

文章编号: 1671-7449(2026)05-0569-06

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(5): 569-574.

抗电子辐照铌酸锂薄膜 MEMS 振动传感器

王蕾*, 李晓黄

(中北大学 仪器与电子学院, 山西 太原 030051)

摘要: 微机电系统 (Microelectromechanical System, MEMS) 振动传感器在多个领域具有广泛应用。通过 X 射线衍射 (X-Ray Diffraction, XRD) 分析了不同辐照速率下铌酸锂 (LN) 薄膜的晶体特性, 并比较了不同辐照下 MEMS 振动传感器的输出性能。结果表明, 在高速率电子辐照下, 铌酸锂薄膜晶体结构保持稳定, 电子辐照对传感器输出性能影响有限。最大辐照速率为 $1.01 \times 10^{11} \text{ e}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 时, XRD 图像仅出现 0.08° 的轻微位移, 传感器的最大相对误差为 3.2%, 灵敏度偏差为 2.69%。研究表明基于 LN 的 MEMS 振动传感器在极端辐照环境下具有良好应用潜力。

关键词: 振动传感器; 电子辐照; 铌酸锂; 微机电系统; 薄膜

中图分类号: TP825

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026069

引用格式: 王蕾, 李晓黄. 抗电子辐照铌酸锂薄膜 MEMS 振动传感器[J]. 测试技术学报, 2026, 40(5): 569-574.

Wang Lei, Li Xiaohuang. Lithium niobate thin-film MEMS vibration sensors for electronically irradiated environments [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(5): 569-574.

Lithium Niobate Thin-Film MEMS Vibration Sensors for Electronically Irradiated Environments

Wang Lei*, Li Xiaohuang

(School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Microelectromechanical systems (MEMS) vibration sensors are widely used in various fields. This study investigates the crystal characteristics of lithium niobate (LN) thin films under different electron irradiation rates using X-ray diffraction (XRD), and compares the output performance of MEMS vibration sensors subjected to varying irradiation conditions. The results indicate that under high-rate electron irradiation, the crystal structure of the LN thin films remains stable, and the effect of irradiation on the sensor's output performance is limited. At the maximum irradiation rate of $1.01 \times 10^{11} \text{ e}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, the XRD pattern shows only a slight shift of 0.08° , with the sensor exhibiting a maximum relative error of 3.2% and a sensitivity deviation of 2.69%. These findings suggest that LN-based MEMS vibration sensors hold strong application potential in extreme radiation environments.

Key words: vibration sensors; electronic irradiation; lithium niobate; MEMS; thin film

0 引言

微机电系统 (Microelectromechanical System, MEMS) 因其体积小、重量轻、能耗低等优势, 广泛

应用于惯性导航^[1-2]、动态定位^[3]、环境监测等航空航天领域^[4-5]。太空中来自太阳风和地球辐射带的高能电子 (β 粒子等) 可能使材料晶格损伤和电荷积累^[6-7], 导致器件失效或击穿, 传统硅基 MEMS 传感器可靠

【收稿日期】2026-01-15

【修回日期】2026-03-05

【录用日期】2026-03-08

*【通信作者】王蕾 (1991—), 女, 硕士, 主要从事微纳电子器件研究。E-mail: 20160052@nuc.edu.cn。

性面临挑战。电子辐照通过电离损伤和位移效应引发局部电荷积累,并通过高能电子束与材料原子相互作用,导致材料内部一系列物理和化学变化^[8-9]。Othon等^[10]发现Langmuir-Blodgett薄膜在电子辐照下会因非晶化导致压电性能下降。传统抗辐照措施通常会导致器件体积增大,从而限制其有效集成^[11],如采用稀土氧化物(如 Er_2O_3)通过散射吸收过程减少辐射穿透,或在压电器件中添加冗余电路^[12-13]。

已有研究表明铁电材料具有良好的抗辐照性能,锆钛酸铅(PZT)薄膜在经过5 Mrad伽马射线辐照后,其极化强度几乎没有变化^[14];氮化铝(AlN)在中子和伽马辐射下保持稳定,且压电系数不变^[15];铌钛酸盐换能器在高达 $5 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ 的快中子流下可正常工作^[16]。PZT具有显著的压电性能优势,但含铅材料的发展受限。AlN具有良好的温度稳定性,但压电系数较低。铌酸锂作为一种具有良好压电性能的无铅铁电单晶材料,因其较宽的禁带(4.9 eV),理论上不易受到电子激发的影响,并且稳定的晶体结构使其受到辐射时不易产生非晶化,具有较强的抗辐照能力^[17-18]。综合压电性能、温度稳定性、抗辐照性能、耐用性等,本文选择铌酸锂作为功能材料。

本研究旨在通过实验探讨电子辐照对铌酸锂及其压电传感器输出性能的影响。采用微纳加工技术制备MEMS传感器,并在不同电子辐照速率下进行测试,以研究辐照效应对传感器性能的影响。研究重点分析器件的XRD谱图变化,以及辐照前后传感器输出性能的变化。实验结果表明,电子辐照对铌酸锂材料的晶体结构影响较小,且铌酸锂基MEMS传感器在辐照环境中表现出良好的重复性。

1 原理及制备

压电悬臂梁因其高效的能量转换能力被广泛应用于能量采集器等领域。当外力作用下,悬臂梁变形,压电层表面产生电荷,通过收集这些电荷可分析振动。该传感器采用 d_{33} 压电模式,传感器沿Z轴正向的振动模式如图1(a)所示,当振动沿Z轴施加时,中心质量块驱动悬臂梁变形,产生相应电荷输出。图1(b)显示了传感器横截面的振动分析。

本研究使用的铌酸锂薄膜MEMS振动传感器制备工艺如图2所示。所用X切铌酸锂单晶键合片由济南晶正电子科技有限公司提供,其中键合片的铌酸锂薄膜厚度为 $5 \mu\text{m}$,硅衬底的厚度为 $500 \mu\text{m}$ 。

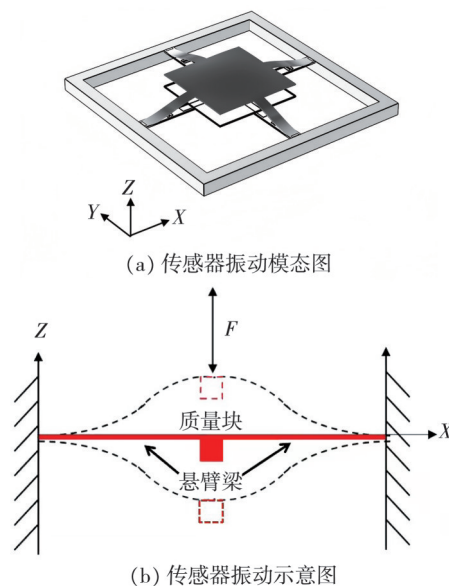


图1 传感器工作原理图

Fig. 1 Sensor working principle diagram

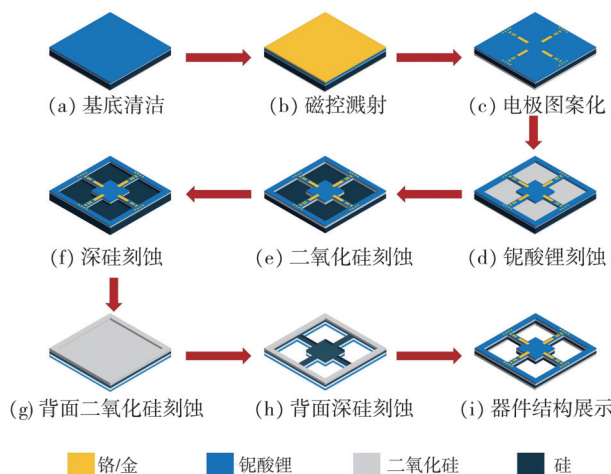


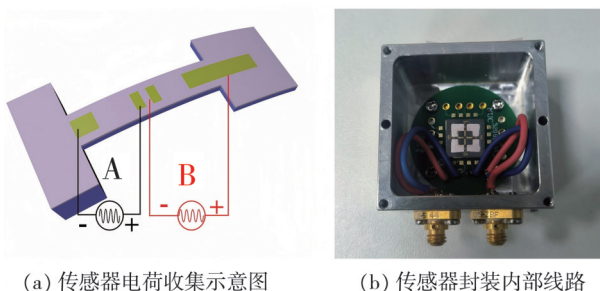
图2 传感器制备工艺流程图

Fig. 2 Sensor preparation process flowchart

首先,对铌酸锂键合片进行清洗。在背面刻蚀过程中,为防止光刻胶掩膜消耗过快,使用电感耦合等离子体化学气相沉积技术沉积 $2 \mu\text{m}$ 二氧化硅层作为硬掩膜。接着,通过磁控溅射在铌酸锂表面沉积铬/金双层金属膜(20 nm Ar与200 nm Au),使用光刻工艺将电极图案转移到金属层,并通过离子束刻蚀(IBE)形成电极图案。之后,IBE刻蚀铌酸锂层(刻蚀深度 $5 \mu\text{m}$),形成微纳结构。铌酸锂刻蚀完后使用反应离子刻蚀去除二氧化硅层。然后,进行清洗、光刻和深反应离子刻蚀,以获得所需硅结构(结构厚度 $70 \mu\text{m}$)。再进行背面光刻、二氧化硅刻蚀、深硅刻蚀完成器件制造,最后清洁去除光刻胶和杂质。该器件的尺寸为 $11 \text{ mm} \times 11 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 。

如图3(a)所示,悬臂梁的弯曲变形导致上层压

电薄膜变形,从而产生输出电荷,A和B为传感器不同位置电极采集电荷。图3(b)为封装后的传感器,PCB电路上的引线与GM5-ZBF接口相连。



(a) 传感器电荷收集示意图

(b) 传感器封装内部线路

图 3 传感器电极连接示意及实物图

Fig. 3 Schematic and physical diagram of sensor electrode connections

2 实验设计

在中国科学院新疆物理化学技术研究所,使用电子加速试验台对传感器进行电子辐照实验。压电器件分别在不同辐照速率下进行辐照。电子能量设置为 1 MeV。辐照速率分别设置为无辐照速率(对照组)、 1.37×10^{10} 、 4.11×10^{10} 、 $1.01 \times 10^{11} \text{ e}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,反映了电子束强度。剂量率为 47.166 28、19.067 22 和 6.738 Gy/s,表示单位时间内材料吸收的辐照能量。总辐照剂量为 2 Mrad (Si),即材料吸收的总能量。辐照结束后,移除压电器件,测试不同辐照速率下振动传感器的特性和输出变化。电子辐照的相关参数如表 1 所示。图 4 展示了电子辐照的装置。

表 1 实验参数

Tab. 1 Experimental parameters

参数	数值
电子能量/MeV	1
辐照速率/ $(\text{e} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	1.37×10^{10} , 4.11×10^{10} , 1.01×10^{11}
束流/mA	0.07, 0.03, 0.01
剂量率/ $(\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1})$	47.166, 19.067, 6.738
总剂量/Mrad(Si)	2
辐照时间/s	424, 1 048, 2 968

本研究通过 XRD 分析了电子辐照对铌酸锂晶体结构的影响。XRD 方法能够准确识别辐照是否引发铌酸锂的相变或非晶化,通过衍射峰位置和强度的变化判断。如果辐照导致局部非晶化,XRD 谱图会显示扩散散射峰而非原始晶体尖锐峰值^[19]。根据布拉格方程,晶面间距 d 的变化与衍射角偏移直接相关^[20]。布拉格方程是 XRD 分析的基础公式,定义为

$$2d \sin \theta = n\lambda, \quad (1)$$

式中: d 为晶面间距; θ 为布拉格角; λ 为X射线波长;

n 为衍射级数(通常为1)。在辐照损伤研究中,晶面间距的变化是评估材料结构完整性变化的重要指标,通过与标准图样对比,可判断材料结构是否发生变化。



图 4 电子辐照实验

Fig. 4 Electron irradiation experiment

图 5 所示的振动传感器通过上述测试系统进行评估,以验证其对振动信号的响应能力。振动信号的生成由北京中元振动公司制造的振动台(ACT2000)提供。本传感器的固有频率为 5.175 kHz,为避免共振现象,测试系统的加速度范围设定为 3g~15g,振动频率范围为 20~2 400 Hz。

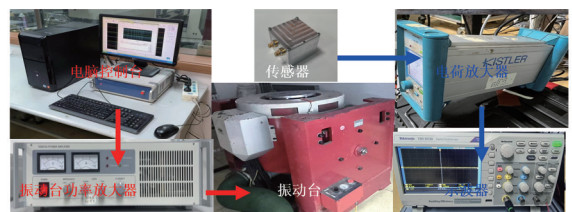


图 5 传感器测试系统

Fig. 5 Sensor test system

3 结果与讨论

如图 6 所示,未辐照器件的 XRD 峰值测量为 34.82° ,在辐照速率为 $1.01 \times 10^{11} \text{ e}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 时,峰值为 34.9° ,偏移值为 0.08° 。

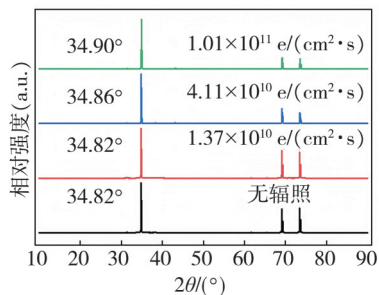


图 6 器件辐照前后 XRD 测试峰值偏移的比较

Fig. 6 Comparison of XRD peak shifts before and after device irradiation

辐照前后铌酸锂的 XRD 峰值没有显著变化,表明电子辐照对铌酸锂材料没有造成明显的辐照损伤。

随后,针对不同辐照速率下的传感器进行了电荷输出性能测试。

如图7所示,在频率为2 000 Hz的激励力下,压电振动传感器的频谱特征分布保持一致,表明无论辐照过程中采用的速率如何变化,传感器仍能准确识别和提取振动信号。

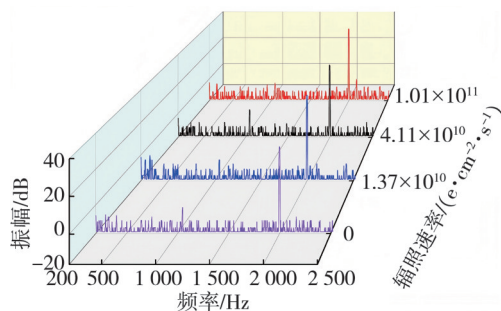
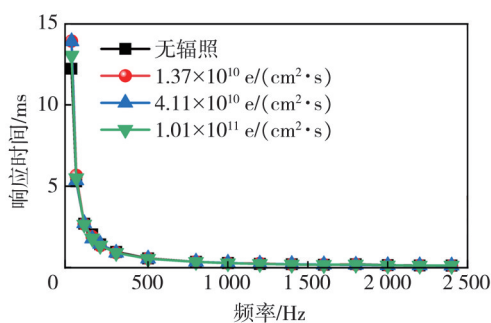


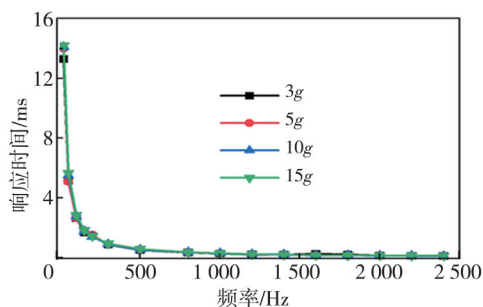
图7 激励信号频率为2 000 Hz时,传感器输出信号在不同辐照速率下的频谱分析曲线

Fig. 7 Frequency spectrum analysis curves of sensor output signal at different irradiation rates when excitation signal frequency is 2 000 Hz

图8(a)为传感器在不同频率下输出信号响应时间的变化曲线,图8(b)为在辐照速率为 $1.01 \times 10^{11} \text{ e}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 下,压电振动传感器在不同加速度激励力下的信号响应时间变化曲线。



(a) 传感器在不同频率下输出信号响应时间



(b) 传感器在不同加速度激励力下的信号响应时间

图8 传感器辐照前后输出性能的响应时间变化

Fig. 8 Change in response time of sensor output performance before and after irradiation

研究发现,传感器的响应时间在不同辐照速率下没有显著变化。测试频段内,传感器的最小

响应时间为 $110 \mu\text{s}@2\,400 \text{ Hz}$,辐照后的传感器在高频测试带仍能表现出快速的信号响应时间。

输出电荷灵敏度是评估传感器输出性能的关键指标。如图9所示,比较了不同电子辐照速率下传感器的输出电荷值,结果表明,所制备传感器的输出性能在电子辐照下基本不受影响。

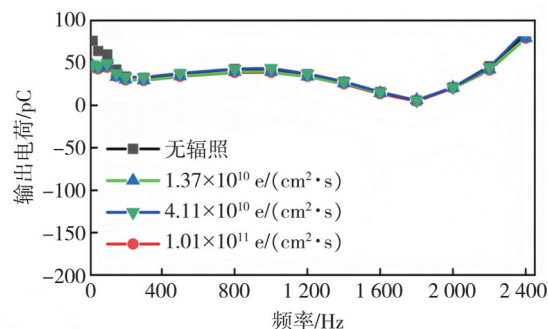


图9 传感器在不同电子辐照速率下的输出

Fig. 9 Sensor output at different electronic irradiation rates

图10展示了不同辐照速率下,传感器在频率为2 400 Hz的激励振动下输出电荷与加速度之间的关系。传感器的电荷灵敏度最高为 9.09 pC/g ,且输出电荷灵敏度受电子辐照速率的影响较小。最大辐照速率 $1.01 \times 10^{11} \text{ e}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 下的灵敏度偏差为2.69%。

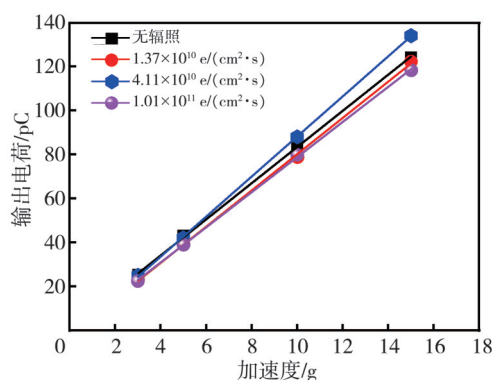
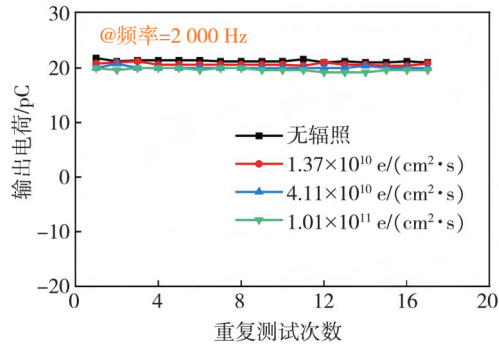


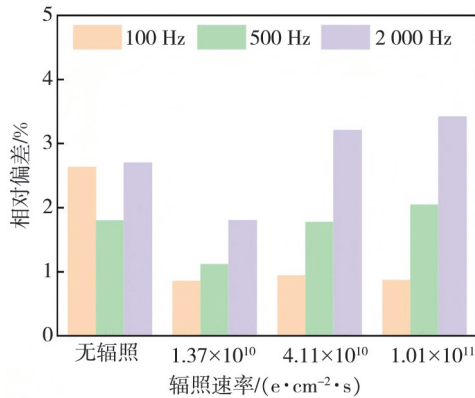
图10 传感器在不同电子辐照速率下输出电荷与输入加速度之间的关系

Fig. 10 Relationship between charge output of sensor and input acceleration at different electronic irradiation rates

图11(a)为传感器在2 000 Hz振动信号下的输出重复性测试。图11(b)比较了低、中、高频带传感器在不同辐照下的重复性,最大相对误差比为3.2%。通过对比传感器在电子辐照前后的性能,发现制备的钕酸锂单晶薄膜传感器在响应时间、灵敏度、线性度和重复性等方面表现出优越且稳定的输出性能。



(a) 不同辐照速率下传感器输出电荷性能的重复性测试



(b) 低、中、高频段传感器输出电荷性能的最大重复性偏差性比较

图 11 辐照对传感器重复性影响

Fig. 11 Effect of Irradiation on Sensor Repeatability

4 结 论

本研究聚焦于铌酸锂传感器在电子辐照前后的性能变化,设计并制造基于铌酸锂薄膜的振动传感器,并将其在不同辐照速率下接受电子辐照。研究发现,铌酸锂单晶薄膜传感器在一定程度上对电子辐照具有抗性。XRD 分析结果显示,未辐照传感器的峰值 XRD 测量为 34.82° ,在辐照速率为 $1.01 \times 10^{11} \text{ e}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 时,测得的峰值为 34.9° ,偏移值为 0.08° 。传感器在辐照前后的衍射峰值角度没有发生显著变化。对不同辐照条件下低、中、高频带传感器的重复性进行了比较,最大相对误差为 3.2%。在最大辐照速率 $1.01 \times 10^{11} \text{ e}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 下,灵敏度偏差为 2.69%。本研究结果表明,电子辐照对铌酸锂材料的结构损伤较小,且对传感器输出性能的影响有限。所制备的基于铌酸锂薄膜的振动传感器在极端环境下具有良好的应用前景。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

- [1] Yang Q, Cai C, Yang M, et al. Dynamic tilt testing of MEMS inclinometers based on conical motions[J]. Metrology and Measurement Systems, 2022, 30(1): 31-47.
- [2] Lin D, Macdonald R, Andarawis E, et al. MEMS inertial sensors for extreme environments [C]//2025 23rd International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers), 2025: 1496-1499.
- [3] Wen Z, Yang G, Cai Q. A novel design of micro-motor based rotational MEMS-INS/dead reckoning increment integrated navigation system in satellite-denied environments [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2025, 74(11): 17192-17203.
- [4] Chen Z, Li C, Chen Y, et al. Enhancement of c-axis oriented aluminum nitride films *via* low temperature DC sputtering [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(16): 17673-17677.
- [5] Ma W G, Wang X P, Zhang Y F, et al. Aircraft attitude estimation of MEMS sensor based on modified particle filter[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2018, 9(2): 180-187.
- [6] He Y, Ma C, Yin H. Measuring the radiation hardness of terahertz devices for space applications [J]. Communications Physics, 2024, 7: 362.
- [7] Li J, Chen Q, Zhou J, et al. Radiation damage mechanisms and research status of radiation-resistant optical fibers: a review[J]. Sensors, 2024, 24(10): 3235.
- [8] Wang R R, Guo H, Tang J, et al. Effect of gamma irradiation on optical properties of CdSe/ZnS quantum dots embedded in PDMS[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2022, 13(1): 122-126.
- [9] Miyazaki H, Morimoto J, Toda K, et al. Characterization of LiNbO₃ single-crystal substrates irradiated with electrons [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2011, 50(7S): 07HB07.
- [10] Othon C M, Bateman F B, Ducharme S. Effects of electron irradiation on the ferroelectric properties of Langmuir-Blodgett copolymer films [J]. Journal of Applied Physics, 2005, 98: 014106.
- [11] Baldini L, Brez A, Himel T, et al. Fabrication of the GLAST silicon tracker readout electronics [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006, 53(5): 3013-3020.

- [12] Mekki J, Dusseau L, Glaser M, et al. Packaging effects on RadFET sensors for high energy physics experiments[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2009, 56(4): 2061-2069.
- [13] Ogul H, Gultekin B, Bulut F, et al. A comparative study of 3D printing and sol-gel polymer production techniques: a case study on usage of ABS polymer for radiation shielding[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2024, 56(6): 1943-1949.
- [14] Scott J F, Araujo C A, Meadows H B, et al. Radiation effects on ferroelectric thin-film memories: retention failure mechanisms[J]. Journal of Applied Physics, 1989, 66(3): 1444-1453.
- [15] Parks D A, Tittmann B R. Radiation tolerance of piezoelectric bulk single-crystal aluminum nitride[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2014, 61(7): 1216-1222.
- [16] Reinhardt B, Daw J, Tittmann B R. Irradiation testing of piezoelectric (aluminum nitride, zinc oxide, and bismuth titanate) and magnetostrictive sensors (remendur and galfenol)[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018, 65(1): 533-538.
- [17] Mamoun S, Merad A E, Guilbert L. Energy band gap and optical properties of lithium niobate from *ab initio* calculations[J]. Computational Materials Science, 2013, 79: 125-131.
- [18] Li J, He J, Niu L, et al. Ferroelectric domain intrinsic radiation resistance of lithium niobate ferroelectric single-crystal film[J]. Crystals, 2024, 14(6): 537.
- [19] Hakhiyeva R R, Abiyev A S, Huseynov E M. Comprehensive analysis of gamma irradiation-induced crystallographic transformations in TiC nanoparticles using X-ray diffraction techniques[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2025, 227: 112363.
- [20] Khan H, Yerramilli A S, D'Oliveira A, et al. Experimental methods in chemical engineering: X-ray diffraction spectroscopy: XRD[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2020, 98(6): 1255-1266.