



低能离子注入技术及其在材料研究中的应用

高原*, 付东坡, 杨向军, 薛建明

北京大学物理学院, 核物理与核技术全国重点实验室, 北京 100871

* 联系人, E-mail: pkugaoyuan@pku.edu.cn

2025-08-21 收稿, 2025-11-11 修回, 2025-11-11 接受, 2025-11-12 网络版发表

摘要 低能离子注入技术作为一种先进的浅层掺杂技术, 可以精准控制注入离子的种类、射程、注量和深度分布, 因而在半导体、材料科学、生物医学和能源等领域备受关注. 低能离子注入设备的架构与常规离子注入机类似, 但由于较低能量的离子(<100 keV)在传输过程中容易受空间电荷效应的影响, 从而导致离子束斑的发散, 降低传输效率, 影响注入效果, 其通常采用更紧凑的结构. 对于超低能量的离子束(<5 keV), 需采用先加速后减速的方法, 以保证束流注入样品前的传输效率. 北京大学低能离子研究团队研制了紧凑型低能离子注入系统, 可用于材料浅层掺杂和表面改性研究相关的离子注入实验. 该系统可提供100 eV~100 keV能区的多种离子束流、注入能量和注入剂量精准可控, 可提供氢、氦等十余种气态或固态元素的离子束, 可实现室温至950℃的温控注入. 系统建成之后, 与国内相关团队合作, 陆续在二维材料、薄膜材料、量子器件和核材料等领域开展了基于低能离子的材料研究工作.

关键词 低能离子, 离子注入, 材料改性, 辐照效应

自20世纪50年代开始, 随着离子束轰击实现半导体掺杂的概念被首次提出, 离子注入这个起源于核物理研究领域的技术开始逐渐出现在晶体管制造工艺中, 并在之后的半个多世纪里不断发展, 迄今为止已经成为整个集成电路制造领域不可或缺的重要主导技术^[1]. 可以说, 离子注入技术在半导体器件、工艺和设备等各方面的持续发展中都发挥了巨大作用^[2]. 离子注入技术利用载能离子与物质表面的相互作用, 造成微观尺度下晶格位移产生缺陷, 从而实现对材料的结构和性能改变. 其优势在于可以精准控制注入离子的种类、射程、注量和深度分布, 并且作为不受固溶度限制的非平衡过程, 适用于金属、半导体和绝缘体等各种材料的表面改性^[3,4].

近年来, 随着器件尺寸不断缩小, 以及二维材料、薄膜材料等新型功能材料的不断发展, 传统的以几百keV离子能量为主的注入设备和技术, 已经很难满足超

浅层离子掺杂的需求. 因此, 可以提供百keV以下能量的低能离子注入技术开始被关注, 其在半导体、材料科学、生物医学和能源等领域的应用也正在不断发展^[5~7]. 本文将主要围绕低能离子注入技术的基本原理和设备结构, 以及北京大学研制的低能离子注入系统及其在材料研究中的应用展开.

1 低能离子注入设备基本原理与主要组成

低能离子注入设备由离子源、束流引出透镜、聚焦透镜、分析磁铁、高压平台、加速管、中性束过滤器、扫描器、注入终端、束流测量组件、电源系统、真空系统和操作系统等部件组成. 较低能量的离子(<100 keV)在传输过程中容易受空间电荷效应的影响, 从而导致离子束斑的发散, 降低传输效率, 影响注入效果. 低能离子注入设备通常采用更紧凑的结构, 以缩短传输距离, 降低空间电荷效应. 对于超低能

引用格式: 高原, 付东坡, 杨向军, 等. 低能离子注入技术及其在材料研究中的应用. 科学通报, 2026, 71: 842–849

Gao Y, Fu D, Yang X, et al. Low-energy ion implantation technology and its application in materials research (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 842–849, doi: [10.1360/CSB-2025-5400](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5400)

量的离子束(<5 keV), 还需在终端样品附近加入减速电极, 并抬高样品电位从而实现离子降能, 这种先加速再减速的方法, 可以保证束流注入样品前的传输效率。

低能离子注入设备的结构通常如图1所示。离子源位于高压平台最高电位, 用于将中性原子或分子电离产生离子, 并经电极引出和聚焦形成离子束; 离子束经初级加速后传输至分析磁铁, 进而筛选出特定荷质比的离子进入加速管; 离子经过加速管之后达到注入所需能量, 可通过透镜进一步调制聚焦; 经过中性束过滤后的离子束通过X和Y方向变化的电场或机械扫描获得所需尺寸的均匀束斑, 最后进入注入终端。此外, 离子束在传输过程中, 可以通过具有二次电子抑制的法拉第杯进行束流的监测。

离子源是低能离子注入设备的核心部件之一。常见的离子源种类包括伯纳斯(Bernus)源、潘宁源、高频源、ECR微波源等。离子源腔室内的电子在功率馈入和磁场束缚下通过吸收能量、反复振荡等方式与中性原子或分子碰撞, 使其电离形成离子。离子源放电介质通常使用气体, 也可以在腔室内加入负电位的特定靶材并利用等离体体的轰击产生所需元素种类的离子。离子源的引出方式分为径向引出和轴向引出两种, 径向引出通常为狭缝引出, 总束流较大, 适合大面积离子注入, 但由于磁场的影响发射度通常较大, 对束流传输

组件性能要求较高; 轴向引出通常采用毫米尺度的圆孔, 发射度较小, 中心对称分布的束斑也利于引出聚焦系统的设计。

分析磁铁由直流电磁铁和真空扁盒组成, 离子束穿过真空扁盒时将受洛伦兹力作用发生偏转。通过设定偏转磁场值, 使得具有特定能量和荷质比的离子穿过扁盒出口, 从而实现筛选离子的功能。为了减小磁铁尺寸, 节约制造成本, 分析磁铁可以安装在高压平台上, 直接分析初级加速的离子束流, 但这种形式增加了高压平台的尺寸和承重, 以及高电位供电和控制的复杂性。在低能离子注入设备中, 也可以将分析磁铁置于加速管之后, 这样一方面缩小了高压平台体积, 降低磁铁操控难度, 另一方面也可以减弱空间电荷效应带来的束流发散。

低能离子注入设备的另一个关键部件是注入终端, 注入终端用于装载待注入的样品并进行实验, 可根据需要配备温控注入功能。终端应保证运行稳定可靠, 换样简便快捷, 尽量减少非注入时间的操作, 并具备束流监测功能。此外, 为保证注入均匀, 结合扫描器的配置情况, 终端内还会增加样品机械扫描的装置。对于需要离子后减速的注入终端, 还要增加减速透镜和样品台绝缘连接支撑等组件。

此外, 对于材料研究所需的低能离子注入设备, 为了保证其注入深度和剂量的精确控制, 并减少污染, 在

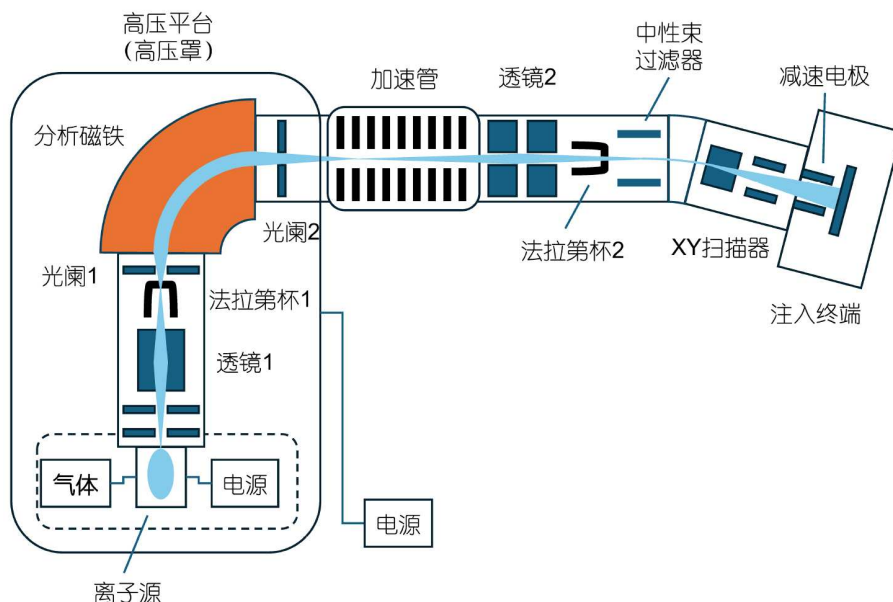


图1 低能离子注入设备原理与结构示意图

Figure 1 Principle and structural diagram of low-energy ion implantation equipment

高压电源、真空系统、束流测量等部件上,也需要进行针对性的设计与优化。

2 北大低能离子注入系统简介

低能离子注入技术作为一种先进的材料掺杂和表面改性技术,在诸多材料研究领域都有广泛的应用前景。目前国内外用于大规模集成电路低能离子注入机大多结构复杂,造价昂贵,在基础研究领域较为缺乏小型的可供实验研究和工艺探索使用的多功能离子注入装置^[8]。针对这一需求,北京大学低能离子研究团队在核物理与核技术全国重点实验室的支持下,研制了紧凑型低能离子注入系统(如图2)。该系统结构紧凑、操作简单、兼容扩展性好,非常适合作为实验室级别的设备用于高校等科研单位进行离子注入相关的材料研制和辐照效应研究工作。

该系统与图1所示结构基本一致,由离子源、束流传输组件、束流测量组件和注入终端等组成。此外,为了缩小高压平台体积,将分析磁铁安装于加速管之后(如图2)。整个系统的电极分布如图3(a)所示。由于束流发散随离子能量升高而减弱,为了实现15 keV以下离子的注入,系统采用了后减速方案。整个注入终端采用对地绝缘悬浮的连接方式,并在注入终端样品台前端增加一组减速电极,当束流穿过电极时,离子将受到电场的作用实现离子减速。此外,在减速电极入口处设置带负电位的电子抑制电极,用于将束流中的自中和电子阻挡在减速电极以外,从而避免其进入减速场再加速轰击样品。

如图3(b)和(c)所示,通过调整各电极的参数,可使系统在两种模式下工作:

(1) 总加速电压大于15 kV时,离子经由V2(约为10~15 kV)和V3提供的压差引出并经V4透镜聚焦,再由高压平台提供剩余的加速电压V9,经分析磁铁后漂移至终端,其间可由V5提供一定的聚焦调制、V7提供二次电子抑制。此模式下,离子总加速电压最终合计 $V2 + V9$ 。

(2) 总加速电压小于15 kV时,离子经由V2(约为10~15 kV)和V3提供的压差引出并经V4透镜聚焦,但高压平台不再提供加速电压,直接经分析磁铁后V5透镜进行聚焦调制,再由V6进行电子抑制,由V7和V8提供减速电压,使离子到达样品时能量降至所需值。此模式下,离子总加速电压最终合计V2~V8。

该系统主要性能参数见表1,通过结合上述两种工

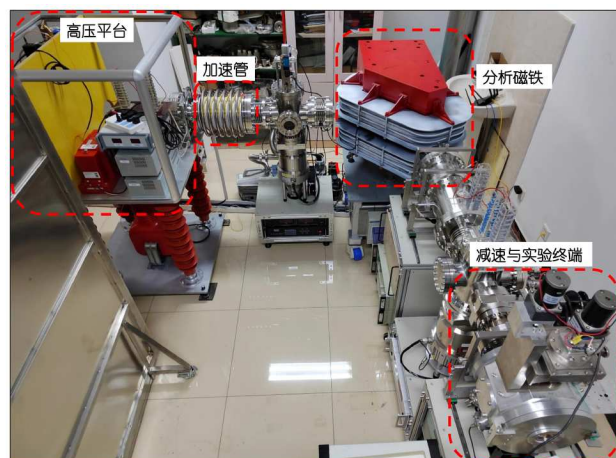


图2 北京大学低能离子注入系统

Figure 2 Low-energy ion implantation system at Peking University

作模式,可实现加速电压10~100 kV连续调节;配合减速部件,可提供100 eV~100 keV能区的多种离子束流;采用高精度低纹波高压电源和电子抑制电极,使注入能量和注入剂量精准可控;可切换接口统一的潘宁、高频和微波离子源,从而提供氢、氦等十余种气态或固态元素的离子束;可实现注量范围 $10^{12} \sim 10^{17}$ ion/cm²,注入面积3 cm×3 cm的注入实验;配备温控靶台,可实现室温至950℃的温控注入。

目前,该系统在材料研究领域有多种应用,作为独立的离子注入系统,与多个课题组合作,进行集成电路新工艺和材料表面改性实验研究,获得了良好效果。此外,该系统还可以作为产生离子束的子系统,集成至复杂设备系统中,已在聚变堆材料离子协同辐照效应相关的研究项目中发挥了重要作用。具体应用详见本文第3节。

3 低能离子注入系统在材料研究中的应用

3.1 低能离子注入技术在薄膜材料改性中的应用

低能离子由于能量较低,其在材料中的射程通常在百纳米以下,这使得低能离子特别适合进行薄膜材料的表面改性。通过精准控制注入深度和注量,可以在材料表面形成较为集中的元素掺杂和缺陷分布,利于表面改性的实现。低能离子注入技术由于诸多优点,被广泛应用于改善金属、半导体、氧化物、聚合物等各类薄膜的硬度和耐磨性、抗腐蚀性能、光学和电学等性质^[9,10]。我们与国内相关课题组合作,基于自研低能

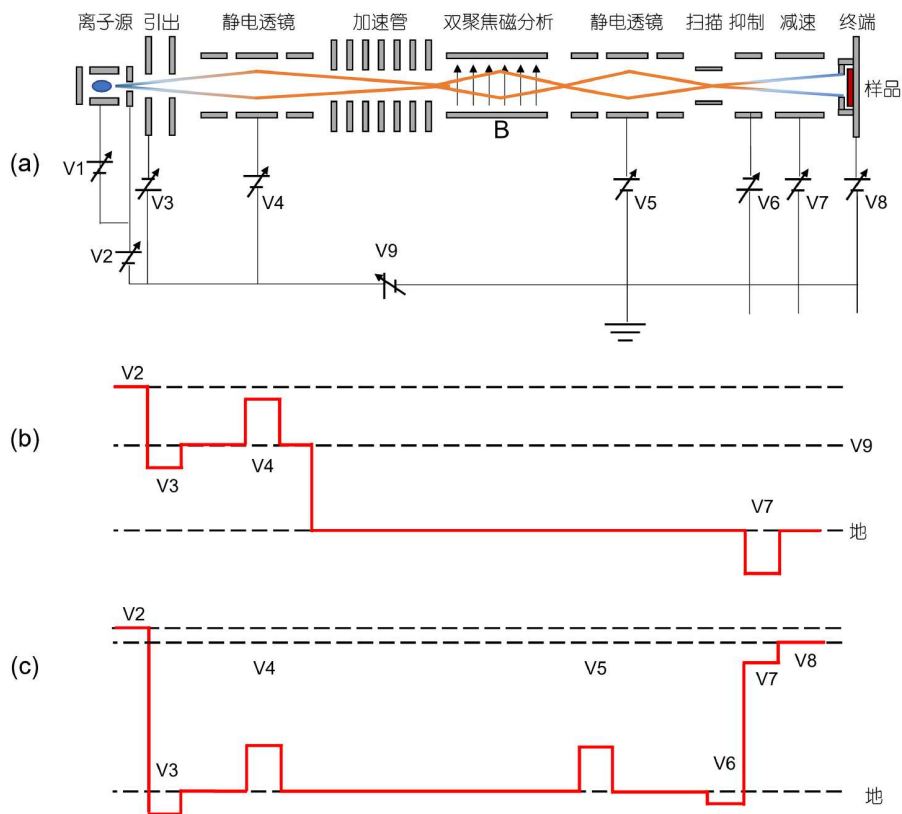


图3 低能离子注入系统电极(a)与电位(b, c)示意图

Figure 3 Schematic diagram of electrodes (a) and potentials (b, c) of the low-energy ion implantation system

表1 北京大学低能离子注入系统主要参数

Table 1 Performance parameters of the low-energy ion implantation system at Peking University

参数名称	参数内容
端电压	10~100 kV
终端减速电压	5~15 kV
离子种类	H、He、C、N、O、Si、Fe、Ni、Al、Cu、Ga、Mo、Ag、Ar、Xe等
终端离子流强	H ⁺ 10 μA, He ⁺ 10 μA, Ar ⁺ 10 μA, Al ⁺ 2 μA
注入温度	室温至950℃
注入面积	3 cm×3 cm(XY方向电扫描)
注入终端真空度	$3\times 10^{-5}\sim 1\times 10^{-4}$ Pa
系统尺寸	2 m(长)×2 m(宽)×1.5 m(高)

离子注入系统,开展了一些薄膜材料改性研究工作。

华东师范大学陈德杨课题组利用低能离子注入技术在钙钛矿(ABO_3)型薄膜材料改性方面进行了研究^[11]。其利用8 keV的低能氦离子注入,在 BiFeO_3 薄膜中实现了面内带电反相边界的简便制备。薄膜在 2.5×10^{15} ions/cm²注量的氦离子注入后,发生A位和B位

离子的转换,产生反位缺陷,薄膜表面的条纹畴结构消失,转变为单畴态,在注入深度处形成了多种原子键合构型,从而交织形成反相界面。这一研究工作借助低能离子注入技术揭示了铁电薄膜中带电反相畴界的原子尺度结构和稳定性机制,并且提供了一种利用离子注入制造畴壁的方法,为低能离子注入技术应用于畴壁纳米电子学、自旋电子学和存储器件提供了新的思路。

陈德杨课题组还将离子注入引起相变的机制用于 PbZrO_3 (PZO)薄膜储能密度的研究^[12]。利用8 keV的氦离子对具有多层结构的PZO薄膜进行注入,注入剂量由 $2.5\times 10^{15}\sim 5.0\times 10^{15}$ ions/cm²。通过XRD、STEM和AFM等表征手段,揭示了随注入剂量增加,薄膜发生正交相至四方相的相变。磁滞回线测量也发现样品产生了反铁电到弛豫铁电的相变,这种相变有助于打破长程反铁电有序性,从而导致在不牺牲极化强度的前提下提高击穿场强和能量储存密度,能量存储密度可以从20.5 J/cm²增加到62.3 J/cm²。这项工作为利用低能离子注入技术提高集成电路和储能设备中介电电容器

的能量储存性能提供了参考。

此外,我们也与华南理工大学陈燕课题组合作,通过辐照诱导单轴应变调控外延 $\text{SrCoO}_{2.5}$ (SCO)薄膜中的电阻开关特性^[13]。研究使用5 keV氮离子注入外延 $\text{SrCoO}_{2.5}$ 薄膜。由于晶格中注入了氮间隙原子,所有辐照后的SCO薄膜都表现出面外拉伸应变,并且随着离子注量从 $1 \times 10^{14} \text{ ion/cm}^2$ 增加到 $1 \times 10^{15} \text{ ion/cm}^2$,应变从0.447%线性增加到2.785%。其中, $1 \times 10^{15} \text{ ion/cm}^2$ 辐照的器件表现出最佳性能,具有最高的开关比和良好的耐久性。这项工作也为调控氧化物薄膜的应变状态及其相关功能提供了一种有效方法。

3.2 低能离子注入实现量子色心掺杂

随着新型材料体系的不断发展,对材料磁性等结构特性的表征测量技术提出了诸如在灵敏度、空间分辨和动态范围等参数方面更高的要求。因此,研制更高性能的探测器也就显得至关重要。金刚石中的色心,尤其是带负电的氮空位(NV^-)色心,因其作为纳米级传感器在核磁共振纳米级光谱学和成像方面的应用潜力而备受关注^[14]。金刚石探测器如果需要优化其量子性能,实现更高的空间分辨,就需要 NV^- 色心尽量靠近表面,并且需要精确控制 NV^- 色心在表面的分布和浓度分布。

Giorgio Speranza等人利用低能离子注入方法,在金刚石表面5 nm以内的浅层区域成功制备了氮空位色心^[15]。该研究在CVD单晶金刚石表面沉积了100 nm厚的 SiO_2 减速层,使用30 keV的氮离子分别沿 7° 和 45° 入射角注入样品,氮注量为 $9.0 \times 10^{18} \text{ ions/cm}^2$,然后再用HF去除 SiO_2 层,以实现氮离子在金刚石表面的富集。通过SRIM计算,30 keV的氮离子倾角入射并经 SiO_2 减速后,在金刚石表面附近可以形成峰值浓度分别为 2.0×10^{20} 和 $1.0 \times 10^{20} \text{ N atoms/cm}^3$ 的氮离子分布。通过角分辨X射线光电能谱(angle-resolved X-ray photoelectron spectroscopy, ARXPS)和飞行时间二次离子质谱(time-of-flight secondary ion mass spectrometry, ToF-SIMS)分析,证实了 NV^- 色心的形成。其中, 7° 入射角注入的样品具有更高的PL发射强度和更高的 NV^-/NV^0 比例,色心密度更高。

北京大学薛建明团队也利用北京大学低能离子注入系统进行了碳化硅硅空位色心、金刚石 NV^- 色心等制备相关研究工作,相关工作即将发表。

综上,低能离子注入技术可以通过调节入射能量、注量和角度,在金刚石表面进行精准的氮离子植入,在

抑制沟道效应的同时实现对色心密度和分布的控制,为此类量子色心探测器的制备提供了新的技术途径,对未来纳米级传感器和量子计算的发展也具有重要的意义。

3.3 低能离子注入用于二维材料掺杂改性

二维材料因其独特的物理特性,在光催化、电化学传感、超级电容等诸多领域具有重要应用价值^[16]。对于二维材料而言,元素掺杂是一种调控其性能的有效手段,通过元素掺杂可以打开石墨烯带隙,实现n型掺杂,并制备具有高功率密度、高循环稳定性的超级电容器^[17,18]。离子注入作为一种浓度可控、高效精准的元素掺杂技术,研究其在二维材料改性中的应用具有重要意义。

北京大学薛建明团队利用低能离子注入系统,通过15 keV的Ar离子轰击硅靶产生溅射硅离子,实现了硅掺杂石墨烯的制备^[19]。硅掺杂浓度可控地达到最高8.9 at%。拉曼光谱分析表明,掺杂过程对石墨烯造成的结构损伤(空位缺陷)保持在较低水平。在Si掺杂浓度达到8.9 at%时,掺杂石墨烯的功函数增加至4.46 eV,显示出明显的p型导电特性,这表明替代掺杂在掺杂石墨烯中占据主导地位。低能离子溅射靶材产生超低能离子掺杂二维材料的方法,也为可控且普适的石墨烯离子注入,以及二维材料的异质原子掺杂提供了新思路。

此外,我们与北京师范大学英敏菊团队合作,开展了通过低能离子注入方法在单层过渡金属二硫属化合物材料中诱导出强室温铁磁性的相关研究^[20]。该研究通过化学气相沉积(CVD)制备了高质量单层 MoS_2 ,并将1 keV的铜离子注入 MoS_2 中,成功在单层 MoS_2 中诱导出饱和磁化强度高达58 $\mu\text{B}/\text{Cu}$ (约 2148 emu/cm^3)的强室温铁磁性。此外,磁性对温度的依赖性较弱,这显然是缺陷诱导磁性的特征。这项工作通过实验和理论计算相结合的方式,证明了低能离子注入诱导的缺陷在单层 MoS_2 中实现高性能室温铁磁性方面的有效性,为二维材料在自旋电子学领域的应用提供了重要的研究基础。

3.4 低能离子注入在核材料辐照损伤研究中的应用

结构材料的性能和可靠性决定了核聚变反应堆等先进核能系统的发展。这些材料需要在极端条件下运行,包括高温、长期辐射和腐蚀环境等^[21],因此新型抗

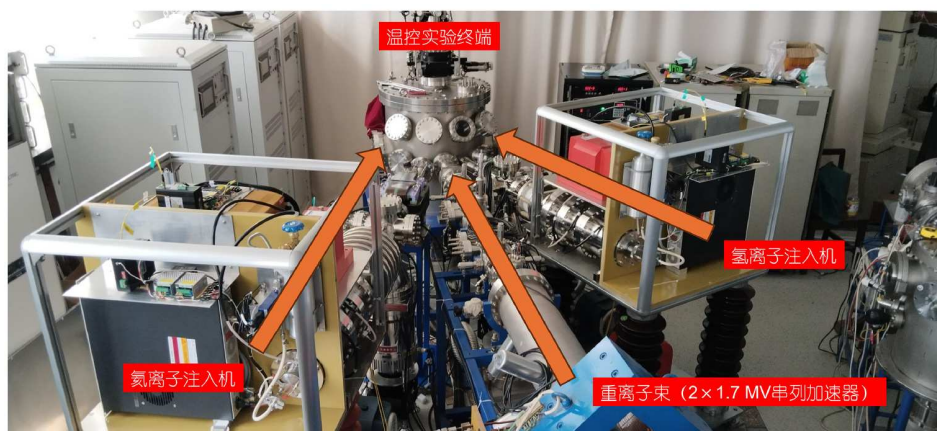


图4 北京大学三束离子辐照装置

Figure 4 Triple-beam irradiation facility at Peking University

辐射材料是核材料研究的关键重点。在这些材料的研究过程中，经常需要通过模拟反应堆实际运行下的辐照环境，来初步考核和评估新型材料的抗辐照性能^[22]。

在反应堆中，除了位移损伤导致的材料辐照损伤外，由中子嬗变引起的氢氦等气态原子也极大地影响了先进反应堆中材料的辐照行为，我们通常称之为协同效应^[23]，国内外通常利用多台加速器联机提供多束辐照的方法研究此类协同效应^[24]。

为了对核材料中的协同效应进行深入研究，我们通过低能离子注入系统与静电加速器以及多功能实验终端的结合，搭建了一套三离子束辐照装置(图4)。该装置包含来自2×1.7 MV串列加速器(NEC 5SDH-2)的一条重离子束流线，可以提供MeV能区的多种重离子，例如能量为6 MeV的 Ni^{3+} 、 Au^{3+} 、 I^{3+} 、 Si^{3+} ，注量率在 $3 \times 10^{10} \sim 3 \times 10^{12} \text{ ions cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ；一台50 kV氢离子注入机，可以提供能量10~50 keV的质子束流，注量率在 $3 \times 10^9 \sim 1 \times 10^{13} \text{ ions cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ；一台100 kV氮离子注入机，可以提供能量10~100 keV的氮离子束流，注量率在 $3 \times 10^9 \sim 9 \times 10^{13} \text{ ions cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ；一个具备-196~950℃变温样品台的辐照实验终端，该终端同时具备对三条束流进行测量以及样品等离子体清洗的功能。由于协同辐照实验中氢氦的浓度分布区域需要位于重离子辐照产

生的损伤平台区，低能离子注入系统提供的氢氦离子射程分布刚好可以满足这一要求。

北京大学王晨旭课题组使用该装置进行协同效应研究，在三束辐照下，观察到了增强的空穴成核和更明显的辐照硬化现象，表明氢氦协同损伤效应显著^[25]。

4 总结与展望

低能离子注入技术因其可以精准控制注入离子种类、离子能量、注入深度和注量等优点，在功能材料改性、先进器件制造、抗辐照材料等领域展现出了广阔的应用前景。低能离子注入设备可以通过优化部件设计并结合终端减速的方法，进一步减弱空间电荷效应对束流品质的影响。北京大学低能离子研究团队针对目前离子材料改性研究领域的需求，研制了可供实验研究和工艺探索使用的低能离子注入系统，其可提供100 eV~100 keV能区的多种离子束流，为二维材料、薄膜材料、量子器件和核材料等领域的研究提供了功能较为全面的实验研究平台，并与国内相关研究团队合作，在诸多领域开展了基于低能离子的材料改性研究工作。随着技术的不断进步和应用领域的不断拓展，低能量离子注入技术将在未来的科技发展中发挥更为重要的作用。

参考文献

- 1 Lécuyer C, Brock D C. From nuclear physics to semiconductor manufacturing: the making of ion Implantation. *Hist Technol*, 2009, 25: 193–217
- 2 Tsukamoto K, Kuroi T, Kawasaki Y, et al. Evolution of ion implantation technology and its contribution to semiconductor industry. *AIP Conf Proc*, 2011, 1321: 9–16

- 3 Townsend P D. Materials and Processes for Surface and Interface Engineering. Berlin: Springer, 1995. 285–306
- 4 Huang L, Wu H, Cai G, et al. Recent progress in the application of ion beam technology in the modification and fabrication of nanostructured energy materials. *ACS Nano*, 2024, 18: 2578–2610
- 5 He Z, Zhong Y, Luo Z, et al. Study on the effect of low-energy ion implantation on the optical properties of Nd-doped diamond color centers. *Carbon*, 2025, 243: 120578
- 6 Kim J, Her S, Kim D, et al. Stabilized Co single-atom catalyst via ion implantation for efficient hydrogen production. *Small*, 2025, 21: 2505383
- 7 Herklotz A, Roth R, Chong Z X, et al. Polarization rotation in a ferroelectric BaTiO₃ film through low-energy He-implantation. *APL Mater*, 2025, 13: 031105
- 8 Editorial Office of EPE. The technology status and development trend of ion implantation (in Chinese). Equip Electron Products Manuf, 2009, (10): 1–8 [电子工业专用设备编辑部. 离子注入技术现状与发展趋势. 电子工业专用设备, 2009, (10): 1–8]
- 9 Ungeheuer K, Marszalek K W, Mitura-Nowak M, et al. Influence of Cr ion implantation on physical properties of CuO thin films. *Int J Mol Sci*, 2022, 23: 4541
- 10 Kumar V, Prakash J, Pathak D, et al. Ion beam engineering of implanted ZnO thin films for solar cell and lighting applications. *Chem Eng J Adv*, 2023, 15: 100501
- 11 Cai X, Chen C, Xie L, et al. In-plane charged antiphase boundary and 180° domain wall in a ferroelectric film. *Nat Commun*, 2023, 14: 8174
- 12 Luo Y, Wang C, Chen C, et al. Tripling energy storage density through order–disorder transition induced polar nanoregions in PbZrO₃ thin films by ion implantation. *Appl Phys Rev*, 2023, 10: 011403
- 13 Xiang X, Rao J, He Z, et al. Tailoring resistive switching in epitaxial SrCoO_{2.5} films by irradiation induced uniaxial strain. *J Appl Phys*, 2022, 132: 035304
- 14 Mamin H J, Kim M, Sherwood M H, et al. Nanoscale nuclear magnetic resonance with a nitrogen-vacancy spin sensor. *Science*, 2013, 339: 557–560
- 15 Speranza G, Cian A, Correa B P, et al. Shallow nitrogen vacancy color centers in diamond by ion implantation. *Adv Quantum Tech*, 2025, 8: e2500080
- 16 Tan C, Cao X, Wu X J, et al. Recent advances in ultrathin two-dimensional nanomaterials. *Chem Rev*, 2017, 117: 6225–6331
- 17 Wei D, Liu Y, Wang Y, et al. Synthesis of N-doped graphene by chemical vapor deposition and its electrical properties. *Nano Lett*, 2009, 9: 1752–1758
- 18 Shruthi T K, Ilayaraja N, Jeyakumar D, et al. Functionalization of graphene with nitrogen using ethylenediaminetetraacetic acid and their electrochemical energy storage properties. *RSC Adv*, 2014, 4: 24248
- 19 Zhang Y, Wang Y, Gao Y, et al. Surface characterization of low energy Si ion implanted graphene. *Appl Surf Sci*, 2022, 576: 151816
- 20 Zhang M, Li Q, Cheng W, et al. Robust room-temperature ferromagnetism induced by defect engineering in monolayer MoS₂. *Appl Surf Sci*, 2023, 608: 155220
- 21 Zinkle S J, Busby J T. Structural materials for fission & fusion energy. *Mater Today*, 2009, 12: 12–19
- 22 Heidrich B, Pimblott S M, Was G S, et al. Roadmap for the application of ion beam technologies to the challenges of nuclear energy technologies. *Nucl Instruments Methods Phys Res Sect B-Beam Interact Mater Atoms*, 2019, 441: 41–45
- 23 Borodin O V, Bryk V V, Kalchenko A S, et al. Synergistic effects of helium and hydrogen on self-ion-induced swelling of austenitic 18Cr10NiTi stainless steel. *J Nucl Mater*, 2013, 442: S817–S820
- 24 Huang J, Liu H, Gao Z, et al. Helium-hydrogen synergistic effects in structural materials under fusion neutron irradiation. *Front Mater*, 2022, 9: 849115
- 25 Wang C, Chen Y, Gao Y, et al. Triple-beam irradiation facility for advanced nuclear materials research at Peking University. *Nucl Instruments Methods Phys Res Sect B-Beam Interact Mater Atoms*, 2025, 568: 165870

Summary for “低能离子注入技术及其在材料研究中的应用”

Low-energy ion implantation technology and its application in materials research

Yuan Gao^{*}, Dongpo Fu, Xiangjun Yang & Jianming Xue

State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

^{*} Corresponding author, E-mail: pkugaoyuan@pku.edu.cn

Ion implantation technology, as an indispensable and crucial leading technology in the field of integrated circuit manufacturing, has developed over several decades. This technology utilizes the interaction between energetic ions and the material surface to produce lattice displacements at the microscopic scale, thereby creating defects and achieving changes in the structure and properties of the material. In recent years, with the continuous miniaturization of devices and the development of new functional materials such as two-dimensional materials and thin-film materials, low-energy ion implantation technology with an energy of less than 100 keV has begun to attract attention. Its applications in semiconductor, materials science, biomedical, and energy fields are also continuously expanding. As an advanced shallow doping technology, low-energy ion implantation can precisely control the types, range, dosage, and depth distribution of implanted ions, and as a non-equilibrium process not limited by solubility, it is suitable for surface modification of various materials such as metals, semiconductors, and insulators.

The construction of low-energy ion implantation equipment is similar to that of conventional ion implantation machines, including an ion source, lenses, an analyzing magnet, a high-voltage platform, and an injection terminal. Since ions with lower energy (<100 keV) are more susceptible to the influence of space charge effects during transmission, which results in the divergence of the ion beam spot and a decrease in transmission efficiency, and affects the injection effect, low-energy ion implantation equipment usually adopts a more compact structure. For ultra-low energy ion beams (<5 keV), a method of first accelerating and then decelerating is required to ensure the transmission efficiency of the beam before implanting it into the sample.

The low-energy ion research team at Peking University has developed a compact low-energy ion implantation system, which can be used for ion implantation experiments related to shallow doping and surface modification of materials. This system can provide multiple types of ion beams, implantation energies, and implantation doses with precise control within the energy range of 100 eV–100 keV. It can provide ion beams of dozens of gaseous or solid elements such as hydrogen and helium, with adjustable accelerating voltage from 10 to 100 kV, achieving an implantation dose range of 10^{12} – 10^{17} ions/cm², an implantation area of 3 cm×3 cm, and is equipped with a temperature-controlled target platform, allowing for temperature control from room temperature to 950°C. The system has a compact structure, occupies less space, is simple to operate, and has good compatibility and scalability, making it highly suitable as a laboratory-level equipment platform for universities and other research institutions to research material doping and irradiation effects related to ion implantation. After its completion, it has been collaborated with domestic research teams to conduct material modification research based on low-energy ions in areas such as doping and modification of two-dimensional materials, perovskite-type thin-film materials, color center doping of quantum sensors, and the synergistic effect of irradiation damage in nuclear energy materials.

low-energy ions, ion implantation, material modification, irradiation effect

doi: [10.1360/CSB-2025-5400](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5400)