

# 镓铟纳米颗粒材料的可控制备及其透射式微焦点X射线源性能研究

孙伯林<sup>1</sup>, 韩佳佳<sup>1</sup>, 王丽<sup>2</sup>, 李昂<sup>2</sup>

<sup>1</sup>北京工业大学物理与光电工程学院, 北京

<sup>2</sup>北京工业大学材料科学与工程学院, 北京

收稿日期: 2026年4月14日; 录用日期: 2026年5月18日; 发布日期: 2026年5月27日

## 摘要

镓铟合金纳米颗粒材料兼具低熔点、组分可调和复合特征辐射输出特征, 在透射式微焦点X射线源中具有潜在应用价值。本文以氮化硅衬底上可控沉积的GaIn纳米颗粒靶材为研究对象, 采用电子显微学成像、CASINO模拟和自主设计的X光显微成像系统开展其作为焦点X射线源的应用研究。显微学结果表明, 代表性颗粒内部Ga与In信号高度重叠。20 keV电子束入射下, 能量沉积和特征X射线产生区域主要集中在近表层微米尺度范围, Ga K系与In L系特征辐射可在同一作用区内形成。基于不同横向尺寸颗粒靶的成像实验获得了清晰稳定的镍铬螺线管透射投影图像, 定量结果表明系统几何保持稳定, 而条纹调制保持能力随颗粒横向尺寸出现分化。结构表征、模拟分析与成像统计在同一成分窗口内形成了系统性对应关系。综合结果表明, 该镓铟纳米颗粒体系能够在近表层稳定形成复合辐射发射区, 具备作为透射式微焦点X射线源候选靶材的巨大应用潜力。

## 关键词

镓铟合金, 纳米颗粒材料, 物理气相沉积, CASINO模拟, 透射式微焦点X射线源

# Controllable Preparation of GaIn Nanoparticle Materials and Their Performance in a Transmission Microfocus X-Ray Source

Bolin Sun<sup>1</sup>, Jiajia Han<sup>1</sup>, Li Wang<sup>2</sup>, Ang Li<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Physics and Optoelectronic Engineering, Beijing University of Technology, Beijing

<sup>2</sup>School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing

文章引用: 孙伯林, 韩佳佳, 王丽, 李昂. 镓铟纳米颗粒材料的可控制备及其透射式微焦点X射线源性能研究[J]. 应用物理, 2026, 16(5): 535-546. DOI: 10.12677/app.2026.165049

## Abstract

**GaIn nanoparticle materials combine low melting point, compositional tunability, and composite characteristic radiation output, and therefore show potential application value as target materials for transmission microfocus X-ray sources. In this work, GaIn nanoparticle targets controllably deposited on SiN<sub>x</sub> membranes were investigated by electron microscopy imaging, CASINO simulation, and a self-designed X-ray microscopic imaging system. The microscopy results confirm strong overlap of Ga and In signals within representative particles. Under 20 keV electron irradiation, the main regions of energy deposition and characteristic X-ray generation are confined to a near-surface micrometer-scale zone, where Ga K-series and In L-series characteristic radiation can be produced simultaneously. Imaging experiments based on GaIn particle targets with different lateral dimensions yielded clear and stable transmission projection images of a Ni-Cr solenoid sample, and the quantitative results indicate that the system geometry remains stable, while the ability to maintain fringe modulation varies with the lateral dimension of the particles. Structural characterization, simulation analysis, and imaging statistics form a systematic correspondence within the same composition window. These results indicate that GaIn nanoparticle materials can stably form a near-surface composite radiation emission zone and are promising candidate target materials for transmission microfocus X-ray sources.**

## Keywords

**GaIn Alloy, Nanoparticle Material, Physical Vapor Deposition, CASINO Simulation, Transmission Microfocus X-Ray Source**

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

X 射线成像因其非破坏、强穿透和适用范围广，在医学诊断、工业无损检测和材料表征中发挥重要作用[1][2]。对于微焦点 X 射线源，成像分辨率与图像信噪水平同时受有效源尺寸、电子束功率密度、成像几何及探测器响应影响[3]-[5]。在透射式结构中，电子束从入射侧轰击透射靶，特征辐射和制动辐射由靶后侧出射，有利于缩小有效发射区并提高空间分辨率[6]-[8]。因此，透射式靶材的材料组成、微观结构和电子束作用体积之间的匹配关系，是评价其成像性能的核心问题。对于纳米颗粒透射靶，颗粒形貌决定局域面密度，成分分布影响复合谱稳定性，电子作用体积则限定有效发射区的空间尺度。

在透射成像过程中，探测器灰度由源谱分布、样品能量依赖衰减和探测器响应共同决定，其能量表达式可写为

$$I(E) = I_0(E) \exp[-\mu(E)d]$$

对比度与边缘锐利度对应不同物理过程，前者主要受光谱组成和材料衰减系数控制，后者主要受有效源尺寸、投影几何和探测器分辨率控制。对于复合辐射发射靶材，单凭单幅投影图像的视觉清晰程度不足以替代定量比较，只有将这两类指标分开讨论，才能判断图像差异究竟来自谱输出变化还是空间发

射尺度变化。

GaIn 合金是一类典型室温液态金属,兼具低熔点、高导热和可调组分等特点。其成分可调性和复合特征辐射输出能力使其在透射式微焦点 X 射线靶材中具有应用潜力,但 Ga 与 In 蒸气压差异及液气界面偏析会显著提高成分稳定控制的难度[9]-[11]。已有报道表明,物理气相沉积制备的 GaIn 纳米颗粒具有较好的形貌可调性和成分设计空间[9]。然而在热蒸发过程中,优先挥发和气相分馏仍易导致沉积产物实际成分偏离设计值[10][11]。这一偏离会同时改变颗粒尺度、局域成分和靶后出射谱分布,使材料制备结果与成像表现之间难以建立稳定的一一对应关系。

现有研究更多集中于 GaIn 纳米颗粒的制备与相结构调控,对于其作为透射式微焦点 X 射线靶材时,材料结构、电子作用区和成像量化指标之间的对应关系仍缺少系统研究。Ga-In 体系的混合焓、活度偏离和液态界面有序行为会改变纳米尺度下的元素分布状态,并进一步影响近表层辐射输出的稳定性[12]-[14]。在 20 keV 电子束条件下,复合谱分布决定灰度对比的变化特征,有效源尺寸主导边缘宽度的演化尺度,因此有必要围绕实际成像工况界定成分窗口,并在同一材料框架内比较结构表征、电子输运模拟和成像统计结果。基于此,本文结合材料制备、电子显微学微结构分析、CASINO 模拟和镍铬螺线管成像实验,围绕成分窗口界定、近表层复合发射行为和周期投影统计三个层面讨论 GaIn 纳米颗粒材料作为透射式微焦点 X 射线靶材的适用性。

## 2. 实验方法

### 2.1. 颗粒材料制备

采用真空热蒸镀技术制备 GaIn 纳米颗粒材料,系统基础真空度优于  $5.0 \times 10^{-4}$  Pa。蒸发源由共晶 GaIn 合金与定量添加的高纯 Ga 组成,通过调节源平均成分和蒸发路径补偿 In 优先挥发。沉积过程中先将蒸发速率提升至 10.0 Å/s 以上,再迅速降至 1.0 Å/s,以获得分散较均匀的镓铟纳米颗粒材料。本文涉及的显微结构表征、成分结构分析、CASINO 模拟和 X 射线成像数据均来自名义厚度约 80 nm 的 GaIn 颗粒材料,在固定衬底温度、蒸发源-衬底间距及厚度的前提下,通过调节蒸发峰值速率(4.0~15.0 Å/s)和沉积时间,独立获得了平均横向尺寸分别为 0.9、1.0、1.5、1.9、2.0 和 2.5  $\mu\text{m}$  的六组颗粒靶材,用于后续比较。本文中颗粒横向尺寸定义为扫描电子显微镜图像中统计所得颗粒投影面积的等效圆直径的平均值。统一厚度设置有助于将颗粒横向尺寸效应与厚度差异区分开来,并降低厚度变化对电子穿透路径和自吸收修正的耦合影响。

### 2.2. 结构与成分表征

本文以 SiN 上沉积的 GaIn 样品为主体,使用扫描电子显微镜观察材料表面形貌[15][16],并利用 Talos-F200X-G2 透射电子显微镜开展 HAADF-STEM 成像以及 EDS 面扫描和线扫描分析[17],以评估颗粒内部 Ga、In 元素的空间分布均匀性。在 10.57 至 47.25 wt% In 范围内,4 组样品的 Ga-In 元素重叠 EDS 面分布如图 2 所示。各样品覆盖 Ga 富侧及中等 In 含量区间,并与 CASINO 模拟所采用的  $\text{Ga}_{85}\text{In}_{15}$  等效成分处于一致的材料设计范围。统一的成分窗口和统一的厚度等级共同构成后续模拟与成像比较的材料前提,使电子输运、特征辐射和图像质量评价建立在同一成分框架内,从而减小由样品来源差异引入的额外不确定性。

### 2.3. CASINO 模拟

为分析 GaIn 靶中的电子输运与特征辐射产生深度,使用 CASINO V2.42 软件[18]对等效均匀  $\text{Ga}_{85}\text{In}_{15}$  材料进行蒙特卡罗模拟。电子束加速电压与实际实验中一致,为 20 keV,入射方式为垂直入射,模拟电

子数为 20,000。输出结果包括电子轨迹分布、中心截面能量沉积二维分布、归一化能量沉积深度曲线以及 In L<sub>III</sub> 与 Ga K 吸收后特征 X 射线强度随深度的分布曲线。本文采用能量沉积峰值  $z_{peak}$  以及累计沉积深度  $D_{50}$ 、 $D_{90}$  和  $D_{95}$  表征电子作用体积, 其中  $D_{50}$ 、 $D_{90}$  和  $D_{95}$  分别表示累计沉积能量达到总值 50%、90% 和 95% 时对应的深度。

## 2.4. X 射线成像与图像评价

以 80 nm 厚 GaIn 纳米颗粒材料为透射靶, 基于环境扫描电镜构建微焦点 X 射线成像系统。实验中电子束加速电压为 20 keV, 电子束经聚焦后垂直轰击靶材, 产生的 X 射线穿透镍铬螺线管标准样品后由积分型探测器记录, 其中螺线管丝直径为 0.1 mm。根据源样距离  $L_1$  和样探距离  $L_2$ , 投影放大倍数按下式计算

$$M = (L_1 + L_2)/L_1$$

以保证不同样品组在相同几何条件下进行比较。对于每幅投影图像, 先在螺线管中部选取与周期方向一致的局部区域, 再对该区域进行旋正, 并沿螺线管轴向提取跨越约 4 个周期的平均灰度剖面用于统一分析。

对平均灰度剖面采用小窗平滑与低频趋势分离的方法提取条纹主周期  $P_{turn}$ 、条纹半高宽  $W_{turn}$  及主周期调制幅值  $A_{turn}$ 。为表征单周期峰谷调制度, 仍采用 Michelson 形式定义周期对比度, 其表达式为

$$\text{Contrast} = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min})$$

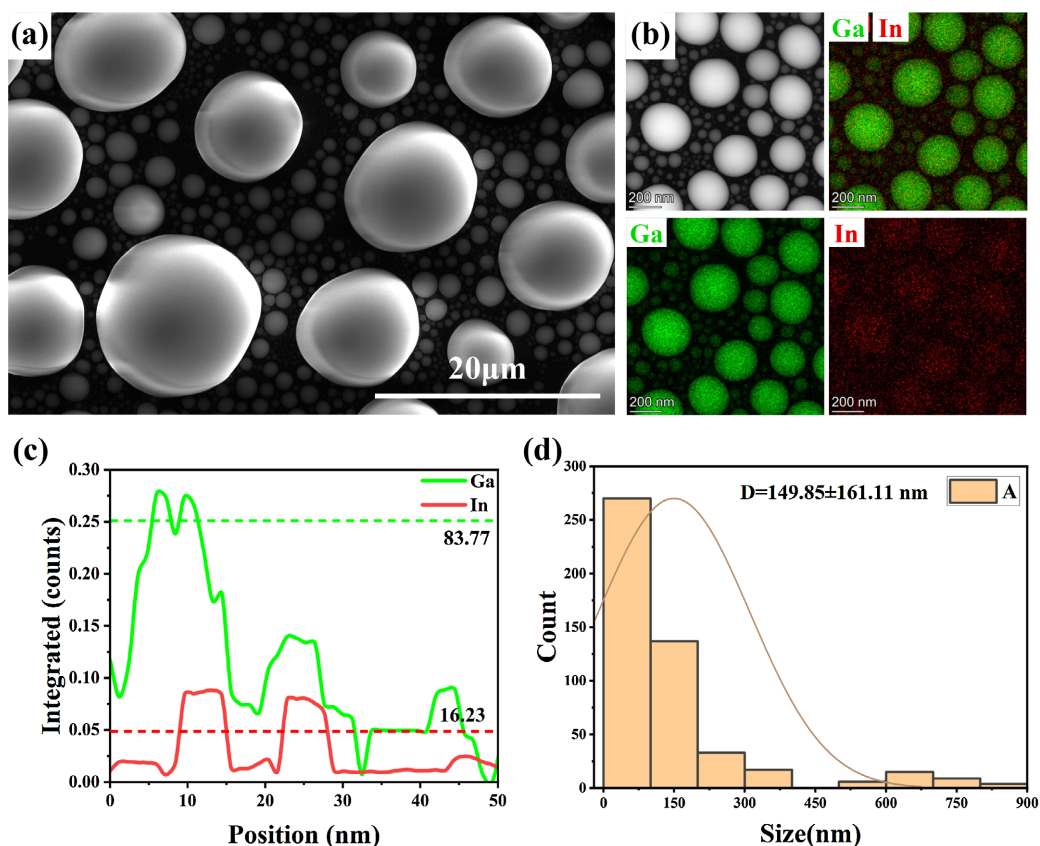
其中,  $I_{max}$  和  $I_{min}$  分别为单周期内的峰值灰度和谷值灰度, 各周期对比度取平均后记为  $C_{turn}$ 。进一步结合  $W_{turn}/P_{turn}$  及去趋势后的均方根起伏  $A_{rms}$ , 对不同样品条纹是否存在局部展宽、灰度扩散或像素扩展倾向进行统一比较。

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 颗粒靶材的结构特征与成分基础

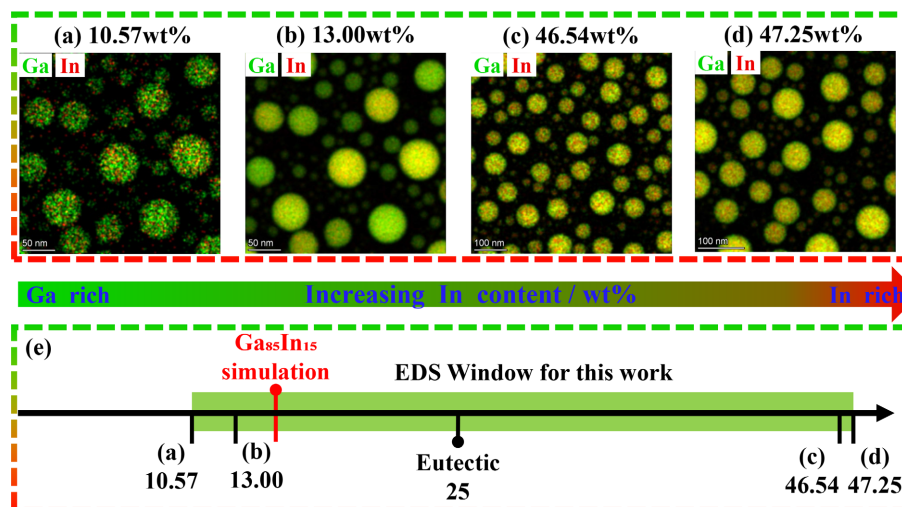
GaIn 纳米颗粒材料的典型形貌与成分分布见图 1。SEM 图像显示, 材料表面由大量近似球形的离散颗粒构成, 颗粒之间保持清晰间隔, 未见大面积连片或明显熔并。粒径统计直方图中, 颗粒主要集中在 0 至 150 nm 和 150 至 300 nm 区间, 统计平均粒径约为  $149.85 \pm 161.11$  nm, 同时存在少量扩展到 500 至 900 nm 的较大颗粒, 高值速率蒸发条件下因而形成了具有宽分布特征的颗粒材料。HAADF-STEM 图像及对应 Ga、In 元素 EDS 面分布图显示, 两种元素在单颗粒内部高度重叠。沿颗粒直径方向的 EDS 线扫描进一步给出了 Ga 和 In 质量分数分别约为 83.77% 和 16.23%, 两条信号曲线随位置变化的趋势基本一致, 未出现清晰的壳层富集峰或中心贫化谷。对于透射式微焦点靶材, 这种离散颗粒形貌有助于抑制大面积连续发射区的形成, 颗粒内较高的成分均匀性则有利于减小不同轰击位置之间的局部谱波动。从表面覆盖状态看, 颗粒之间保留的空隙意味着入射电子束在不同位置仍面对离散局域堆积单元, 连续金属层常见的大范围横向扩展在当前样品中并不突出。结构尺度和局域成分状态由此共同构成后续电子作用区和复合特征辐射输出的材料基础。

在 10.57~47.25 wt% In 范围内, 四组样品的 Ga-In 元素重叠 EDS 面分布见图 2。随着 In 质量分数增加, 各样品颗粒内部仍以黄绿色重叠信号为主, 仅见少量局部红色富集点, 就本文涉及的成分窗口而言, Ga 与 In 在颗粒内保持较高空间重叠度, 未见稳定连续的核壳分区。已有研究表明, Ga-In 液态合金在纳米尺度下的局域有序、混合熔和界面行为会共同影响组元分布[12]-[14]。对于透射式微焦点 X 射线靶, 更值得关注的是局域成分分布对近表层特征辐射输出稳定性的影响。图 2 所示各组样品在颗粒尺度上均



**Figure 1.** Microstructural characterization of the 80 nm GaIn nanoparticle material. (a) SEM image, 20 μm. (b) HAADF-STEM image and EDS elemental distribution maps of Ga and In, 200 nm; (c) EDS line profile curve across a representative particle; (d) Particle-size distribution histogram

**图 1.** 80 nm GaIn 纳米颗粒材料的微观结构表征。(a) SEM 图像, 20 μm; (b) HAADF-STEM 图像及 Ga、In 元素 EDS 面分布图, 200 nm; (c) 代表性颗粒的 EDS 线扫描曲线; (d) 颗粒粒径分布直方图



**Figure 2.** Overlapped Ga-In EDS elemental distribution maps of GaIn nanoparticles with different In contents. (a) 10.57 wt% In, 50 nm; (b) 13.00 wt% In, 50 nm; (c) 46.54 wt% In, 100 nm; (d) 47.25 wt% In, 100 nm; (e) Composition window map of the GaIn targets

**图 2.** 不同 In 含量 GaIn 纳米颗粒的 Ga-In 元素重叠 EDS 面分布图。(a) 10.57 wt% In, 50 nm; (b) 13.00 wt% In, 50 nm; (c) 46.54 wt% In, 100 nm; (d) 47.25 wt% In, 100 nm; (e) GaIn 靶材的成分窗口示意图

保持较高元素重叠度，因此不同轰击位置对应的局部谱组成波动能够控制在较小范围内。从图 2(e)所示成分窗口看，本文比较区间位于 Ga 富侧并延伸至接近共晶成分的位置，既包含低 In 含量颗粒，也覆盖中等 In 含量样品。尽管组分范围跨越较大，不同样品仍未出现主导性的颗粒内空间分区，这使后续模拟和成像统计能够建立在同一成分窗口内的横向比较基础上。

$$\Delta G = -T\Delta S_{mix} + \Delta H_{mix} + \gamma A$$

其中， $-T\Delta S_{mix}$  反映混合态的熵贡献， $\Delta H_{mix}$  与组元分离倾向相关， $\gamma A$  对应形成新界面的能量代价。在本文关注的 10.57 至 47.25 wt% In 区间内，这三部分共同影响颗粒内部的局域混合状态。对于靶材评价而言，平均成分本身并不足以决定辐射行为，电子作用区内是否存在突变性的成分分区同样关键。结合图 1、图 2 及图 2(e)所示成分窗口可以看出，本文后续模拟与成像分析集中在实际成像靶对应的材料区间内，从而能够在统一材料背景下比较结构特征、电子输运和成像统计结果，同时避免了由成分区间切换带来的额外变量。

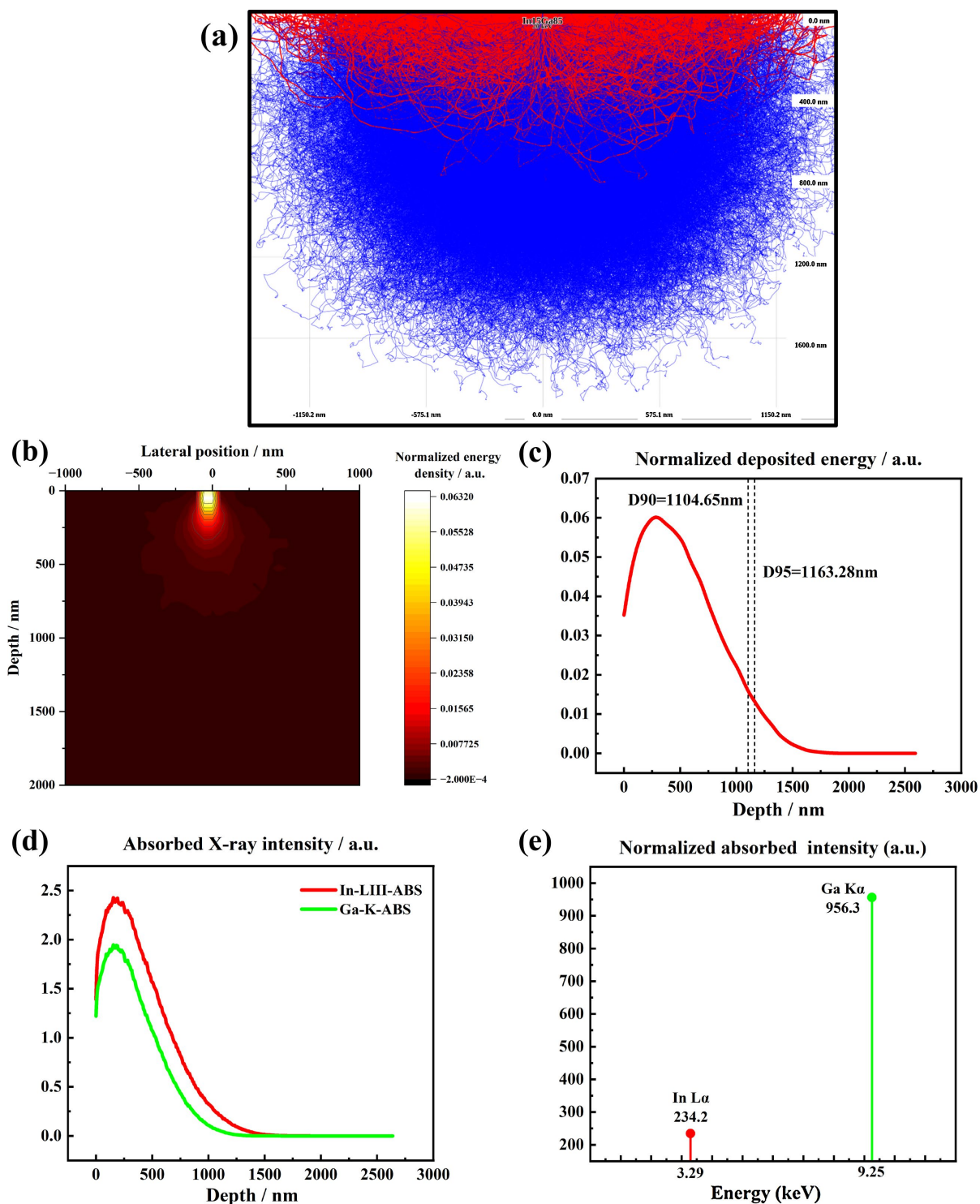
### 3.2. 电子输运、能量沉积与复合特征辐射输出

CASINO 模拟得到的  $\text{Ga}_{85}\text{In}_{15}$  靶材电子轨迹见图 3(a)。电子在入射点附近首先高度汇聚，随后随深度增加逐步展开，只有少量背散射电子返回表面。多数电子在靶内经历多次弹性与非弹性散射后耗散能量，形成沿纵向延伸更明显的相互作用区。与电子轨迹的纵向扩展特征一致，图 3(b)和图 3(c)给出的中心截面能量沉积结果呈现出明显的近表层集中分布。能量沉积峰位  $z_{peak}$  约为 264 nm， $D_{50}$ 、 $D_{90}$  和  $D_{95}$  分别约为 476、1005 和 1163 nm，绝大部分入射能量在距表面约 1  $\mu\text{m}$  范围内完成沉积。由于靶材厚度仅约 80 nm，电子在纵向上的主要作用尺度明显大于颗粒材料厚度，这意味着 20 keV 电子具备穿越颗粒层并持续激发近表层区域的能力，透射靶设定在电子作用尺度上具有可行性。换到成像角度看，影响有效发射区的关键因素并不局限于单个颗粒厚度本身，还与整体作用体积外包络及局域成分分布密切相关。

特征辐射产生深度与上述能量沉积区间高度重合，相关结果见图 3(d)。In L<sub>III</sub> 与 Ga K 吸收后特征 X 射线均在约 153 nm 处达到峰值，其  $D_{90}$  分别约为 804 nm 和 682 nm。图 3(d)给出的是不同深度处的局部强度分布，图 3(e)对应的是全深度积分后的吸收后总强度，两者分别对应局部分布峰值和积分总输出。结合 In L $\alpha$  与 Ga K $\alpha$  能量分别约为 3.29 keV 和 9.25 keV [19]，可知高低能特征线能够在同一近表层作用区内同步形成。吸收后总强度的比较进一步表明，Ga K $\alpha$  和 In L $\alpha$  在同一靶区内均保持可观输出，这为 GaIn 单靶实现复合特征辐射发射提供了依据，并为后续双波长成像研究保留了能谱设计空间。与此同时，图 3(d)中 In L<sub>III</sub> 局部曲线峰值更高，而图 3(e)中 Ga K $\alpha$  积分总强度占优，两者对应的物理量并不相同。前者反映单位深度处的局部产生强度，后者叠加了全深度累积产额及吸收修正后的透射保留比例。较高能量 Ga K $\alpha$  自吸收更弱，在深层贡献累积后更容易保持总输出优势，而 In L $\alpha$  则在近表层保留更敏感的低能响应。上述模拟未考虑颗粒离散及衬底影响，但因电子作用深度( $D_{90}$  约 1  $\mu\text{m}$ )远大于颗粒层厚度(80 nm)，结果仍具代表性。

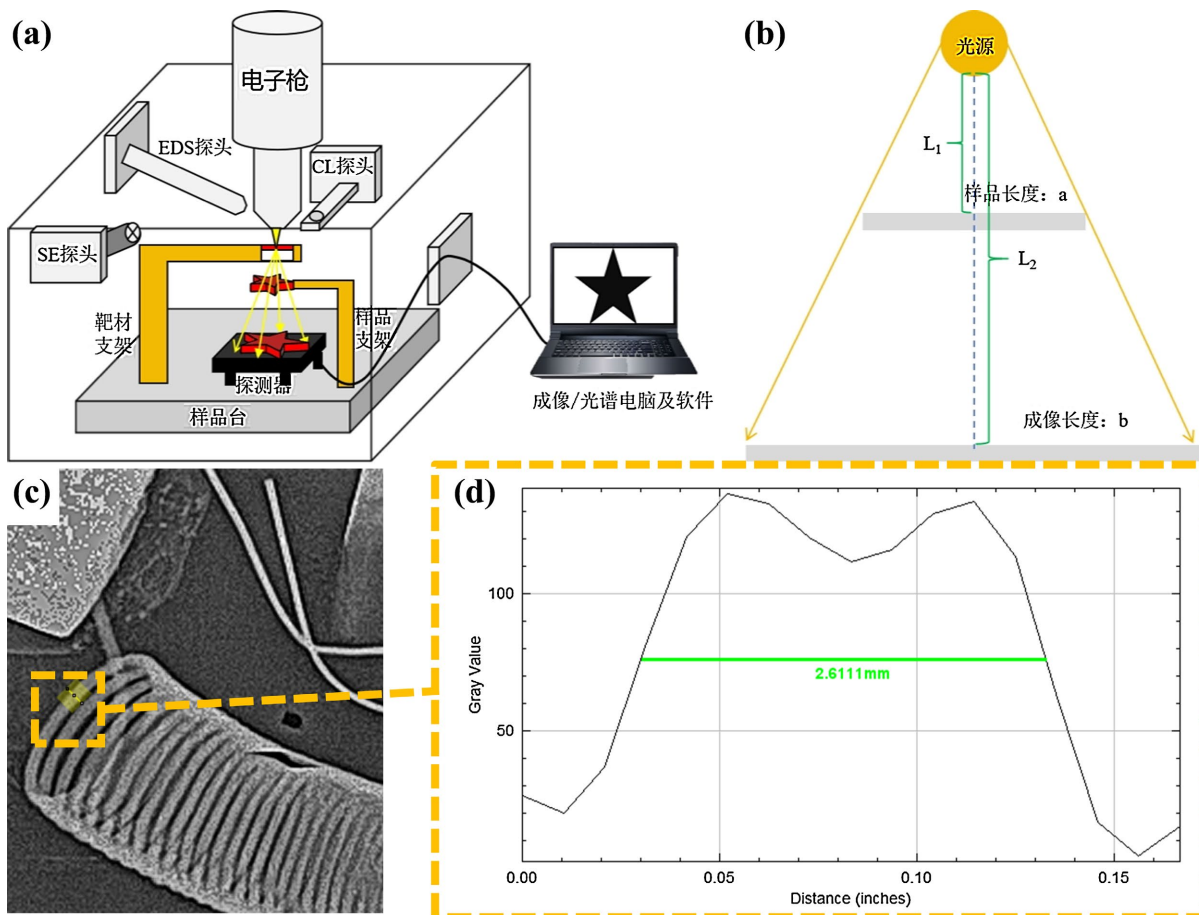
### 3.3. 镍铬螺线管成像结果与定量评价

透射式微焦点 X 射线成像采用固定的源样和样探几何关系，具体结构见图 4(a)和图 4(b)。聚焦电子束垂直轰击 GaIn 颗粒材料靶后，靶后侧出射 X 射线穿透镍铬螺线管标准样品，并在积分型探测器上形成放大投影，其中螺线管丝直径为 0.1 mm。镍铬螺线管兼具规则周期结构和稳定吸收边界，适合作为比较不同靶材成像表现的标准样品。其连续 4 圈结构能够在同一幅图像中提供多个相邻边界与多个峰谷区间，既便于观察周期成像能力，也便于后续进行统一灰度剖面分析与统计。螺线管周期结构在投影图中连续可辨，相邻金属丝边界对应的灰度起伏清晰。单周期线扫便于观察峰谷位置和边缘过渡，而对跨越



**Figure 3.** Electron transport, energy deposition, and characteristic X-ray generation-depth distribution for 20 keV electrons normally incident on the  $\text{Ga}_{85}\text{In}_{15}$  target. (a) Electron trajectory distribution map; (b) Two-dimensional distribution map of energy deposition in the central section; (c) Normalized depth profile of deposited energy; (d) Depth profiles of absorbed characteristic X-ray intensities for In  $L_{III}$  and Ga K; (e) Absorbed characteristic-radiation intensity spectrum

**图 3.** 20 keV 电子束垂直入射  $\text{Ga}_{85}\text{In}_{15}$  靶材时的电子输运、能量沉积及特征 X 射线产生深度分布。(a) 电子轨迹分布图; (b) 中心截面能量沉积二维分布图; (c) 归一化能量沉积深度分布曲线; (d) In  $L_{III}$  与 Ga K 吸收后特征 X 射线强度随深度的分布曲线; (e) 吸收后特征辐射强度谱



**Figure 4.** Imaging geometry of the transmission microfocus X-ray system and representative line-profile analysis of the Ni-Cr solenoid sample. (a) System structure diagram; (b) Geometric magnification relation; (c) Representative X-ray projection image and selected line-scan region; (d) Gray-value profile extracted from (c)

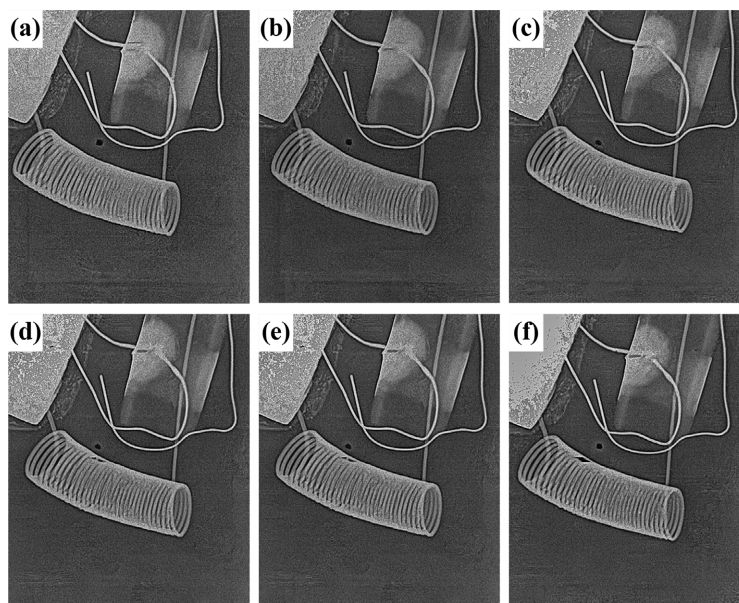
**图 4.** 透射式微焦点 X 射线成像系统的几何关系与镍铬螺线管代表性线扫分析。(a) 系统结构示意图；(b) 放大倍数计算关系；(c) 代表性 X 射线投影图像及线扫选区；(d) 图(c)对应的灰度值曲线

约 4 个周期的平均灰度剖面进行统一比较，更适合判断条纹调制和局部展宽行为，代表性结果见图 4(c) 和图 4(d)。

6 组不同横向尺寸颗粒靶对应的投影图像见图 5。0.9 至 2.5  $\mu\text{m}$  范围内，各组条纹周期位置基本一致，成像几何与样品定位保持稳定；但条纹深浅和边缘锐利度已出现可分辨差别。1.5  $\mu\text{m}$  和 1.9  $\mu\text{m}$  两组螺线管条纹最为清楚，峰谷分界较陡；0.9  $\mu\text{m}$  与 1.0  $\mu\text{m}$  两组仍能保持连续周期结构，但局部条纹起伏略有减弱，其中 1.0  $\mu\text{m}$  组较 0.9  $\mu\text{m}$  组更易出现轻微发宽；2.0  $\mu\text{m}$  和 2.5  $\mu\text{m}$  两组虽然周期并未丢失，但峰谷反差明显下降，局部边界呈现更平缓的过渡。颗粒横向尺寸对图像质量的影响主要体现在条纹调制度衰减和局部模糊程度变化，而非周期位置漂移。

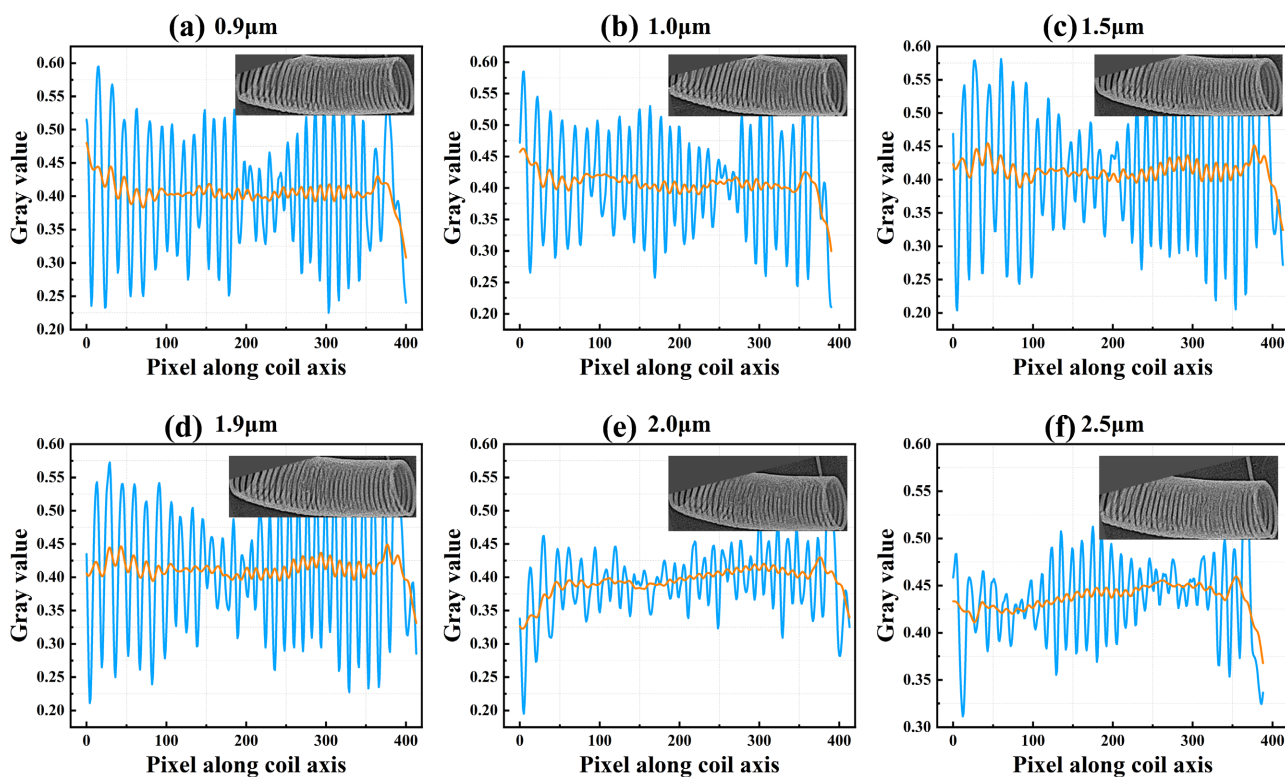
为避免单次多峰拟合受峰形不对称和局部噪声的影响，本文进一步对图 5 中每幅螺线管投影图像进行统一后处理：先截取螺线管中段区域并按线圈轴向旋正，再沿轴向对跨越约 4 个周期的多条相邻条纹求平均灰度剖面。图 6 给出了各组旋正后的局部投影及对应平均灰度剖面，表 1 汇总了主要条纹量化指标，图 7 展示了关键统计量的组间比较。该处理既保留了螺线管周期结构的主信息，也更适合直接判断条纹是否存在展宽或像素扩展倾向。

六组样品的主周期  $P_{lum}$  集中在 12.0 至 13.0 px 之间，各组投影的周期位置保持一致，图像放大几何



**Figure 5.** X-ray projection images of the Ni-Cr solenoid sample obtained with six GaIn particle targets of different lateral sizes. (a) 900 nm; (b) 1.0  $\mu\text{m}$ ; (c) 1.5  $\mu\text{m}$ ; (d) 1.9  $\mu\text{m}$ ; (e) 2.0  $\mu\text{m}$ ; (f) 2.5  $\mu\text{m}$

**图 5.** 6 组不同横向尺寸 GaIn 颗粒靶获得的镍铬螺线管 X 射线投影图像。(a) 900 nm; (b) 1.0  $\mu\text{m}$ ; (c) 1.5  $\mu\text{m}$ ; (d) 1.9  $\mu\text{m}$ ; (e) 2.0  $\mu\text{m}$ ; (f) 2.5  $\mu\text{m}$

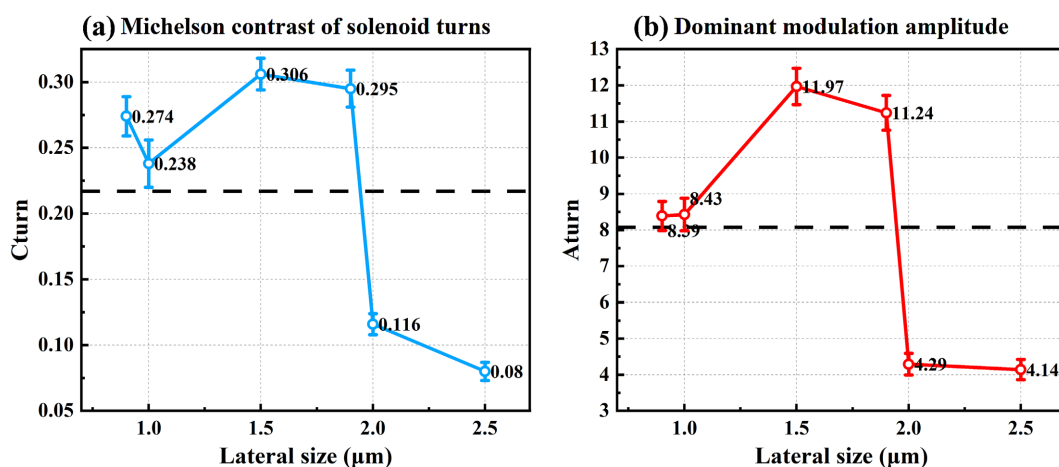


**Figure 6.** Rectified mid-section solenoid projections and axis-averaged gray-value profiles for six GaIn particle targets of different lateral sizes. The blue curves are the averaged gray-value profiles and the orange curves indicate the low-frequency trend. (a) 900 nm; (b) 1.0  $\mu\text{m}$ ; (c) 1.5  $\mu\text{m}$ ; (d) 1.9  $\mu\text{m}$ ; (e) 2.0  $\mu\text{m}$ ; (f) 2.5  $\mu\text{m}$

**图 6.** 6 组不同横向尺寸 GaIn 颗粒靶对应的螺线管中段旋正投影及轴向平均灰度剖面。蓝线为平均灰度剖面，橙线为低频趋势线。(a) 900 nm; (b) 1.0  $\mu\text{m}$ ; (c) 1.5  $\mu\text{m}$ ; (d) 1.9  $\mu\text{m}$ ; (e) 2.0  $\mu\text{m}$ ; (f) 2.5  $\mu\text{m}$

**Table 1.** Statistical results of stripe metrics extracted from the solenoid projection images of six GaIn particle targets with different lateral sizes**表 1.** 6 组不同横向尺寸 GaIn 颗粒靶螺线管投影条纹指标统计结果

横向尺寸/ $\mu\text{m}$	$C_{turn}$	$A_{turn}$	$A_{rms}$	$W_{turn}/\text{px}$	$P_{turn}/\text{px}$	$W_{turn}/P_{turn}$
0.9	0.274	8.39	0.0817	6.06	13.00	0.466
1.0	0.238	8.43	0.0748	6.51	13.00	0.501
1.5	0.306	11.97	0.0909	5.87	12.00	0.489
1.9	0.295	11.24	0.0880	5.92	13.00	0.455
2.0	0.116	4.29	0.0437	5.97	12.00	0.498
2.5	0.080	4.14	0.0395	5.66	12.00	0.472

**Figure 7.** Statistical results of solenoid stripe metrics extracted from six GaIn particle targets with different lateral sizes  $D$ . (a) Statistical results of the contrast  $C_{turn}$  of the striped Michelson, the dotted line represents the overall average value; (b) Statistical results of the dominant modulation amplitude  $A_{turn}$ , the dotted line represents the overall average value. Error bars represent the standard deviation estimated from the gray-value fluctuations ( $A_{rms}$ ) and the variation among multiple line-scan profiles across adjacent periods

**图 7.** 6 组不同横向尺寸  $D$  的 GaIn 颗粒靶螺线管条纹统计结果。(a) 条纹 Michelson 对比度  $C_{turn}$  的统计结果, 虚线表示整体平均值; (b) 主周期调制幅值  $A_{turn}$  的统计结果, 虚线表示整体平均值。误差棒表示由灰度起伏( $A_{rms}$ )及相邻周期多条线扫描剖面变化估算的标准偏差

未发生系统性偏移。相应的条纹半高宽  $W_{turn}$  分布在 5.66 至 6.51 px 之间,  $W_{turn}/P_{turn}$  位于 0.455 至 0.501。整体上看, 这一比值并未随颗粒横向尺寸  $D$  单调变化, 不存在随  $D$  增加而同步加剧的整体几何放大或周期拉伸现象。然而, 1.0  $\mu\text{m}$  组的  $W_{turn}/P_{turn}$  达到 0.501, 较 0.9  $\mu\text{m}$  组和 1.9  $\mu\text{m}$  组偏高, 提示其中部条纹已出现轻微发宽; 2.0  $\mu\text{m}$  和 2.5  $\mu\text{m}$  组虽然  $W_{turn}/P_{turn}$  仍处于相近区间, 但其周期位置保持稳定而条纹调制显著减弱, 更接近局部灰度扩散主导的模糊, 而非真实结构周期被重新放大。

与条纹展宽指标相比, 灰度调制相关参数对组间差异更为敏感。六组样品的  $C_{turn}$  分别为 0.274、0.238、0.306、0.295、0.116 和 0.080, 对应  $A_{turn}$  分别为 8.39、8.43、11.97、11.24、4.29 和 4.14。1.5  $\mu\text{m}$  和 1.9  $\mu\text{m}$  两组同时具备更高的条纹对比和更强的主周期调制, 螺线管峰谷起伏保持最好; 0.9  $\mu\text{m}$  和 1.0  $\mu\text{m}$  组处于中间水平, 其中 1.0  $\mu\text{m}$  组在对比度下降的同时出现较高的  $W_{turn}/P_{turn}$ , 已表现出轻微像素扩展倾向; 2.0  $\mu\text{m}$  和 2.5  $\mu\text{m}$  组的  $C_{turn}$  和  $A_{turn}$  则明显下降至前四组的一半左右, 峰谷过渡明显变缓, 图像中最突出的退化方式为周期灰度调制度损失和局部边缘发糊。

这一结果与电子输运尺度的模拟判断可以形成更细化的对应。20 keV 电子在  $\text{Ga}_{85}\text{In}_{15}$  等效材料中的

$D_{90}$  约为 1005 nm, Ga K 与 In L 特征辐射的主要产生深度也集中在表层约 1  $\mu\text{m}$  范围内。对于 80 nm 厚颗粒层而言, 电子近表层作用区决定了是否能够形成稳定的局域复合发射, 而螺线管投影主周期在六组样品间始终保持 12 至 13 px, 系统几何并非造成组间差异的主因。因此, 2.0  $\mu\text{m}$  和 2.5  $\mu\text{m}$  组对比度与调制幅值的同步衰减, 更可能来源于较大横向颗粒尺度下局部覆盖连续性和发射均匀性的下降, 使探测器上记录到的灰度峰谷被平均化, 螺线管真实周期本身并未扩张。

$C_{turn}$  与  $A_{turn}$  主要反映螺线管条纹的亮度调制保持能力,  $W_{turn}/P_{turn}$  则用于表征周期内部的相对展宽程度。三类指标结合后可以更清楚地区分周期位置稳定而峰谷被削弱与整体周期被拉宽这两种情形。本文六组样品均未表现出主周期连续漂移, 图像基础几何关系保持一致; 但不同样品在条纹调制保持能力上已出现显著分层。1.5  $\mu\text{m}$  和 1.9  $\mu\text{m}$  两组的综合色调制能力最好, 2.0  $\mu\text{m}$  和 2.5  $\mu\text{m}$  两组的像素扩展或局部模糊倾向最强, 1.0  $\mu\text{m}$  组相较 0.9  $\mu\text{m}$  组也显示出一定的早期展宽趋势。

综合结构表征、电子输运模拟和螺线管投影统计可以看出, 0.9 至 2.5  $\mu\text{m}$  颗粒横向尺寸范围内的 GaIn 纳米颗粒材料均可形成可辨的周期投影, 并保持 Ga K $\alpha$  与 In L $\alpha$  复合发射这一材料优势; 但从图像质量角度看, 不同横向尺寸并非等效。对于 20 keV 工况, 1.5 至 1.9  $\mu\text{m}$  颗粒靶在条纹对比、主周期调制和相对展宽控制之间取得了更优平衡, 更有利于保持清晰的周期结构; 2.0 至 2.5  $\mu\text{m}$  样品则更易表现为峰谷调制衰减和局部灰度扩散, 且因所有实验中电子束参数和成像几何一致, SiN<sub>x</sub> 衬底导热良好, 可排除荷电及热效应的主导作用。因而, 后续优化不宜仅关注成像是否可辨, 还应把局部发射均匀性、颗粒覆盖连续性、条纹调制保持能力作为横向尺寸筛选的重要判据, 并结合实测能谱与分能窗成像进一步验证复合谱输出与空间分辨之间的耦合关系。

#### 4. 结论

本文围绕 GaIn 纳米颗粒材料的制备、结构调控及其透射式微焦点 X 射线源应用, 并建立了从材料结构、电子作用区到投影统计结果的较为完整的对应分析链条, 得到以下结论。

(1) 采用蒸发路径与蒸发源状态协同控制的高峰值速率热蒸发方法, 可在氮化硅薄膜上制备分散性良好的 GaIn 纳米颗粒材料。本文主要研究名义厚度约 80 nm 的样品, EDS 面扫和线扫结果均显示颗粒内部 Ga 和 In 分布均匀, 离散颗粒覆盖状态为后续受限发射区提供了形貌基础。

(2) 本文成像靶与结构筛选样品主要分布在 10 至 47 wt% In 区间, 覆盖共晶附近及 Ga 富一侧。结合图 1 的代表性 EDS 结果和图 2 的成分窗口界定, 可以认为该区间样品具有较高的局域成分重叠度。在接近共晶位置前, 颗粒内部仍未出现主导性的空间分区, 这一材料特征有利于保持电子近表层激发过程中的局部谱输出稳定性, 并为后续均匀等效模拟与图像定量比较提供一致的结构前提。

(3) 以 Ga<sub>85</sub>In<sub>15</sub> 等效均匀材料进行 CASINO 模拟发现, 20 keV 电子束入射时能量沉积峰位  $z_{peak}$  约为 264 nm,  $D_{90}$  和  $D_{95}$  分别约为 1005 nm 和 1163 nm, Ga K 与 In L 吸收后特征 X 射线主要产生于表层约 1  $\mu\text{m}$  范围内。该作用深度明显超过颗粒层厚度, 透射式激发在尺度上具有可行性。深度分布曲线中的局部峰值比 In L 更高, 而吸收后谱线总强度中 Ga K $\alpha$  高于 In L $\alpha$ , 二者分别对应局部分布峰值和积分总输出。In L $\alpha$  和 Ga K $\alpha$  吸收后特征辐射总强度分别为 234.228 和 956.298, 因而 GaIn 单靶具备复合特征辐射输出条件。

(4) 在相同成像几何条件下, 6 组横向尺寸为 0.9 至 2.5  $\mu\text{m}$  的 GaIn 颗粒靶均获得了可辨的螺线管周期投影图像, 主周期  $P_{turn}$  稳定在 12 至 13 px, 系统放大几何和样品定位保持一致。进一步基于旋正后的平均灰度剖面比较发现, 1.5  $\mu\text{m}$  和 1.9  $\mu\text{m}$  组的条纹 Michelson 对比度  $C_{turn}$  分别达到 0.306 和 0.295, 主周期调制幅值  $A_{turn}$  分别为 11.97 和 11.24, 图像质量最佳; 2.0  $\mu\text{m}$  和 2.5  $\mu\text{m}$  组的  $C_{turn}$  降至 0.116 和 0.080,  $A_{turn}$  降至 4.29 和 4.14, 表现出更明显的峰谷调制衰减和局部像素扩展或模糊倾向。在当前工况下, 颗粒横向尺寸对成像质量的影响主要体现为局部灰度调制保持能力, 几何周期整体并未扩张。综合成像与复合谱输出

需求, 1.5 至 1.9  $\mu\text{m}$  范围的 GaIn 纳米颗粒材料更适合作为透射式微焦点 X 射线源靶材的优选尺寸窗口。

## 致 谢

本研究得到了北京工业大学材料科学与工程学院实验平台的支持, 感谢课题组全体成员在 GaIn 纳米颗粒制备和透射式微焦点 X 射线成像表征过程中提供的宝贵讨论与协助。

## 参考文献

- [1] Röntgen, W.C. (1896) On a New Kind of Rays. *Nature*, **53**, 274-276.
- [2] Cao, G. (2018) Biomedical X-Ray Imaging Enabled by Carbon Nanotube X-Ray Sources. *Chinese Journal of Chemical Physics*, **31**, 529-536. <https://doi.org/10.1063/1674-0068/31/cjcp1806132>
- [3] Glagolev, P.Y., Demin, G.D., Djuzhev, N.A., Makhboroda, M.A. and Filippov, N.A. (2024) Study of the Dynamics of Heating Anode Units in a Maskless Nanolithograph Based on an Array of Microfocus X-Ray Tubes. *Technical Physics*, **69**, 232-242. <https://doi.org/10.1134/s1063784224010146>
- [4] Zhong, J., Tang, S., Gou, M., Shen, Y., Zhang, Y., Huang, Y., *et al.* (2024). A Nano-Focus X-Ray Source with Nanoneedle Cold Cathode by Simulation. 2024 37th International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC), Brno, 15-19 July 2024, 1-2. <https://doi.org/10.1109/ivnc63480.2024.10652306>
- [5] Behling, R., Hulme, C., Tolias, P. and Danielsson, M. (2024) The Impact of Tube Voltage on the Erosion of Rotating X-Ray Anodes. *Medical Physics*, **52**, 814-825. <https://doi.org/10.1002/mp.17528>
- [6] 宋健, 牛耕, 刘俊标, 等. 基于纳米针尖反射靶的 X 射线显微系统[J]. 电子显微学报, 2016, 35(4): 293-297.
- [7] Stahlhut, P., Ebersperger, T., Zabler, S. and Hanke, R. (2014) A Laboratory X-Ray Microscopy Setup Using a Field Emission Electron Source and Micro-Structured Reflection Targets. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **324**, 4-10. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2013.12.028>
- [8] 牛耕, 刘俊标, 赵伟霞, 等. 聚焦电子束对透射式微焦点 X 射线源的影响[J]. 光学学报, 2019, 39(6): 0634001-1-0634001-7.
- [9] Yu, F., Xu, J., Li, H., Wang, Z., Sun, L., Deng, T., *et al.* (2018) Ga-In Liquid Metal Nanoparticles Prepared by Physical Vapor Deposition. *Progress in Natural Science: Materials International*, **28**, 28-33. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2017.12.004>
- [10] Lide, D.R. (2004) CRC Handbook of Chemistry and Physics. 85th Edition, CRC Press.
- [11] González, D.J., González, L.E. and Stott, M.J. (2008) Structure of the Liquid-Vapor Interfaces of Ga, In and the Eutectic Ga-In Alloy—An *ab Initio* Study. *Journal of Physics: Condensed Matter*, **20**, Article ID: 114118. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/20/11/114118>
- [12] Tang, S., Mitchell, D.R.G., Zhao, Q., Yuan, D., Yun, G., Zhang, Y., *et al.* (2019) Phase Separation in Liquid Metal Nanoparticles. *Matter*, **1**, 192-204. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2019.03.001>
- [13] Amon, A., Chater, P.A., Vaughan, G., Smith, R. and Salzmann, C.G. (2023) Local Order in Liquid Gallium-Indium Alloys. *The Journal of Physical Chemistry C*, **127**, 16687-16694. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.3c03857>
- [14] Macur, G.J., Edwards, R.K. and Wahlbeck, P.G. (1968) Measurement of Activities in Gallium-Indium Liquid Alloys. *The Journal of Physical Chemistry*, **72**, 1047-1050. <https://doi.org/10.1021/j100849a046>
- [15] 潘桂玲. 扫描电镜发射源的对比及其对图像质量影响的分析[J]. 电子显微学报, 2021, 40(6): 764-769.
- [16] 凌妍, 钟娇丽, 唐晓山, 等. 扫描电子显微镜的工作原理及应用[J]. 山东化工, 2018, 47(9): 78-79, 83.
- [17] 贾志宏, 丁立鹏, 陈厚文. 高分辨扫描透射电子显微镜原理及其应用[J]. 物理, 2015, 44(7): 446-452.
- [18] Drouin, D., Couture, A.R., Joly, D., Tastet, X., Aimez, V. and Gauvin, R. (2007) CASINO V2.42—A Fast and Easy-to-Use Modeling Tool for Scanning Electron Microscopy and Microanalysis Users. *Scanning*, **29**, 92-101. <https://doi.org/10.1002/sca.20000>
- [19] Deslattes, R.D., Kessler, E.G., Indelicato, P., de Billy, L., Lindroth, E. and Anton, J. (2003) X-Ray Transition Energies: New Approach to a Comprehensive Evaluation. *Reviews of Modern Physics*, **75**, 35-99. <https://doi.org/10.1103/revmodphys.75.35>