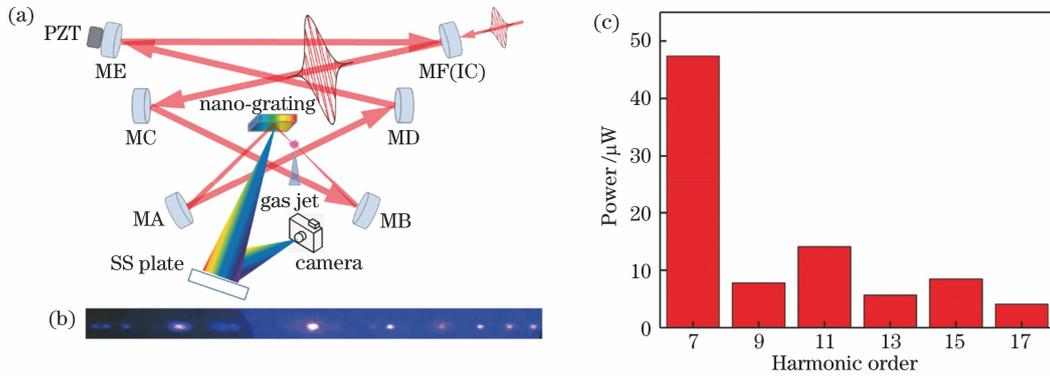


图 4 微纳光栅输出极紫外光的实验方案与结果。(a)微纳光栅耦合输出的实验装置;(b)高次谐波在水杨酸钠板上的成像;(c)各阶次谐波的功率

Fig. 4 Experimental scheme and results with nano-grating for XUV light out-coupling. (a) Experimental scheme with nano-grating for out-coupling; (b) image of high-order harmonics fluorescing on a plate coated with sodium salicylate; (c) power of harmonics

谐波的功率,测量值为 $4.1 \mu\text{W}$ 。通过水杨酸钠板上荧光强度的对比,可以得到整个谐波谱的功率,结果如图 4(c)所示。

从图 3 和图 4 可以看出,两种方法均可以实现极紫外光梳的耦合输出,谐波功率均在微瓦量级,微纳光栅的功率较高。造成耦合输出功率差异的原因并不能直接归结为耦合效率的差异,还需要考虑其他更重要的因素:布儒斯特片作为透射型光学元件,在高次谐波产生过程中会引入较大的色散,展宽了驱动光的脉宽,降低了焦点处的峰值功率,从而降低了高次谐波产生功率。造成耦合输出功率差异的另一个原因是谐波的空间结构。微纳光栅耦合输出的高次谐波具有清晰的空间结构,例如 7 次谐波的外环结构^[27-28],这将有利于强场动力学的研究。除了以上提到的耦合输出功率和空间结构差异之外,两种方法耦合输出极紫外光的另一个重大差异在于:布儒斯特片耦合输出的所有级次谐波共线传播,而微纳光栅耦合输出的各阶谐波均在空间上分离。如果需要测量极紫外光梳的频谱范围,前者需要进一步利用极紫外光栅。从水杨酸钠板上产生的图像可以看出:由微纳光栅输出的各阶谐波功率明显高于布儒斯特片结合极紫外光栅的方式,这是因为极紫外光栅的引入进一步降低了谐波的功率。因此,相较于微纳光栅,最终在水杨酸钠板上观察到的由布儒斯特片输出的高次谐波强度要低一个数量级。空间分离各频率的光源在精密谱测量中十分重要,它可以消除其他光源带来的不必要的噪声,如 Stark 频移^[29]等。这一点在布儒斯特片耦合输出中需要特别注意。尽管布儒斯特片在理想状态下是不反射驱动光梳的,但在实际实验过程中,受安装角度的微

小差异、驱动光源偏振的纯度,以及布儒斯特片粗糙度等因素的影响,约 0.3% 的基频光被反射。考虑到共振增强腔工作时的平均功率为 $3\sim 4 \text{ kW}$,被反射基频光的平均功率约为 10 W ,因此,消除其带来的背景噪声十分必要。

除了谐波频谱的比较,这两个方法在其他方面也会给极紫外光梳装置带来不同的影响。从实验材料的获得上来看,布儒斯特片的加工难度远比光栅的加工难度低,安装也很简单。从实验过程来看,布儒斯特片是透射型光学元件,在高功率下会产生热效应,工作时间过长会损坏布儒斯特片;同时,透射元件会减小共振增强腔细度,展宽飞秒脉冲的脉宽,降低高次谐波功率。在实验中,布儒斯特片的引入明显引起飞秒脉冲脉宽的增加(色散效应),并且长时间工作会降低增强倍数(热效应损坏布儒斯特片)。因此,探索腔内脉宽压缩方法或在布儒斯特片表面镀极紫外反射膜,是提升其性能的可能途径。微纳光栅并非透射型光学元件,在色散效应的引入方面明显优于布儒斯特片。在实验的日常维护方面,布儒斯特片可以用无水丙酮擦拭,易于清洁;而微纳光栅则需复杂工艺来进行清洁。

4 结 论

分别使用布儒斯特片和微纳光栅两种耦合输出方法,在自主搭建的极紫外光学频率梳装置中实现了高次谐波(极紫外光)的耦合输出,并对比了两种方法的特点。使用布儒斯特片耦合输出极紫外光的方法简单,材料易加工,易清洁和更换,但劣势也很明显。布儒斯特片是一种透射型元件,会存在很强的热效应和非线性效应,减小共振增强腔细度并降

低放大倍数,增加飞秒脉冲的脉宽,进而影响高次谐波的产生。相比之下,利用微纳光栅的方法得到的高次谐波功率更高,并且微纳光栅可以直接将不同阶次的谐波以不同的衍射角分离出去。其次,相较于儒斯特片而言,微纳光栅输出的谐波空间分布更好,有利于进一步开展后续实验。另外,若需要进一步研究单一阶次谐波,微纳光栅输出的各阶次谐波在空间上是分立的,无需进一步使用极紫外光栅分离谐波,相较于儒斯特片而言,微纳光栅可以避免谐波在极紫外光栅上的衍射所带来的能量损耗,从而提高了谐波的输出功率。但是,由于实验中需要将微纳光栅靠近焦点,因此不能使腔内功率过高以免打坏光栅。本文工作可为进一步优化极紫外光梳的性能提供参考。

参 考 文 献

- [1] Jones D J, Diddams S A, Ranka J K, et al. Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis [J]. *Science*, 2000, 288(5466): 635-640.
- [2] Schnatz H, Lipphardt B, Helmcke J, et al. First phase-coherent frequency measurement of visible radiation[J]. *Physical Review Letters*, 1996, 76(1): 18-21.
- [3] Ferguson A I, Eckstein J N, Hänsch T W. A subpicosecond dye laser directly pumped by a mode-locked argon laser [J]. *Journal of Applied Physics*, 1978, 49(11): 5389-5391.
- [4] Hudson E R, Lewandowski H J, Sawyer B C, et al. Cold molecule spectroscopy for constraining the evolution of the fine structure constant [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(14): 143004.
- [5] Kourogi M, Enami T, Ohtsu M. A coupled-cavity monolithic optical frequency comb generator [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, 8(12): 1698-1700.
- [6] Ma L S, Bi Z Y, Bartels A, et al. Optical frequency synthesis and comparison with uncertainty at the 10⁻¹⁹ level [J]. *Science*, 2004, 303(5665): 1843-1845.
- [7] Gohle C, Udem T, Herrmann M, et al. A frequency comb in the extreme ultraviolet [J]. *Nature*, 2005, 436(7048): 234-237.
- [8] Jones R J, Moll K D, Thorpe M J, et al. Phase-coherent frequency combs in the vacuum ultraviolet via high-harmonic generation inside a femtosecond enhancement cavity [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(19): 193201.
- [9] Herrmann M, Haas M, Jentschura U D, et al. Feasibility of coherent xuv spectroscopy on the 1S-2S transition in singly ionized helium [J]. *Physical Review A*, 2009, 79(5): 052505.
- [10] Semczuk M. An ion trap for laser spectroscopy on lithium ions [D]. Warsaw: University of Warsaw, 2009.
- [11] Parthey C G, Matveev A, Alnis J, et al. Improved measurement of the hydrogen 1S-2S transition frequency [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(20): 203001.
- [12] Pohl R, Antognini A, Nez F, et al. The size of the proton [J]. *Nature*, 2010, 466(7303): 213-216.
- [13] Antognini A, Nez F, Schuhmann K, et al. Proton structure from the measurement of 2S-2P transition frequencies of muonic hydrogen [J]. *Science*, 2013, 339(6118): 417-420.
- [14] Berengut J C, Flambaum V V. Testing time-variation of fundamental constants using a ²²⁹Th nuclear clock [J]. *Nuclear Physics News*, 2010, 20(3): 19-22.
- [15] Campbell C J, Radnaev A G, Kuzmich A, et al. Single-ion nuclear clock for metrology at the 19th decimal place [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(12): 120802.
- [16] Seiferle B, von der Wense L, Bilous P V, et al. Energy of the ²²⁹Th nuclear clock transition [J]. *Nature*, 2019, 573(7773): 243-246.
- [17] von der Wense L, Seiferle B, Laatiaoui M, et al. Direct detection of the ²²⁹Th nuclear clock transition [J]. *Nature*, 2016, 533(7601): 47-51.
- [18] Davila-Rodriguez J, Ozawa A, Hänsch T W, et al. Doppler cooling trapped ions with a UV frequency comb [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(4): 043002.
- [19] Yost D C, Schibli T R, Ye J. Efficient output coupling of intracavity high-harmonic generation [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(10): 1099-1101.
- [20] Pupeza I, Holzberger S, Eidam T, et al. Compact high-repetition-rate source of coherent 100 eV radiation [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(8): 608-612.
- [21] Moll K D, Jones R J, Ye J. Output coupling methods for cavity-based high-harmonic generation [J]. *Optics Express*, 2006, 14(18): 8189-8197.
- [22] Pronin O, Pervak V, Fill E, et al. Ultrabroadband efficient intracavity XUV output coupler [J]. *Optics Express*, 2011, 19(11): 10232-10240.
- [23] Moharam M G, Gaylord T K, Grann E B, et al. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings [J]. *Journal of the Optical Society of America A*,

- 1995, 12(5): 1068-1076.
- [24] Moharam M G, Gaylord T K, Pommet D A, et al. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1995, 12(5): 1077-1086.
- [25] Zhang J, Hua L Q, Yu S G, et al. Femtosecond enhancement cavity with kilowatt average power[J]. *Chinese Physics B*, 2019, 28(4): 044206.
- [26] Zhang J, Hua L Q, Chen Z, et al. Extreme ultraviolet frequency comb with more than 100 μ W average power below 100 nm [J]. *Chinese Physics Letters*, 2020, 37(12): 124203.
- [27] Zhu M F, Zhang J, Hua L Q, et al. Molecular structural effects in below- and near-threshold harmonics in XUV-comb generation [J]. *Physical Review A*, 2021, 104(4): 043111.
- [28] Yost D C, Schibli T R, Ye J, et al. Vacuum-ultraviolet frequency combs from below-threshold harmonics[J]. *Nature Physics*, 2009, 5(11): 815-820.
- [29] Kandula D Z, Gohle C, Pinkert T J, et al. Extreme ultraviolet frequency comb metrology [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(6): 063001.