

基于强激光辐照固体锡靶产生极紫外 光源的实验研究^{*}

蔡 懿 王文涛 杨 明 刘建胜[†] 陆培祥 李儒新 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800)

(2007 年 10 月 27 日收到, 2008 年 3 月 7 日收到修改稿)

建立了一套利用高功率 YAG 激光器辐照固体锡靶产生高转换效率极紫外光 (extreme ultraviolet) 源的实验装置. 利用建立的实验装置开展了极紫外光源的强度和转换效率与抽运激光强度关系的实验研究, 发现极紫外光源的转换效率随抽运激光强度的变化具有饱和效应. 实验发现: 当抽运激光能量达到 250 mJ 时, 极紫外光源的转换效率最高, 波长为 13.5 nm 处 0.27 nm 带宽范围内的极紫外光源的能量转换效率为 1.6%, 此时对应的激光强度为 1.8×10^{11} W/cm².

关键词: 极紫外光, 转换效率

PACC: 5225P, 5250J, 3370J

1. 引 言

强激光与物质相互作用产生的激光等离子体可以认为是一个高效的 X 射线源, 在许多方面有着广泛的应用, 如 X 射线摄像术^[1]、光刻^[2]等, 也可作为稠密物质的短脉冲探针^[3,4]. 极紫外光刻 (extreme ultraviolet lithography, 简记为 EUVL) 是以波长为 10—14 nm 的极紫外光为曝光光源的微电子光刻技术, 出于安全性的考虑, 波长一般采用 13.5 nm. 它是深紫外光刻 (deep ultraviolet lithography, 简记为 DUVL) 向更短波长的自然延伸, 本质上与光学光刻十分相似, 只是由于极紫外光在材料中存在强烈吸收, 使得 EUVL 的光学系统必须采用反射式^[5]. EUVL 是首选的下一代光刻技术, 能将光刻分辨率提高到优于 50 nm^[2]. 与其他以电子束或离子束作为光刻源的新型光刻技术相比, 它的优势在于能最大限度地继承 DUVL 的关键技术和工艺. 商用的光刻机要求极紫外光源在波长 13.5 nm 处 0.27 nm 带宽范围内能产生 300 W 的功率.

在过去的研究中, 为了提高极紫外光的效率, 不同的激光辐射条件都被充分考虑过, 如激光脉冲宽

度、激光波长、聚焦光斑大小以及多脉冲等作用^[6]. 常用来做极紫外光源研究的靶材有氙^[7]、锡^[8,9]、氧^[10]和锂^[11,12]等, 其中锡等离子体的极紫外光转换效率尤为高^[8], 而且有装置结构简单的优点. 有关激光与锡平板直接作用产生极紫外光转换效率最好的结果都在 1.5% (13.5 nm 波长, 0.27 nm 带宽) 左右^[8]. 为了获得更高的转换效率, 最近的研究中使用了不同形式的锡靶, 如氧化锡、二氧化锡^[9,13]及锡膜^[14].

本文通过建立高功率 YAG 激光与固体锡靶相互作用的实验装置, 开展了极紫外光源强度和转换效率与抽运激光强度关系的实验研究. 研究发现极紫外光源的转换效率随抽运激光强度的变化具有饱和效应. 同时还发现当抽运激光能量在 250 mJ 时, 极紫外光源的转换效率最高, 达到 1.6% (13.5 nm 波长, 0.27 nm 带宽).

2. 实验装置

用于高功率 YAG 激光与固体锡靶相互作用的实验装置如图 1 所示. 该装置包括真空靶室系统、靶架步进扫描三维计算机控制系统、X 射线平场光栅

^{*} 上海市科学技术委员会光科技专项行动计划 (批准号 036105035) 资助的课题.

[†] E-mail: michaeljs_liu@mail.siom.ac.cn

光谱仪以及打靶光学系统. 实验中采用的 YAG 激光器参数如下: 重复频率为 10 Hz, 最大单脉冲能量为 525 mJ, 激光波长为 532 nm, 激光脉冲宽度为 7.5 ns. 一束 YAG 激光进入真空靶室后经由薄透镜聚焦(焦距为 20 cm)作用在固体锡块上产生高密度等离子体. 等离子体辐射的 X 射线由自行设计建造的 X 射线平场光栅光谱仪收集测量. 平板锡块固定在步进靶架上, 便于精确控制移动. X 射线平场光栅光谱仪的结构及参数如图 2 所示.

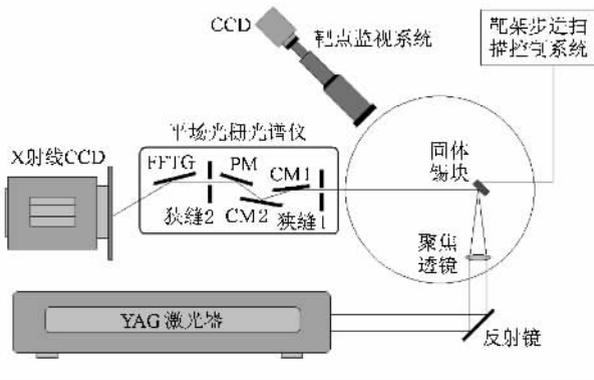


图 1 YAG 激光辐照固体锡靶产生极紫外光源的实验装置示意图

X 射线探测系统采用的是平焦场掠入射结构^[15], 其优点在于光栅的成像不是在一个罗兰圆上, 而是在一个几乎平直的焦面上, 便于 CCD 采集. 如图 2 所示, 其中 CM1 和 CM2 是柱面金镜, 前者在竖直方向将靶点成像在 X 射线 CCD 上, 后者在水平方向上将靶点成像在狭缝 2 上; PM 是平面反射镜, FFTG 是日本日立公司生产的平场光栅, 这是一个变距凹面光栅, 闪耀角为 3.2° , 在 13.5 nm 波长附近的一级衍射效率约为 10%; X 射线 CCD 是美国普林斯顿仪器(Princeton Instruments)公司的产品, 型号为 7386-0002, 单个像素大小为 $20 \mu\text{m}$, 角度 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 分别为 $88.65^\circ, 87.37^\circ, 87.00^\circ$. 强激光脉冲与锡靶作用产生的极紫外光经过两个柱面金镜和一个平面金镜之后, 再由平场光栅色散, 谱线最终成像在 X 射线 CCD 上. 整个系统采用掠入射结构, 以提高金镜的反射率. 当极紫外光在金镜上的入射角为 88° 时, 金镜反射率为 92%.

此外, 在系统中加入了靶点监视系统(图 1). 它由一个长工作距离、放大率为 20 倍的显微镜和 CCD 组成, 它可以提供百微米的视场, 以便监视靶点的位置和大小.

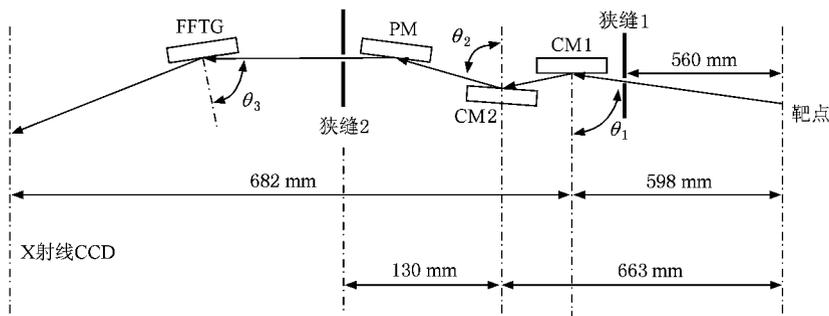


图 2 X 射线平场光栅光谱仪的结构示意图

图 3 为平场光栅衍射示意图, 图中 L 是光栅中心到 CCD 的距离, α 是 X 射线入射角, x_λ 是波长为 λ 的谱线在 CCD 上对应的位置, θ_λ 则是相应的衍射角, x_{λ_0} 和 θ_0 是波长已知为 λ_0 的定标谱线在 CCD 对应的位置和衍射角. 根据光栅方程可得

$$d(\sin\alpha - \sin\theta_\lambda) = \lambda, \quad (1)$$

$$d(\sin\alpha - \sin\theta_0) = \lambda_0, \quad (2)$$

其中 d 是光栅刻槽间距. 由图 3 中的几何关系容易得出

$$x_\lambda = L \cot\theta_\lambda, \quad (3)$$

$$x_0 = L \cot\theta_0. \quad (4)$$

由方程(1)~(4)可以解得光谱中波长 λ 与相对位置($x_\lambda - x_0$)的关系为

$$\lambda = d \left\{ \sin\alpha - \sin \left[\arccot \left(\cot\theta_0 + \frac{x_\lambda - x_0}{L} \right) \right] \right\}. \quad (5)$$

只要知道谱线在 CCD 上与已知定标谱线的相对位置, 就可以通过(5)式算出对应的波长.

我们采用铝的吸收边进行定标. 铝会强烈吸收波长小于 17.08 nm 的 X 射线, 在谱线中形成一个非常陡峭的吸收边. 实验时在谱仪前加上厚度为 80 nm 的铝膜, 读出 CCD 上吸收边的位置, 便可定标.

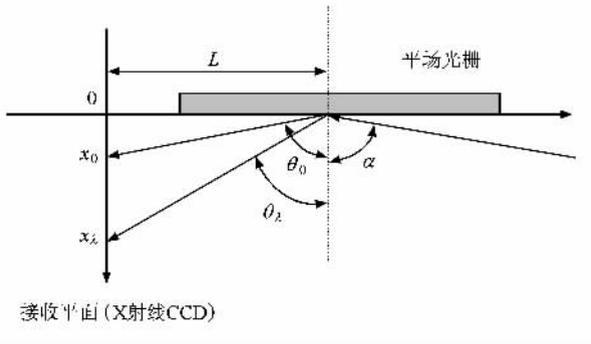


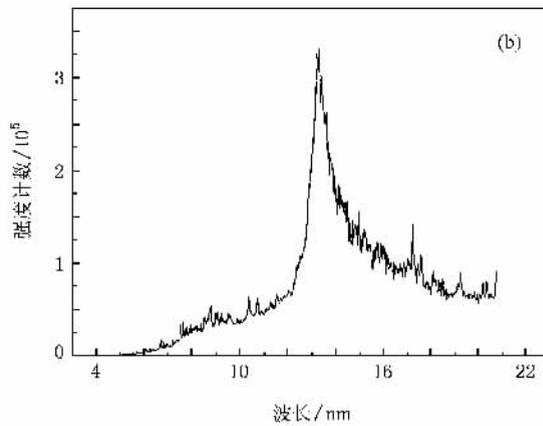
图 3 X 射线平场光栅衍射示意图

3. 实验结果

我们利用图 1 所示的实验系统开展了 YAG 激光辐照固体锡靶产生极紫外光源的强度和转换效率随抽运光强依赖关系的实验研究,发现极紫外光源的转换效率随抽运激光强度的变化具有饱和效应.图 4(a)是我们利用 X 射线平场光栅光谱仪和 X 射线 CCD 拍摄到的一幅典型的具有一维空间分辨的光谱.通过铝的吸收边对光谱进行标定获得的极紫外光谱结构如图 4(b)所示.



(a)



(b)

图 4 典型的强激光辐照固体锡靶产生的极紫外光谱 (a)利用 X 射线平场光栅光谱仪和 X 射线 CCD 拍摄的具有一维空间分辨的光谱 (b)通过铝的吸收边对光谱进行标定获得的极紫外光谱



通过改变抽运激光的能量从而改变辐照到固体锡靶上的峰值功率密度,我们分别测量了抽运光不同峰值功率密度下极紫外光源的光谱,结果如图 5 所示.抽运激光的单脉冲能量分别为 20, 50, 200, 300 和 525 mJ(抽运能量到达靶面的效率为 84%).在脉冲能量小于 300 mJ 时,谱线峰值随辐射能量的增强有明显的蓝移;辐射能量继续增大,谱线峰值基本不移动.抽运光能量为 250 mJ 时,谱线峰值为 13.4 nm. X 射线 CCD 上探测到的极紫外光的总光子数与抽运激光能量的关系如图 6 所示.考虑到 X 射线平场光栅光谱仪的接收和传输效率以及 X 射线 CCD 的测量效率,我们对波长为 13.5 nm 处 0.27 nm 带宽范围内的极紫外光转换

效率随抽运激光能量变化的关系进行研究.实验发现,当抽运激光能量在 250 mJ 时,极紫外光源的转换效率最高,达到 1.6%,如图 7 所示.实验中 YAG 激光辐射源的最大单脉冲能量为 525 mJ,入射角为 60°,光斑大小约为 100 μm,打靶时最大激光强度可达到 $3.8 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$.

一束高功率 YAG 激光经透镜聚焦(焦斑尺寸约为 100 μm)后辐照锡靶产生的极紫外光源可以认为是一点状光源.极紫外光源辐射强度随空间角度的分布可以认为是 Lambertian 分布^[16],即 $I(\theta) = I(0)\cos\theta$. $I(\theta)$ 是与靶面法线方向之间夹角为 α 方向上的发射强度, $I(0)$ 是极紫外光源在靶面法线方

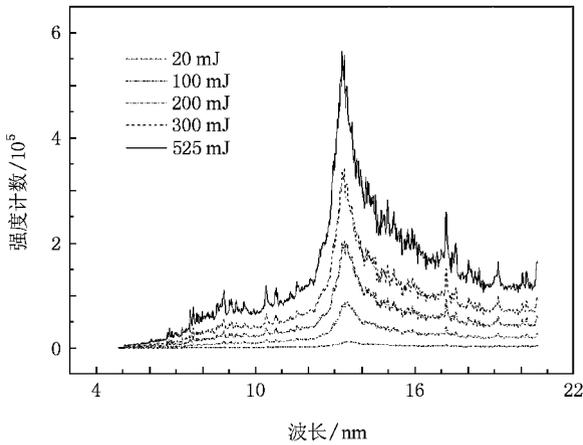


图5 不同脉冲能量的 YAG 激光与锡靶相互作用产生的极紫外光谱

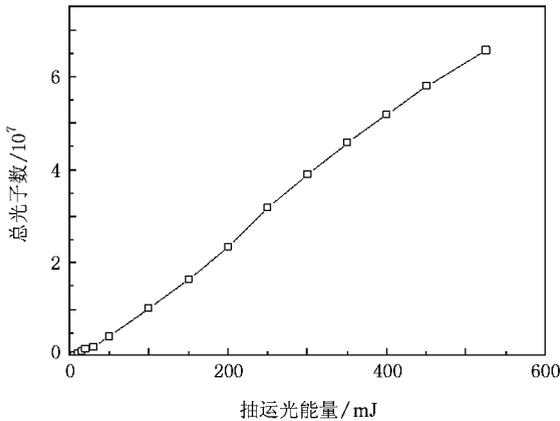


图6 4.8—20.4 nm 波长范围的极紫外光总光子数与抽运激光脉冲能量的关系

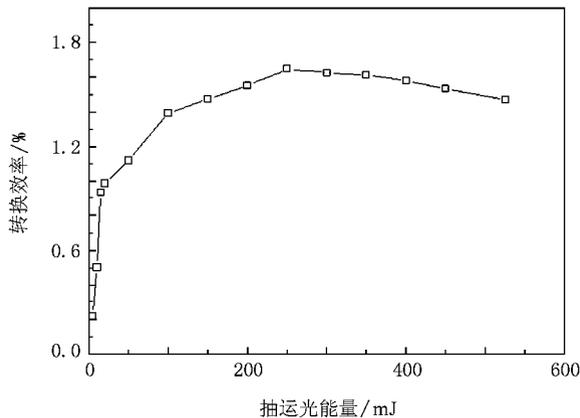


图7 波长 13.5 nm(0.27 nm 带宽)附近的极紫外光转换效率与激光脉冲能量的关系

向的发射强度.由于不考虑背向的极紫外光辐射,各向同性的极紫外光源发射的立体角是 2π ,对于 Lambertian 分布,其有效立体角是 π .我们利用平场光栅光谱仪测量极紫外光的测量效率主要考虑了以下四个因素(1)光栅光谱仪的接收效率 η_1 (2)传播损耗效率 η_2 (3)X 射线 CCD 在 13.5 nm 附近的量子效率 η_3 (4)X 射线 CCD 的一个光子转换成 CCD 计数的光子转换效率 η_4 .谱仪接收效率即谱仪对极紫外光的收集角与极紫外光的有效发射角 π 之比,由谱仪狭缝大小及第一个柱面反射镜高度决定;传播损耗效率由谱仪反射镜效率和光栅一级衍射效率决定;CCD 量子效率和光子转换效率则决定于 CCD 本身的参数.

考虑了实验中极紫外光的收集、传播和测量效率,我们可以得到波长 13.5 nm(0.27 nm 带宽)附近极紫外光源的转换效率.结果如图 7 所示.当激光单脉冲能量小于 2 mJ 时,谱线非常弱,几乎不可辨,说明转换效率很低.图 7 只给出了脉冲能量从 20—525 mJ 的极紫外光能量转换效率.脉冲能量比较低时,能量转换效率非常低,随着脉冲能量的提高,转换效率迅速提高,脉冲能量大于 100 mJ 以后,转换效率增加开始减缓,并在 250 mJ 时达到最大,之后再增加抽运激光能量,效率反而有所降低.在激光能量为 250 mJ 时,极紫外光转换效率达到最高为 1.6%,其对应的激光强度为 $1.8 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$.

4. 结 论

本文通过建立高功率 YAG 激光与固体锡靶相互作用的实验装置开展了极紫外光源产生的强度和转换效率随抽运光强度变化的实验研究,发现极紫外光源的转换效率随抽运激光强度的变化具有饱和效应.实验发现,当抽运激光能量为 250 mJ 时,极紫外光源的转换效率最高,波长为 13.5 nm 处 0.27 nm 带宽范围内的能量转换效率达到 1.6%.影响转换效率的因素众多,如抽运激光的强度、脉冲宽度、波长以及作用靶点的大小.下一步我们拟采用不同形式的锡靶(如氧化锡、二氧化锡及锡膜)或者用多脉冲激光作进一步的实验研究,以获得更高的转换效率.

- [1] Turcu I C E , Dance J B 1999 *X-rays from Laser Plasmas : Generations and Applications* (West Sussex : John Wiley & Sons) Chap 10
- [2] Silfvast W T , Ceglie N M 1993 *Appl. Opt.* **32** 6895
- [3] Rischel C , Rousse A , Uschmann I , Albouy P A , Geindre J P , Audebert P , Gauthier J C , Forster E , Martin J L , Antonetti A 1997 *Nature* **390** 490
- [4] Chin A H , Schoenlein R W , Glover T E , Balling P , Leemans W P , Shank C V 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 336
- [5] Wang H C , Wang Z S , Li F S , Qing S J , Du Y , Wang L , Zhang Z , Chen L Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2368 (in Chinese) [王洪昌、王占山、李佛生、秦树基、杜芸、王利、张众、陈玲燕 2004 *物理学报* **53** 2368]
- [6] Kodama R , Mochizuki T , Tanaka K A , Yamanaka C 1987 *Appl. Phys. Lett.* **50** 720
- [7] Shimoura A , Mochizuki T , Miyamoto S , Amano S , Uyama T 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 2026
- [8] Spitzer R C , Orzechowski T J , Phillion D W , Kauffman R L , Cerjan C 1996 *J. Appl. Phys.* **79** 2251
- [9] Choi H W , Daido H , Yamagami S , Nagai K , Norimatsu T , Takabe H , Suzuki M , Nakayama T , Matsui T 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **17** 1616
- [10] Jin F , Richardson M 1995 *Appl. Opt.* **34** 5750
- [11] Andreev A A , Ueda T , Limpouch J 2001 *Proc. SPIE* **4343** 789
- [12] Higashiguchi T , Rajyaguru C , Kubodera S , Sasaki W , Yugami N , Kikuchi T , Kawata S , Andreev A 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 231502
- [13] Aota T , Tomie T 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 015004
- [14] Shimada Y , Nishimura H , Nakai M , Hashimoto K , Yamaura M , Tao Y , Shigemori K , Okuno T , Nishihara K , Kawamura T , Sunahara A , Nishikawa T , Sasaki A , Nagai K , Norimatsu T , Fujioka S , Uchida S , Miyanaga N , Izawa Y , Yamanaka C 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 051501
- [15] Fonck R J , Ramsey A T , Yelle R V 1982 *Appl. Opt.* **21** 2115
- [16] Nieto-Vesperinas M 1982 *Opt. Lett.* **7** 165

Experimental study on extreme ultraviolet light generation from high power laser-irradiated tin slab^{*}

Cai Yi Wang Wen-Tao Yang Ming Liu Jian-Sheng[†]

Lu Pei-Xiang Li Ru-Xin Xu Zhi-Zhan

(State Key Laboratory of High Field Laser Physics , Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Shanghai 201800 , China)

(Received 27 October 2007 ; revised manuscript received 7 March 2008)

Abstract

An experimental system has been set up for producing extreme ultraviolet light with high conversion efficiency by employing high power YAG laser irradiated tin slab. The dependence of extreme ultraviolet light intensity and conversion efficiency on the pump energy were studied , and the saturation effect of conversion efficiency was observed. The highest conversion efficiency of 1.6% in producing 13.5 nm extreme ultraviolet light with 0.27 nm bandwidth was achieved at pump energy of 250 mJ , which corresponds to an intensity of 1.8×10^{11} W/cm².

Keywords : extreme ultraviolet , conversion efficiency

PACC : 5225P , 5250J , 3370J

^{*} Project supported by the Optical Science and Technology Program from the Committee of Science and Technology of Shanghai , China (Grant No. 036105035).

[†] E-mail : michaeljs_liu@mail.siom.ac.cn