预印本论文草稿，耶拿应用物理研究所，
2026年 Johannes Kaufmann

通过宽束氮离子辐照制备的超浅极紫外和软X射线光栅

Johannes Kaufmann[1], Thomas Siefke[1,2,3],Uwe Zeitner[1,2]1弗里德里希·席勒大学，应用物理研究所，Albert-Einstein大街15号，07745 耶拿，德国2弗劳恩霍夫应用光学与精密工程研究所，Albert-Einstein大街7号，07745 耶拿，德国3 耶拿恩斯特·阿贝应用科学大学，Carl-Zeiss-Promenade 2号，07745 耶拿，德国

arXiv:2601.04667v1 [physics.app-ph] 8 Jan 2026

摘要
在极紫外（EUV）和软X射线范围内近法向入射工作的衍射光栅，其结构高度达到个位数纳米范围，实现结构的受控、精确制备是其中的挑战之一。在此，我们在以往研究的基础上，利用硅经离子辐照后的膨胀，作为传统干法刻蚀的替代方法。通过使用宽束氮离子透过掩模辐照硅片，我们以精确且可良好控制的工艺制备了层状光栅。我们成功制备出结构高度介于1.00 ± 0.05至 10 ± 0.5 nm、节距为1 µm的光栅，适用于极紫外和软X射线应用。将离子能量从20 keV调整至40 keV，进一步拓展了该工艺的基础，并增加了一个可用于控制所得结构高度和形状的参数。

关键词：离子辐照、膨胀、光栅、极紫外、软X射线、纳米制造

1. 引言

极紫外和X射线波段的光尤为重要，可用于光刻[1–4]，也可用于成像和计量学应用；这些应用利用该波长范围进行荧光[5, 6]，散射[6–9]和光谱学[8–11]，用于研究超快动力学[12, 13] 及其他应用[14–19]的泵浦-探测实验。在这些应用中，会使用种类繁多的光栅[2–4, 6–11, 18–21]。然而，在这一光谱范围内，通常采用掠入射方式工作，这需要较长的光路，也要求昂贵且庞大的光学元件占用较大的器件占地面积[4, 20, 21]。因此，对于紧凑型台式设备而言，采用近法向入射方式工作将极具优势[11, 14]。在所需的 1nm 至 50nm 左右的光谱范围内，这就要求采用相关技术，精确制备结构高度受控、仅为数纳米的超浅光栅。尤其是，要控制这一参数并非易事，因为传统干法刻蚀方法每分钟去除的材料可达数十纳米——远大于所需元件的尺寸——同时还会增加基底的粗糙度[22–27]。此外，近法向入射工作通常要求光栅镀覆反射性多层膜。设计能够承受结构高度较大不确定性的多层膜，会极大限制可用的自由度，最终导致性能降低。在此背景下，模拟凸显了对能够精确控制结构高度的替代工艺的需求[28–30]。本文提出的超浅光学元件制备技术正是为满足这一需求而开发的。

我们的方法基于在不同离子-基底组合[27, 31–40]中，利用离子辐照期间发生的膨胀和溅射来制备表面结构和光栅。先前的研究已经证实，受加工时间限制，无法通过聚焦离子束[32, 33]直接写入工艺对超过 µm²的区域进行结构化。因此，要实现可行的加工时间，就需要采用能够利用宽离子束的替代方法。例如，针对特定离子-基底组合[34, 35] 进行自组织，或利用取向相关溅射速率[27]。然而，目前这两种方法在可用基底方面都受到限制，且制备的结构往往均匀性较差、粗糙度较高。为克服这一问题，可以通过模板掩模进行辐照，从而选择性地遮蔽基底[36–39]。不过，这些方法的局限在于——

层状光栅的横向特征尺寸大于 10μm，且掩模区域与辐照区域之间的过渡区约为 1 μm，这限制了可实现的结构形状。

为拓展可用的制备技术选择，我们进一步介绍一种此前已建立的高效光栅制备工艺：在基底上使用光刻胶掩模，并依靠宽束离子[31, 40–42]。与以往的经验一致，我们采用原子力显微镜（AFM）对制备的结构进行了表征。鉴于硅的常见用途、广泛可得性以及广为人知的非晶化行为，同时考虑到氮离子相较于较轻离子的横向扩散较小，我们在此选用硅基底上的氮离子[43, 44]。这种利用离子辐照引发非晶化和体积变化的区域选择性离子辐照替代方案，使我们能够高效制备过渡区较小、并能以前所未有的精度控制最终结构高度的层状光栅。

2. 实验程序

所展示的样品采用我们的4栅加速器宽束离子源（4GABIS）进行辐照。线性加速器4GABIS的加速电压最高可达40 keV。在此，我们利用该设备将来自等离子体源的单电荷氮分子（N_2^+）加速至20至40 keV的能量。假设N_2^+ 离子撞击靶材时会分裂成能量相等的部分，则这相当于以10至20 keV能量的氮进行辐照[45]。除非另有说明，以下讨论均指能量为N_2^+ 离子的实验。根据能量不同，样品接受的离子电流密度为45至75 μA/cm^2, , 分别对应20至40 keV且随能量升高而增大。将辐照时间调整至30至500 s，使注量在$2.4 \cdot 10^{16}$ 至$3.7 \cdot 10^{17}$ 离子 · cm^{-2}的范围内变化。样品通过背面氮气冷却连接至水冷靶台，以改善热传导，从而将观测到的样品最高温度限制在 85 °C以下。实验期间，样品在一分钟内升温至 70 °C，随后温度约以每分钟2 K的速率线性上升。

实验采用 SILTRONIC AG 提供的超精抛光Si(100)晶圆作为基底，其初始表面粗糙度约为 0.3 ˚A。离子辐照过程中，使用具有二元层状结构的聚合物作为掩模覆盖基底的部分区域。为了深入了解该工艺的基本特性，我们将研究重点放在 1 μm 的节距上。图1显示了辐照前掩模的扫描电子显微镜（SEM）横截面。从底部的硅基底向上，掩模依次由约 30 nm 厚、用作保护层的氧化铝、305 nm 厚的 AZ-1505 光刻胶掩模，以及制造过程中形成的约 80 nm 厚的铬组成。该掩模采用电子束光刻工艺制造，具体细节已在先前的研究中讨论过[40, 46]。与先前的实验相比，本研究将掩模中 AZ-1505 光刻胶的厚度减至 305 nm，因为较重的氮离子在掩模中的射程比先前使用的氦离子更短。这样既降低了纵横比和制造时间，又能防止离子穿透掩模到达基底。最终样品的图案化区域为 5 mm × 5 mm，位于 15 mm × 15 mm 硅芯片的中心；光栅区域之外的部分则完全覆盖有光刻胶和铬。

由于氮辐照硅会导致 Si_xN_y 化合物的形成，因此，为尽量减少样品与磷酸的接触，文中所述的掩膜去除工艺[40] 是在以往实验的基础上调整的，因为已知磷酸会刻蚀氮化硅[22]。为此，首先通过湿法化学工艺去除铬，随后在氧等离子体中去除光刻胶层。之后，在 50 °C 下用磷酸处理 3 分钟，以去除保护性氧化铝层，从而尽量减少潜在的刻蚀。作为表征前的最后一步，使用卡罗酸、氨和去离子水配合兆声波清洗样品。

表征使用了布鲁克公司生产的 DIMENSION EDGE™ 原子力显微镜。我们的测量是在环境条件下以轻敲模式进行的，使用的是从 BUD-

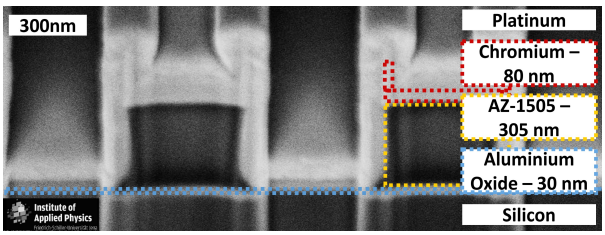

图1. 所用掩模横截面的扫描电子显微镜图像。顶部的铂来自切割过程中所进行的样品制备。

GETSENSORS 购买的 Tap-300 Al-G 探针作为原子力显微镜探针。该原子力显微镜探针的针尖半径约为 10 nm，力常数为 40 N/m。测量区域为 10 µm × 10 µm，快扫描方向的分辨率为每像素 10 nm。探针较高的力常数使我们能够将原子力显微镜高度测量的不确定度降低至探针所受控制器噪声的极限，因此高度测量的总不确定度约为 30 pm[47]。本文报告的所有粗糙度测量值均指均方根粗糙度（均方根粗糙度），并已校正控制器噪声。

3. 结果与讨论

利用氮离子辐照引起的硅膨胀，我们成功制备出具有层状结构的浅光栅。如图 2 (a) 和 (b) 所示，在注量相近时，形成结构的形状和高度会受到入射离子能量的影响。对于 20 至 35 keV 的加速能量，我们观察到结构高度随离子能量增加而翻倍。这是因为较高的离子能量会在硅中造成更多位移，即带来更大的膨胀潜力。物质中离子的阻止与射程（SRIM）模拟结果如图 3 (a)-(c) 所示，表明更多位移深入硅基底[44]。此外，我们还观察到，在较高加速能量下，掩模区域与未掩模区域之间的过渡区出现了明显的特征。在实验中，加速能量为 35 和 40 keV 时，这些特征最为显著。

这些特征的出现以及加速能量为 40 keV 时结构高度的降低，都可以用样品表面附近形成 Si_xN_y 化合物来解释[48, 49]。在去除保护性氧化铝层的过程中，磷酸会刻蚀制备出的结构，而离子辐照造成的损伤很可能会加剧这一现象[22, 50, 51]。由于中心区域的氮浓度高于过渡区，我们预计前者的蚀刻速率更快。由于基底内的应力弛豫，过渡区仍发生明显膨胀，因此中心区域的结构高度会降低至低于过渡区的高度，从而形成观察到的特征。加速能量为 40 keV 时，离子在横向上的扩散范围增大（图 3 (e)-(g)），因此这些特征也受到更强烈的刻蚀影响。加之硅基底受到的损伤更大，结构高度的两种测量结果均有所降低，导致测得的高度低于 35 keV 时观察到的数值。对于所有能量，一种避免这些影响的方法是不使用氧化铝保护层。然而，这可能导致污染物（例如来自铬蚀刻剂的颗粒）在表面累积[52]。

需要注意的是，较深处的位移

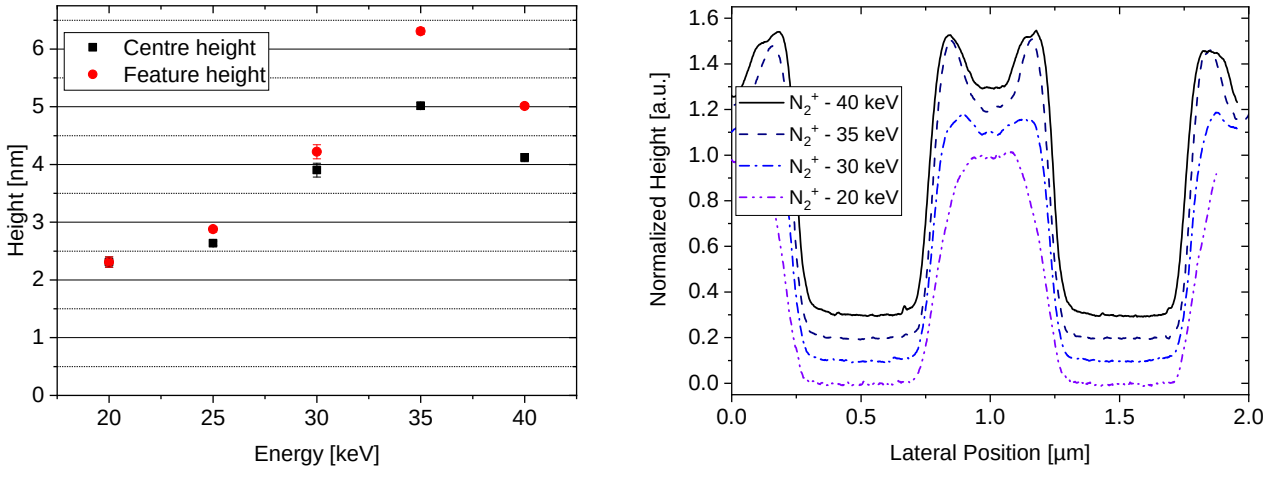

图2. 注量相近的辐照条件下（**a**）结构高度的变化，以及（**b**）结构形状随加速能量的变化。归一化将结构中心的高度设为 1。为便于观察，各曲线在垂直方向上错开。

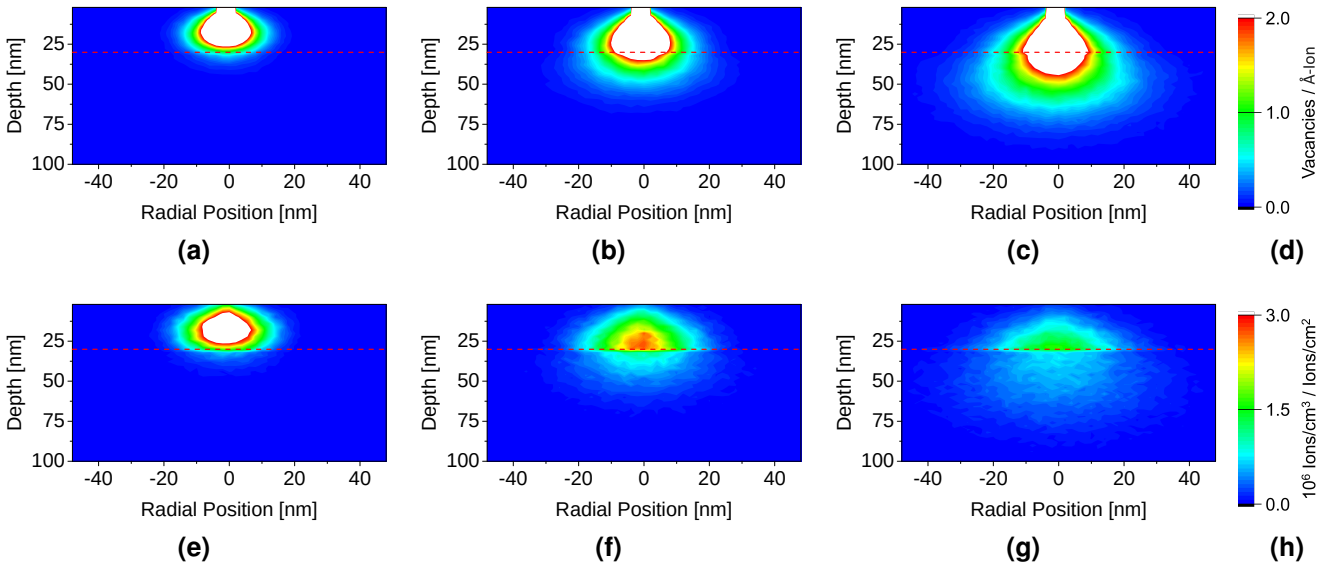

图3。 利用 10、15 和 20 keV 的 10^5 氮离子进行 SRIM 模拟（即在本研究中对应的加速能量为 20、30 和 40 keV），以说明硅晶格中空位范围的 **(a-c)** 增加，以及位于氧化铝保护层下方硅基底内的氮的 **(e-g)** 最终位置。组 **(a-c)** 和 **(e-g)** 中的图分别与**(d)** 和**(h)**共用相同的颜色刻度，以便更好地进行比较。

基底区域中的位移所产生的膨胀可能小于靠近表面的位移。这可能是导致采用 40 keV 氮离子制备的结构高度相比采用较低加速能量制备的结构有所降低的另一个因素[31]。此外，我们还想指出，离子能量的增加会导致结构宽度增加，这与基底中位移的横向扩散范围以及离子最终位置均增大这一预期相符（图 3）。这可用于调节所制备元件的占空比，但会增大过渡区的范围，从而使最小可行结构尺寸略有增加。

为最大限度地减小过渡区的范围、刻蚀程度及与二者相关的特征，我们将重点放在加速能量为 20 keV 的实验上。对于该能量，我们测得结构高度随注量线性增加，如图 4 所示。考虑到所用离子源的注量不确定性[40]，我们的方法适合制备结构高度范围为 1.00 ± 0.05 nm 至 10 ± 0.5 nm 的光栅。我们希望强调的是，注量变化可能是上述制备结构高度不确定性的最大因素。这意味着，提高注量的准确性是进一步提升制造精度的直接途径。

排除注量大于 $2 \cdot 10^{17}$ ions $\cdot cm^{-2}$ 的数据后，得到的斜率为 2.84 ± 0.06 nm/10^{17} ions $\cdot cm^{-2}$，y轴截距为 0.32 ± 0.05 nm。这表明，在所研究的最大注量范围内，溶胀行为至少发生了两次变化：首先，y轴截距大于 0，说明存在某种效应，使结构高度在初期急剧增加，随后趋于稳定的增长速率。这归因于辐照过程中基底温度升高，从而提高了缺陷复合率；也就是说，在接近室温时最初轰击样品的离子所产生的相对损伤产额更高[43]。其次，当注量大于 $2 \cdot 10^{17}$ ions $\cdot cm^{-2}$ 时，结构高度会突然增加，同时出现类似于高离子能量下观察到的特征。这一点值得注意，因为在 20 keV 的加速能量下，硅晶格中的原子会被反冲原子撞出原位，而氮离子大多仍停留在保护性氧化铝层内（见图 3 (e)）。据推测，这两种效应都与辐照过程中氧化铝因溅射而变薄有关；这实际上增加了氮和位移进入硅基底的深度，从而导致更强的溶胀并形成氮化硅。

关于图5所示粗糙度（下文均指 Sq）随注量加速增加的现象，显然，这一效应对于此处所考虑的要求极低粗糙度的应用而言并不十分重要

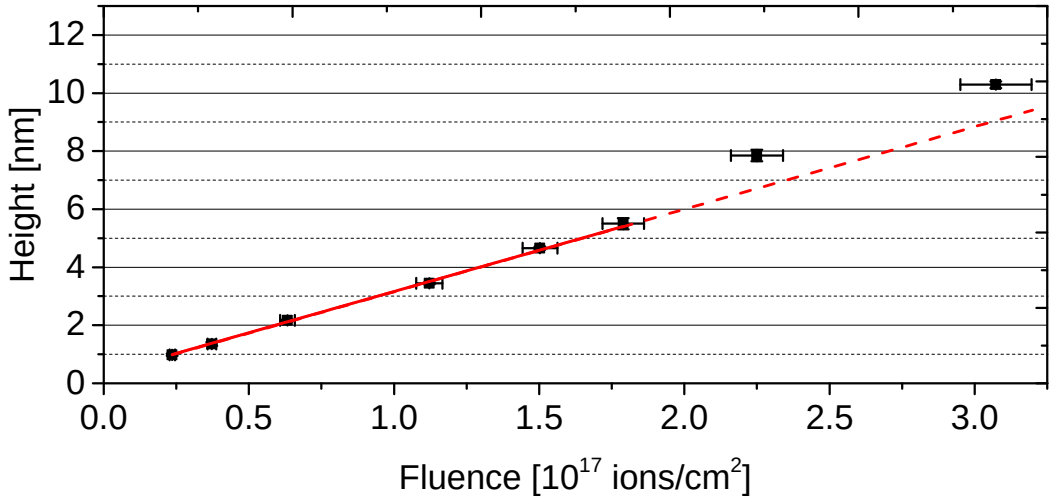

图4. Si(100) 经 20keV N_2^+ 离子辐照后，结构高度随注量的变化。实线为对观测到的结构高度与注量关系进行线性拟合的结果。虚线将该拟合结果外推，作为目测参考，以便与更高注量下的结果进行比较。

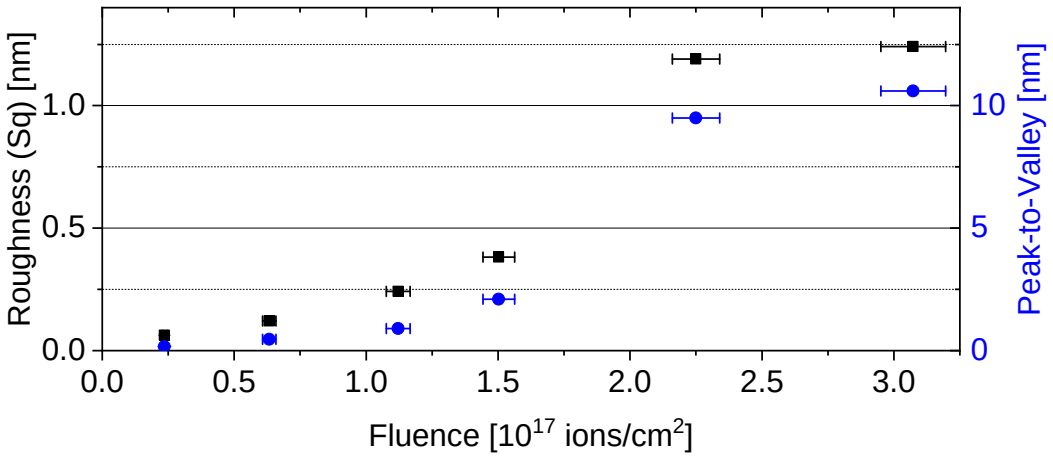

图5. Si(100) 经 20keV N_2^+ 离子辐照后，粗糙度（均方根粗糙度）和峰谷值随注量的变化。

因为在高注量下，粗糙度增加到了超过 1nm。最高注量下观察到的粗糙度增幅趋于饱和，归因于离子辐照导致粗糙度产生与去除逐渐接近平衡值。与此前采用氦离子的类似辐照不同，后者并未导致粗糙度明显增加[40]，而我们现在观察到粗糙度显著且随注量变化的增加。这与所用离子具有更高的质量有关；较高的质量提高了溅射速率，并增强了硅基底与其上方氧化铝层之间的互混及随后去除过程。根据应用对粗糙度的要求，这一效应限制了可实现的结构高度。

不过，当粗糙度为 $\leq$0.5 nm 时，加速能量为 20 keV 可实现大于 5 nm 的结构高度。此外，对于所用的离子能量，溅射产额不会随着离子能量的增加而增加[44, 53]。因此，可以通过提高离子能量来获得更大的结构高度。

4. 结论

通过使用不同注量的 N_2^+离子对硅进行辐照，我们展示了一种制备层状光栅轮廓的方法，该轮廓适用于极紫外和软 X 射线范围。改变离子能量可获得另一个影响所得光栅形状和高度的参数。这拓展了此前已建立技术的可能应用

范围[40]。针对所用离子源注量的不确定性，我们展示了一种可重复的制备技术：通过使用 20 N_2^+ 离子辐照硅，可在 1 μm 节距下制备结构高度为 1.00 ± 0.05 至 10 ± 0.5 nm 的结构。在更高注量下，粗糙度从 0.06 增加到 1.25nm，可能会降低所得结构的质量。不过，通过提高离子能量，可以在较低注量下制备更高的结构，从而缓解这一问题。

我们已证明，可以将一种先前建立的高效、可控性强且可重复的光栅制备技术，应用于极紫外和软X射线范围。以1μm节距为重点，使其能够与先前的研究进行比较，并将该工艺的适用基础扩展至其他形貌[40]。未来的工作将研究节距和辐照角度等参数的影响，以实现更高的线密度和更广泛的形貌。此外，对掩模进行调整，以尽量减少基底的刻蚀或辐照过程中形成的潜在化合物，可进一步简化制备过程。展望未来，预计所介绍的技术将以较低成本实现对以往无法获得的光学元件的获取，并加快新型极紫外和软X射线器件的开发。

致谢

本研究部分得到了弗劳恩霍夫协会、卡尔·蔡司基金会以及德国联邦研究、技术与航天部的支持（德国联邦教育与研究部资助编号：13N15088）。

本研究中的样品制备由耶拿 IAP 的微观结构技术团队完成。作者谨此感谢他们提供制备设施、执行相关工艺并给予支持。

参考文献

[1] H. J. Levinson，《高数值孔径极紫外光刻：现状与未来展望》，《日本应用物理学杂志》**61**，SD0803（2022年）。[2] N. Mojarad、J. Gobrecht 和 Y. Ekinci，《极紫外和软X射线波长下的干涉光刻：原理、方法与应用》，《微电子工程》**143**，光子、电子与离子微纳光刻特刊，2014，55–63（2015年）。

[3] W. E. Fu、B. C. He 和 W. L. Wu，《高纵横比纳米结构的透射小角X射线散射强度增强》，《表面形貌：计量与特性》**11**，024008（2023年）。

[4] W. li Wu, R. J. Kline, R. L. Jones, H.-J. Lee, E. K. Lin, D. F. Sunday, C. Wang, T. Hu, and C. L. Soles, “美国国家标准与技术研究院临界尺寸小角度 X 射线散射发展的关键里程碑综述”，《微纳图形化、材料与计量学杂志》**22**, 031206 (2023年)。

[5] P. H¨onicke, Y. Kayser, V. Soltwisch, A. W¨ahlisch, N. Wauschkuhn, J. E. Scheerder, C. Fleischmann, J. Bogdanowicz, A.-L. Charley, A. Veloso, R. Loo, H. Mertens, A.Hikavyy, T.Siefke, A.Andrle,G.Gwalt,F. Siewert, R. Ciesielski, and B. Beckhoff, “采用 X 射线荧光技术对半导体纳米结构进行兼容小靶标的尺寸与分析计量”，载于，第 12496 卷（2023年），124961J。[6] R. Ciesielski, L. M. Lohr, A. F. Herrero, A. Fischer, A. Grothe, H. Mentzel, F. Scholze, and V. Soltwisch, “用于软 X 射线和极紫外（EUV）光谱范围内同步辐射散射与荧光混合探测的新型样品腔”，《科学仪器评论》**94**, 013904 (2023年)。[7] G. Ruben, I. Pinar, J. M. C. Brown, F. Schaff, J. A. Pollock, K. J. Crossley, A. Maksimenko, C. Hall, D. Hausermann, K. Uesugi, and M. J. Kitchen, “全场 X 射线散射断层成像”，《IEEE 医学影像汇刊》**41**, 2170–2179 (2022年)。[8] Yi-De Chuang et al., “先进光源（ALS）动量分辨共振非弹性软 X 射线散射（qRIXS）实验站”，《电子能谱与相关现象杂志》**257**, 146897 (2022年)。[9] L. Weinhardt, C. Wansorra, R. Steininger, T. Spangen- berg, D. Hauschild, and C. Heske, “用于快速绘制共振非弹性软 X 射线散射（rRIXS）图谱的高透射率光谱仪”，《同步辐射杂志》**31**, 1481–1488 (2024年)。

[10] A. N. Shatokhin、A. O. Kolesnikov、P. V. Sasorov、E. A. Vishnyakov 和 E. N. Ragozin，“用于 12.5-30 nm 波长范围的高分辨率无像差摄谱仪”，Opt. Express **26**，19009–19019（2018）。[11] J. Holburg、S. Figul、A. Charvat、H. Bluhm、B. Abel、G. Marowsky、D.-D. Mai 和 K. Mann，“利用桌面式激光诱导等离子体源在真空中通过扁平液体射流进行软X射线吸收光谱学”，X-Ray Spectrom **n/a**，10.1002/xrs.3474（2025）。

[12] Y. H. Jiang、A Senftleben、M Kurka、A Rudenko、L Foucar、O Herrwerth、M. F. Kling、M Lezius、J. V. Tilborg、A Belkacem、K Ueda、D Rolles、R Treusch、Y. Z.Zhang、Y. F. Liu、C. D. Schr¨oter、J Ullrich 和 R Moshammer，“飞秒极紫外秒表中测定的乙炔超快动力学”，《物理学杂志B：原子、分子与光学物理》**46**，164027（2013）。

[13] E. Wang, N. G. Kling, A. C. LaForge, R. Obaid, S. Pathak, S. Bhattacharyya, S. Meister, F. Trost, H. Lin- denblatt, P. Schoch, M. K¨ubel, T. Pfeifer, A. Rudenko, S. D´ıaz-Tendero, F. Mart´ın, R. Moshammer, D. Rolles, 和 N. Berrah，《利用强极紫外自由电子激光辐射探测乙醇中的超快漫游机制：电子转移与质子转移》，J. Phys. Chem. Lett.**14**, 4372–4380 (2023年).[14] W. Eschen, L. Loetgering, V. Schuster, R. Klas, A. Kirsche, L. Berthold, M. Steinert, T. Pertsch, H. Gross, M. Krause, J. Limpert, 和 J. Rothhardt，《材料特异性高分辨率台式极紫外显微镜》，《光：科学与应用》**11**, 117 (2022年).[15] Chen, Bo 等，《风云三号E星搭载的太阳X射线和极紫外成像仪》，《光：科学与应用》**11**, 329 (2022年).[16] T. Aidukas, N. W. Phillips, A. Diaz, E. Poghosyan, E. M¨uller, A. F. J. Levi, G. Aeppli, M. Guizar-Sicairos, 和 M. Holler，《利用突发式拼接成像实现高性能4纳米分辨率X射线断层成像》，《自然》**632**, 81–88 (2024年).[17] R. Battistelli, D. Metternich, M. Schneider, L.-M. Kern, K. Litzius, J. Fuchs, C. Klose, K. Gerlinger, K. Bagschik, C. M. G¨unther, D. Engel, C. Ropers, S. Eisebitt, B. Pfau, F. B¨uttner, 和 S. Zayko，《分辨率达5纳米的相干X射线磁成像》，《Optica》**11**, 234– 237 (2024年).[18] T. Gutberlet, H.-T. Chang, S. Zayko, M. Sivis, 和 C. Ropers，《机器学习赋能的高灵敏度极紫外瞬态吸收光谱学》，Opt. Express **31**, 39757–39764 (2023年).[19] Grote, Lukas 等，《通过定量原位X射线拼接成像观察溶液中Cu_2O纳米立方体的空心化》，《自然·通讯》**13**, 4971 (2022年).[20] L. Poletto 和 F. Frassetto，《面向极紫外应用的高性价比平面光栅单色仪设计》，Appl. Opt. **57**, 1202–1211 (2018).[21] Li, Jie 等，《适用于极紫外—软X射线应用的高效无像差离面光栅光谱仪和单色仪》，《光：科学与应用》**13**, 12 (2024年).

[22] K. Williams、K. Gupta 和 M. Wasilik，《微机械加工工艺的刻蚀速率——第二部分》，《微机电系统杂志》**12**，761–778（2003年）。[23] B. Wu、A. Kumar 和 S. Pamarthy，《高深宽比硅刻蚀：综述》，《应用物理学杂志》**108**，051101（2010年）。[24] K. Dowling、E. Ransom 和 D. Senesky，《通过电感耦合等离子体刻蚀实现高深宽比碳化硅沟槽的轮廓演变》，《微机电系统杂志》**PP**，1–8（2016年）。[25] M. Huff，《反应离子刻蚀及其在高深宽比微加工中的应用的最新进展》，《微型机械》**12**，10.3390/mi12080991（2021年）。[26] K. Racka-Szmidt、B. Stonio、J. Zelazko、M. Filipiak 和 M. Sochacki，《综述：碳化硅电感耦合等离子体反应离子刻蚀》，《材料》**15**，10.3390/ma15010123（2022年）。[27] D. M. Miles、R. L. McEntaffer 和 F. Gris´e，《采用电子束光刻和离子束刻蚀制造的闪耀反射光栅》，载于《太空望远镜与仪器 2022：从紫外到伽马射线》，第12181卷，J.-W. A. den Herder、S. Nikzad 和 K. Nakazawa 编（国际光学与光子学学会，2022年），第1218153页。[28] X. Yang、I. V. Kozhevnikov、Q. Huang、H. Wang、M. Hand、K. Sawhney 和 Z. Wang，《单级次工作区间内交替多层光栅的解析理论》，Opt. Express **25**，15987–16001（2017年）。[29] M. Koike、T. Hatano、A. S. Pirozhkov、Y. Ueno 和 M. Terauchi，《覆有超镜型多层膜、用于提高2–4 keV范围内衍射效率的软X射线层状光栅设计》，《科学仪器评论》**94**，045109（2023年）。[30] M. Koike、T. Hatano、A. S. Pirozhkov、Y. Oue、T. Mu-rano、T. Kakio、S. Koshiya、K. Kondo 和 M. Terauchi，《用于300–1000 eV的软X射线高衍射效率与高光谱通量层状W/B4C多层膜衍射光栅》，《科学仪器评论》**95**，073104（2024年）。[31] J. Kaufmann、T. Siefke、C. Ronning 和 U. Zeitner，《通过离子辐照制造极紫外光栅》，载于《高亮度光源与光驱动相互作用大会》（2024年），JW4A.15。[32] G. Garc´ıa、M. Martin、M. D. Ynsa、V. Torres-Costa、M. L. Crespillo、M. Tard´ıo、J. Olivares、F. Bosia、O. Pe˜na-Rodr´ıguez、J. Nicolas 和 M. Tallarida，《高能重离子辐照制造单晶金刚石软X射线光栅的工艺设计》，《欧洲物理学杂志Plus》**137**，1157（2022年）。

[33] X. Huang、Y. Xie、M. Balooch、S. Lubner 和 P. Hose-mann，《Si（100）中的氦注入：膨胀、微观结构与机械性能变化》，《应用物理学杂志》**132**，025106（2022年）。[34] Y. Chen、M. Cai、H. Zang、H. Chen、S. Kroker、Y. Lu、Y. Liu、F. Frost 和 Y. Hong，《基于宽离子束的自组织准闪耀金纳米结构的光学各向异性》，Appl. Opt. **60**，505–512（2021年）。[35] J. Li、G. Yang、R. M. Bradley、Y. Liu、F. Frost 和 Y. Hong，《通过氩离子轰击双层系统提高自组织纳米波纹的质量》，《纳米技术》**32**，385301（2021年）。[36] J. Jensen、M. Skupi´nski、K. Hjort 和 R. Sanz，《利用自组装掩模对TiO_2单晶进行基于重离子束的纳米与微结构加工》，《物理研究中的核仪器与方法B辑：束流与材料原子相互作用》**266**，《绝缘体中的辐射效应》，3113–3119（2008年）。[37] J. Lindner、C. Seider、F. Fischer、M. Weinl 和 B. Stritzker，《通过纳米球掩模向硅中注入氦诱导局部膨胀形成规则表面图案

[光刻掩模》，《核仪器与方法：物理研究 B 部分：束流与材料和原子的相互作用》**267**，第16届国际离子束材料改性会议论文集，1394–1397（2009）。[38] S. Momota、N. Sato 和 K. Honda，“利用高电荷态 Ar 离子束在 6H–SiC 上制备多级膨胀结构”，《真空》**170**，108963（2019）。[39] Y. Zhou、S. Li、Y. Wang、Q. Huang、W. Zhang、Y. Yao、J. Hao、Y. Sun、M. Tang、B. Li、Y. Zhang、J. Hu 和 L. Yan，“通过一步离子束辐照在 SiC 中制造具有可调功函数的三维微纳图案结构”，《碳》**148**，387–393（2019）。[40] J Kaufmann、R Ciesielski、K Freiberg、M Walther、A Fern´andez Herrero、S Lippmann、V Soltwisch、T Siefke 和 U Zeitner，“通过氦离子辐照在硅上制备浅极紫外光栅”，《纳米技术》**36**，185301（2025）。[41] J. Kaufmann、R. Ciesielski、K. Freiberg、M. Walther、A. F. Herrero、S. Lippmann、V. Soltwisch、T. Siefke 和 U. Zeitner，“通过离子辐照制备超浅硅极紫外光栅”，载于《EUV与X射线光学：实验室与空间的协同作用 IX》，第13531卷，R. Hudec 和 L. Pina 编（国际光学与光子学学会，2025），第135310L页。[42] J. Kaufmann、R. Ciesielski、K. Freiberg、M. Walther、A. F. Herrero、S. Lippmann、V. Soltwisch、T. Siefke 和 U. Zeitner，“通过离子辐照在硅中制备超浅极紫外光栅”，载于《X射线/极紫外光源、光学元件与组件进展 XX》，第13620卷，A. M. Khounsary 和 H. Mimura 编（国际光学与光子学学会，2025），第136200I页。

43] L. Pelaz、L. A. Marqu´es 和 J. Barbolla，“硅中的离子束诱导非晶化与再结晶”，《应用物理学杂志》**96**，5947–5976（2004）。

[44] J. F. Ziegler、B. J. P. 和 M. D. Ziegler，*SRIM*：物质中离子的阻止与射程（马里兰州切斯特，SRIMCo.，2012年）。

[45] W Jacob，“烃薄膜生长和侵蚀过程中的表面反应”，Thin Solid Films **326**，1–42（1998年）。

[46] M. H¨adrich、T. Siefke、M. Banasch 和 U. D. Zeitner，“通过单元投影光刻制备的光学超表面”，PhotonicsViews **19**，28–31（2022年）。

[47] H. J. Butt 和 M Jaschke，“原子力显微镜中的热噪声计算”，《纳米技术》**6**，1–7（1995年）。

[48] H. J. Stein，“晶体硅中的氮”，《MRS 论文集》**59**，523（1985）。

[49] W. Ensinger、K. Volz、G. Schrag、B. Stritzker 和 B. Rauschenbach，“在电子回旋共振微波等离子体中对施加高电压偏置的硅进行氮离子辐照以形成氮化硅层”，《应用物理快报》**72**，1164–1166（1998）。

[50] R. Geiss、J. Brandt、H. Hartung、A. T¨unnermann、T. Pertsch、E.-B. Kley 和 F. Schrempel，“通过氢氧化钾辅助的离子束增强刻蚀在铌酸锂中制备光子微结构”，《真空科学与技术杂志 B》**33**，010601（2014）。

[51] S. Park、H. Jung、K.-A. Min、J. Kim 和 B. Han，《通过磷酸对二氧化硅上的氮化硅进行选择性刻蚀机制的解析：第一性原理研究》，应用表面科学**551**，149376（2021年）。

[52] A. Bohm，《湿法化学与离子辐照的影响对硅表面形成时间依赖性纳米级颗粒沉积的影响》，硕士论文（弗里德里希耶拿席勒大学，2023年）。过程h-

[53] K. Wasa，《2——溅射现象》，载于《溅射技术手册（第二版）》，K. Wasa、I. Kanno 和 H. Kotera 编，第二版（威廉·安德鲁出版社，牛津，2012年），第 41–75 页。