

# Research on Optimization of Extreme Ultraviolet Spectrum from Laser-Produced Tin Plasma

Haijian Wang, Yinping Dou\*, Zhenguang Li, Zhuo Xie, Xiaowei Song\*, Jingquan Lin

Ultrafast Optics Laboratory, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin  
Email: \*douzi714@126.com, \*songxiaowei@cust.edu.cn

Received: Dec. 20<sup>th</sup>, 2019; accepted: Jan. 7<sup>th</sup>, 2020; published: Jan. 14<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

Extreme ultraviolet (EUV) source of laser-produced plasma is of great significance for the manufacturing of nanometer scale in integrated circuit. The optimization of laser-produced plasma EUV spectrum is the premise for the widespread use of EUV source. Therefore, it is optimized tin target EUV spectrum by increasing the incident laser energy in this paper, changing the focal spot diameter and number of laser pulse. The results show that the intensity of EUV radiation from tin target increases with the enhancement of incident laser energy. The EUV radiation intensity is enhanced to 1.27 times by changing the position of the focal lens. Moreover, the corresponding relationship is built between tin ion distribution and electron temperature by utilizing CR model.

## Keywords

Extreme Ultraviolet Lithography, Source, Laser Plasma, Spectrum, Tin Target

# 激光锡等离子体极紫外光谱的优化研究

王海建, 窦银萍\*, 李镇广, 谢卓, 宋晓伟\*, 林景全

长春理工大学超快光学实验室, 吉林 长春  
Email: \*douzi714@126.com, \*songxiaowei@cust.edu.cn

收稿日期: 2019年12月20日; 录用日期: 2020年1月7日; 发布日期: 2020年1月14日

## 摘要

激光等离子体EUV光源对于集成电路纳米尺度器件的制造具有重要意义。激光等离子体EUV光谱的优化\*通讯作者。

是EUV光源广泛使用的前提,所以本文通过增大入射激光能量,改变光斑大小和脉冲数方法优化Sn靶EUV光谱。结果表明,Sn靶EUV光谱强度随着入射激光能量的增加而增加。通过改变透镜位置,使得光谱增强到1.27倍。此外,利用碰撞-辐射模型(CR模型)建立Sn离子分布与电子温度的对应关系。

## 关键词

极紫外光刻, 光源, 激光等离子体, 光谱, 锡靶

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

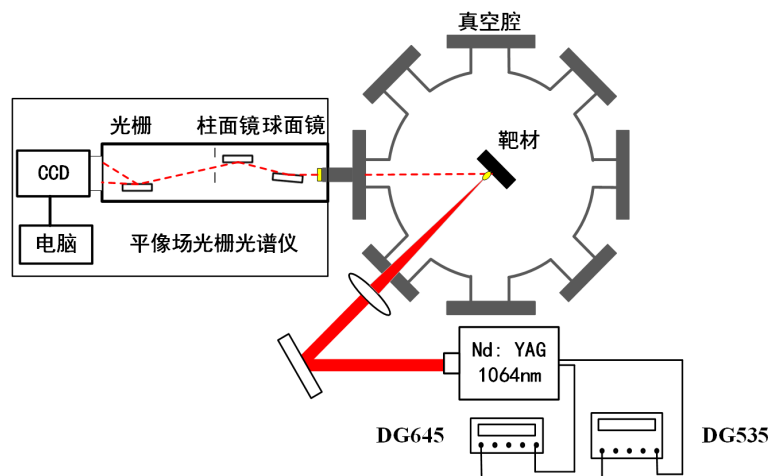
高亮度激光等离子体 EUV 光源对于激光烧蚀分子同位素光谱[1], 激光诱导击穿光谱[2], 脉冲激光沉积[3], 光刻[4], 计量学[5], 生物成像[6]的发展具有重要的推动作用。2010年, S. S. Harilal 等人使用凹槽靶对 Sn 靶 EUV 光谱进行了优化, 使得光谱强度得到提升, 并证明了适当移动凹槽靶可使 EUV 光源保持较高的转换效率(CE) [7]。2015年, Hiraku Matsukuma 等人通过使用双脉冲激光作用锡液滴靶, 改变预-主脉冲之间的延时, 使得 EUV 光谱强度得到有效地提升, 同时证明了激光吸收与 CE 的关系[8]。2017年, Kentaro Tomita 等人利用集体汤姆逊散射(CTS)光谱, 得到了等离子体的电子温度, 电子密度的二维时间分辨图, 并通过优化二维等离子体剖面来进一步增大 EUV 光谱强度[9]。2019年, John Oliver 等人使用 CO<sub>2</sub> 激光辐照两个锡等离子体产生的停滞层来增强 EUV 光谱强度[10]。随着半导体制造技术的不断优化, 器件尺寸不断减小, 在外观上变得更加三维化, 这对于纳米尺度器件在表面和界面特性、厚度变化、粗糙度、缺陷的计量又提出了更高要求。破坏性计量手段由于高成本、难于测量等使其无法得到广泛应用。而 CD-SAXS 计量方法由于具有无损、准确、可变角度等特点而被用来表征各种纳米结构的线宽、螺距等参数[5]。然而, 由于光源亮度较弱使得 CD-SAXS 表征时间变长, 所以获得高亮度, 高功率 EUV 光源是当前亟需解决的问题。

为解决光源亮度低, 功率小的问题, 本文针对激光等离子体 EUV 光谱强度的优化进行了深入的研究。通过增大入射激光能量, 移动透镜位置改变激光聚焦光斑大小, 多个脉冲作用靶材同一位置等方法, 提高 Sn 靶 EUV 光源带内辐射通量, 从而达到增强 Sn 靶 EUV 光谱强度的效果。利用 CR 模型找出产生 Sn 靶 EUV 辐射的最佳电子温度, 为激光等离子体 EUV 光源进行集成电路纳米尺度的表征, 缺陷的检测提供了理论支持和数据支撑。

## 2. 实验装置

纳秒脉冲激光作用固体 Sn 靶诱导等离子体产生 EUV 光谱实验装置如图 1 所示。实验装置分为 EUV 光源产生系统和 EUV 光源收集系统。EUV 光源产生系统主要是由纳秒 Nd: YAG 激光器, 数字脉冲延时器, 电动平移台, 反射镜, 聚焦透镜, 靶材以及真空腔室构成。其中脉冲激光输出波长为 1064 nm, 最大脉冲能量为 1 J, 脉宽为 10 ns。靶材为平面 Sn 靶, 尺寸为 40 mm × 40 mm × 1 mm, 含量为 99.99%。平面 Sn 靶放置在真空三维平移台上, 脉冲激光通过焦距为 400 mm 的平凸透镜聚焦到固体 Sn 靶上。使用两个数字脉冲延时器(DG535 和 DG645)调节激光输出能量以及控制激光器单次激发。EUV 光源收集系统是铅膜、球面镜、柱面镜、狭缝、光栅搭建的平像场光栅光谱仪。平像场光栅光谱仪在与靶材法线成 45°角的方向上对 Sn 靶等离子体产生的 EUV 光辐射进行收集。具体是极紫外光分别以 87°的入射角(与镜面法线夹角)

分别入射到曲率半径为 5000 mm 的镀金球面镜和 30 mm 镀金柱面镜, 再以  $87^\circ$  入射角照射到中心刻线密度为 1200 l/mm 的变栅距凹面光栅, 所获得的衍射光成像到背向照明极紫外 CCD, CCD 由 1064 nm 激光器控制外触发。在实验过程中, 使用机械泵和分子泵分别对真空腔室和平像场光栅光谱仪抽真空, 使其真空度到  $10^{-3}$  Pa, 并通过外面的控制器来控制平移台的移动, 以保证每发激光脉冲都能作用到靶面新位置。



**Figure 1.** Experimental setup of Sn target plasma EUV source generated by 1064 nm nanosecond laser

**图 1.** 1064 nm 纳秒激光产生 Sn 靶等离子体 EUV 光源实验装置图

### 3. 结果与讨论

不同入射激光能量辐照 Sn 靶产生 EUV 光谱如图 2 所示, 结果表明, 在相同入射激光能量下, Sn 靶 EUV 光谱峰值位置出现在 13.2 nm 处, 产生这种现象的原因是当 Sn 靶原子吸收激光能量后发生电离产生不同阶次的 Sn 离子,  $\text{Sn}^{8+} \sim \text{Sn}^{13+}$  范围内的离子中的电子发生  $4p^6 4d^n - 4p^5 4d^{n+1} + 4d^{n-1} 4f$  能级跃迁产生的谱线相互重叠, 最终在 13.2 nm 处形成了不可分辨跃迁阵列 (UTAs)。随着入射激光能量从 100 mJ 增加到 700 mJ。激光 Sn 等离子体产生的 EUV 光辐射不断增强。造成这种现象的原因是 EUV 辐射是由不可分辨跃迁阵列产生的, UTAs 是由数百万条单独的谱线组成。当入射激光能量增加时, 近简并共振线增加, 在狭窄的波长范围内, 相邻离子阶辐射相互重叠部分增加 [11] 即 UTAs 增强, 13.2 nm EUV 光辐射强度增大。从区域 I 中可以看出, 随着入射激光能量的增加, 光谱变得不再是光滑的谱线, 出现了“毛刺”, 造成这种现象的原因是由于入射激光能量的增加, 使得 Sn 原子电离后产生了更多不同种类的低阶 Sn 离子, 这些离子产生了强度不同的长波长的谱线。

由于 13.2 nm 处的 EUV 光辐射是由  $\text{Sn}^{8+} \sim \text{Sn}^{13+}$  的电子发生  $4p^6 4d^n - 4p^5 4d^{n+1} + 4d^{n-1} 4f$  ( $n = 4 - n = 4$ ,  $\Delta n = 0$ ) 跃迁产生的, 电子在发生  $\Delta n = 0$  时产生的 EUV 主要是由内部高温等离子体核产生的; 电子温度是反映等离子体性质的参数之一, 我们可以通过电子温度与离子阶的关系进一步深入研究 EUV 光辐射的物理机制。为了研究 Sn 靶激光等离子体 EUV 光辐射各阶激发态离子与电子温度的关系, 使用了 CR 模型。CR 模型广泛适用于几十电子伏特以上的激光等离子体。因为激光等离子体满足该模型的 4 个适用条件: 1) 等离子体内部电子满足麦克斯韦分布; 2) 激光等离子体电子密度较高, 电子-电子之间的弛豫时间小于电子加热时间; 3) Z 离子整体处于准稳态时, Z + 1 离子密度没有发生明显变化; 4) 碰撞去激励率小于辐射去激励率 [12]。但是, 在使用该模型时, 需要考虑碰撞电离、三体复合、辐射复合等因素 [13]。因为在等离子体形成过程中, 三体复合导致产生 EUV 辐射的激发态离子阶偏低, 所以使用 CR 模型必须考虑当时的实验条件。当激光输出波长 1064 nm 时, 利用 CR 模型可理论计算出不同 Sn 离子对应的电子

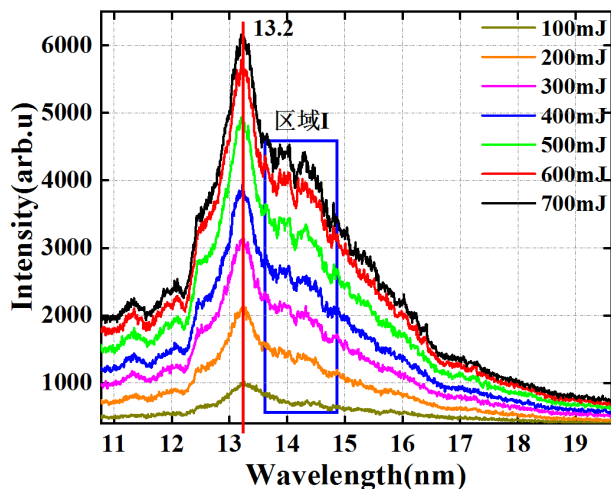


Figure 2. EUV spectral curves of Sn target at different incident laser energy

图 2. 不同入射激光能量下, Sn 靶的 EUV 光谱曲线

温度, 计算结果如图 3 所示。通过对实验得到的 Sn 靶 EUV 光辐射的分析发现, 13.2 nm 的辐射峰主要是由  $\text{Sn}^{8+} \sim \text{Sn}^{13+}$  产生的, 从图 3 中可以看出, 当电子温度在 20~45 eV 区间时,  $\text{Sn}^{8+} \sim \text{Sn}^{13+}$  数量最多, 即 20~45 eV 为产生 EUV 最佳的电子温度。且电子温度越高的区域, 高阶离子含量越高。

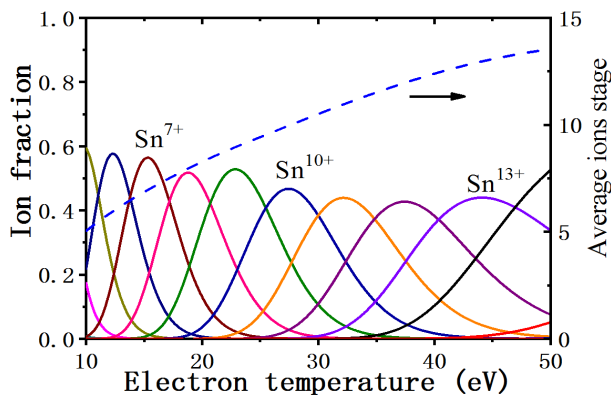


Figure 3. CR model simulates the relationship between electron temperature and Sn ion distribution

图 3. CR 模型模拟电子温度与 Sn 离子分布关系

我们将靶材位于焦点前定义为正, 焦点处为 0 mm, 焦点后为负, 具体如图 4 所示。

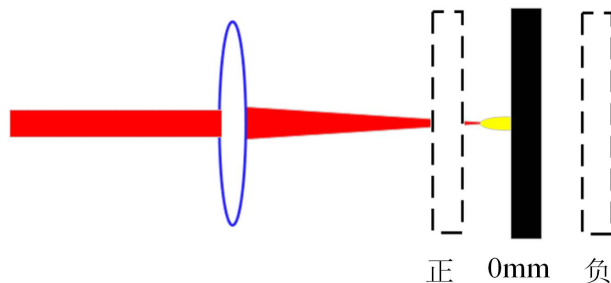
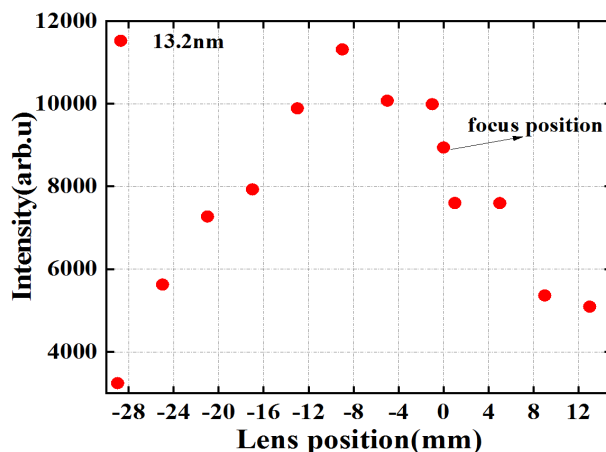


Figure 4. Laser focused on the target position diagram

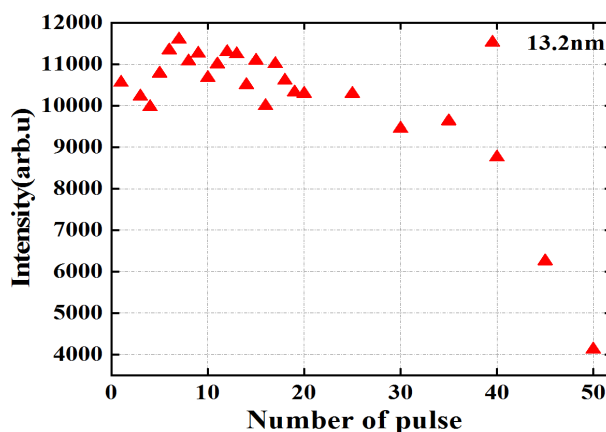
图 4. 激光聚焦靶材位置示意图



**Figure 5.** The incident laser energy is 200 mJ, and the peak spectral intensity of Sn target EUV varies with the focus position

**图 5.** 入射激光能量为 200 mJ, Sn 靶 EUV 光谱峰值强度随聚焦位置的变化

从图 5 中可以看出,当 Sn 靶由焦后向焦前(聚焦位置由负到正)移动过程中,激光 Sn 等离子体 EUV 光辐射强度呈现先增大后减小的趋势。通过金相显微镜测量了不同聚焦位置的光斑大小,光斑大小与聚焦位置的关系见表 1。当聚焦光斑尺寸最小时,此时焦斑半径为  $148.53 \mu\text{m}$ ,靶材正处于透镜焦点位置,即激光最佳聚焦位置。相比于激光最佳聚焦位置,当聚焦光斑半径为  $169.89 \mu\text{m}$  时,13.2 nm 处的 EUV 光谱强度最大,由此可见,激光最佳聚焦位置并不是 EUV 光谱强度最强的位置。造成这种现象的原因可能是:在最佳聚焦位置处的电子密度梯度较高,导致入射激光能量和等离子体之间缺乏有效地耦合。在最佳聚焦位置处,聚焦光斑尺寸较小,激光聚焦锥角也较小,等离子体吸收的能量会局限在中轴附近,影响等离子体对激光能量的吸收[14]。当聚焦光斑尺寸略增大时,激光聚焦锥角增大,激光能量会有效地分布在整個等离子体的前沿,等离子体可以有效地吸收激光能量;同时,当焦斑稍大时,可以有效减少等离子体横向膨胀造成的能量损失,从而产生更多的高阶离子,达到增强 EUV 光辐射的效果。当聚焦光斑进一步增大时,激光能量会大幅损失。所以,产生 EUV 辐射的高阶离子减少,光谱强度会下降。



**Figure 6.** The variation of Sn target EUV spectral intensity with the number of pulse at 200 mJ of incident laser energy

**图 6.** 入射激光能量 200 mJ 时, Sn 靶 EUV 光谱强度随脉冲数的变化

**Table 1.** Corresponding relationship between focusing position and spot size**表 1.** 聚焦位置与光斑大小对应关系

聚焦位置(mm)	光斑半径( $\mu\text{m}$ )	聚焦位置(mm)	光斑半径( $\mu\text{m}$ )	聚焦位置(mm)	光斑半径( $\mu\text{m}$ )
-29	245.98	-9	169.89	5	161.56
-25	228.26	-5	160.51	9	170.94
-21	207.41	-1	151.13	13	175.1
-17	195.43	0	148.53		
-13	183.96	1	153.74		

从图 6 中可以看出, 随着脉冲数的增加, Sn 靶 EUV 光辐射呈现先增加, 再趋于平稳, 后减小的趋势。第 7 个脉冲的 EUV 光辐射最强, 而且第 7~17 个脉冲的光辐射较平稳, 强度是第 1 个脉冲光辐射的 1.10 倍, 第 17 个脉冲后, 强度迅速下降。造成这种现象的原因是在激光功率密度一定时, 多个脉冲作用靶材同一位置时, 光子通量呈现先增大, 趋于平稳, 而后减小的趋势。在激光脉冲作用靶材多次后, 靶材会在该位置产生一个“凹坑”, “凹坑”起到限制等离子体膨胀的作用[7]。等离子体在膨胀(等温膨胀和绝热膨胀)过程中, 遵循能量守恒定律。当等离子体膨胀受到限制后, 等离子体动力学特性减弱, 就会有更多的能量用于电子在能级间的跃迁, 从而辐射出更多的光子, 进而达到增强 EUV 光辐射的效果。因为 Sn 的第一电离能为 708.6 kJ/mol, 第一电离能决定了原子得失电子的能力, 所以, 较高的第一电离能使 Sn 较稳定。由于锡的熔点仅为 231.89°C, 当功率密度为  $2.89 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$  的激光烧蚀靶材 17 次后, 靶材表面 Sn 原子数大量减少, 电子在能级间跃迁产生的光子数将迅速下降, EUV 光辐射强度迅速减弱。

#### 4. 结论

本文使用 CR 模型将 Sn 离子分布与电子温度建立了对应关系并对 Sn 靶极紫外光谱的优化进行了深入研究。通过增大入射激光能量, 改变激光聚焦光斑大小, 多个激光脉冲作用靶材同一位置方法对 EUV 光谱进行优化, 得到了较为理想的效果。Sn 靶 EUV 光辐射随着入射激光能量的增加而不断变大。当聚焦光斑为 169.89  $\mu\text{m}$  时, EUV 光辐射最强, 此时光谱强度增强 1.27 倍。第 7~17 个脉冲产生的光谱强度处于较高且稳定的状态。为激光等离子体光源对集成电路的计量, 细胞、大分子等的生物成像以及光刻技术的应用等方面提供了理论支撑。

#### 基金项目

长春理工大学青年基金(XQNJJ-2017-01)支持。

#### 参考文献

- [1] Bol'shakov, A.A., Mao, X., González, J.J. and Russo, R.E. (2016) Laser Ablation Molecular Isotopic Spectrometry (LAMIS): Current State of the Art. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, **31**, 119-134. <https://doi.org/10.1039/C5JA00310E>
- [2] Fortes, F.J., Moros, J., Lucena, P., Cabalín, L.M. and Laserna, J.J. (2012) Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. *Analytical Chemistry*, **85**, 640-669. <https://doi.org/10.1021/ac303220r>
- [3] Amoruso, S., Bruzzese, R., Spinelli, N. and Velotta, R. (1999) Characterization of Laser-Ablation Plasmas. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **32**, R131-R172. <https://doi.org/10.1088/0953-4075/32/14/201>
- [4] Gwyn, C.W. (1998) Extreme Ultraviolet Lithography. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, **16**, 3142. <https://doi.org/10.1116/1.590453>
- [5] Orji, N.G., Badaroglu, M., Barnes, B.M., Beitia, C., Bunday, B.D., Celano, U. and Vladar, A.E. (2018) Metrology for the Next Generation of Semiconductor Devices. *Nature Electronics*, **1**, 532-547.



<https://doi.org/10.1038/s41928-018-0150-9>

- [6] Tomita, K., Sato, Y., Tsukiyama, S., Eguchi, T., Uchino, K., Kouge, K., and Nishihara, K. (2017) Time-Resolved Two-Dimensional Profiles of Electron Density and Temperature of Laser-Produced Tin Plasmas for Extreme-Ultraviolet Lithography Light Sources. *Scientific Reports*, **7**, Article No. 12328. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11685-0>
- [7] Harilal, S.S., Sizyuk, T., Sizyuk, V. and Hassanein, A. (2010) Efficient Laser-Produced Plasma Extreme Ultraviolet Sources Using Grooved Sn Targets. *Applied Physics Letters*, **96**, 111503. <https://doi.org/10.1063/1.3364141>
- [8] Matsukuma, H., Sunahara, A., Yanagida, T., Tomuro, H., Kouge, K., Kodama, T. and Nishimura, H. (2015) Correlation between Laser Absorption and Radiation Conversion Efficiency in Laser Produced Tin Plasma. *Applied Physics Letters*, **107**, 121103. <https://doi.org/10.1063/1.4931698>
- [9] Higashiguchi, T., Otsuka, T., Yugami, N., Jiang, W., Endo, A., Li, B. and O'Sullivan, G. (2012) Laser-Produced Plasma UTA Emission in 3 - 7 nm Spectral Region. *Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography III*, Vol. 8322. <https://doi.org/10.1117/12.916308>
- [10] Oliver, J. and Sizyuk, T. (2019) Stagnation Layer Development from Two Colliding Sn Plasmas for an Efficient EUV Source. *Physics of Plasmas*, **26**, 043517. <https://doi.org/10.1063/1.5080243>
- [11] Hara, H., Kawasaki, H., Tamura, T., Hatano, T., Ejima, T., Jiang, W. and Higashiguchi, T. (2018) Emission of Water-Window Soft X-Rays under Optically Thin Conditions Using Low-Density Foam Targets. *Optics Letters*, **43**, 3750-3753. <https://doi.org/10.1364/OL.43.003750>
- [12] Colombant, D. and Tonon, G.F. (1973) X-Ray Emission in Laser-Produced Plasmas. *Journal of Applied Physics*, **44**, 3524-3537. <https://doi.org/10.1063/1.1662796>
- [13] 窦银萍. 6.7 nm 输出波长 Gd 靶激光等离子体极紫外光源的研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2015.
- [14] Tao, Y., Harilal, S.S., Tillack, M.S., Sequoia, K.L., O'Shay, B. and Najmabadi, F. (2006) Effect of Focal Spot Size on In-Band 13.5 nm Extreme Ultraviolet Emission from Laser-Produced Sn Plasma. *Optics Letters*, **31**, 2492. <https://doi.org/10.1364/OL.31.002492>