文章编号: 1007-4252(2025)06-0477-09 DOI: 10.20027/j.gncq.2025.0052 CSTR: 32180.14.j.gncq.2025.0052

电子束曝光剂量对 NbN 超导纳米线物性的影响

王小妮[1,2,3], 刘晓宇[1,2], 李明晨[1,2,3], 彭 炜[1,2,3], 牟 刚[1,2,3,*], 林志荣[1,2,3,*]

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 集成电路材料全国重点实验室, 上海 200050; 2. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海市超导集成电路技术重点实验室, 上海 200050; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 超导纳米线的可控制备是推动单光子探测器和量子相滑移器件等前沿应用的重要基础。作为实现纳米线图形化的核心技术, 电子束光刻过程中电子束与超薄超导薄膜之间的相互作用可能对薄膜的本征物性产生不可忽略的影响。针对电子束曝光剂量对 NbN 超导纳米线超导性能及方块电阻的调控规律开展了系统研究。结果表明: 随着曝光剂量的增加, NbN 纳米线的正常态方块电阻显著增大(最大增幅达 24%), 伴随着相滑移激活能的降低; 与此同时, 尽管 NbN 纳米线的超导临界温度基本保持稳定, 但其在极低温环境下对抗磁场的能力随曝光剂量的增加有所减弱。分析表明, 高剂量曝光会在纳米线中引入缺陷, 增强载流子散射, 从而提高电阻。研究不仅为高性能超导纳米线器件的可控制备确定了最佳工艺窗口, 也展示了电子束曝光作为一种潜在的局域化改性技术, 可用于片上调控超导薄膜的无序度, 为量子器件的设计与集成提供新的思路。

关键词: 超导纳米线; 电子束光刻技术; 量子相滑移效应; 方块电阻; 无序度

中图分类号: O511+.9 **文献标志码:** A

Influence of electron beam exposure dose on the properties of NbN superconducting nanowires

WANG Xiaoni[1,2,3], LIU Xiaoyu[1,2], LI Mingchen[1,2,3], PENG Wei[1,2,3], MU Gang[1,2,3,*], LIN Zhirong[1,2,3,*]

(1. State Key Laboratory of Materials for Integrated Circuits, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Superconductor Integrated Circuits Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

收稿日期: 2025−10−30; **修订日期:** 2025−11−18

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (No. XDA0520202).

作者简介: 王小妮(1996—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为量子相滑移器件(E-mail: wangxn@mail.sim.ac.cn).

通信作者: 牟 刚(1982—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为低维超导材料和物理(E-mail: mugang@mail.sim.ac.cn);
林志荣(1983—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为超导量子计算(E-mail: zrlin@mail.sim.ac.cn).

Abstract: The controllable fabrication of superconducting nanowires is the key foundation for the high-performance applications such as single-photon detectors and quantum phase slip devices. Electron beam lithography, as a key technique for nanoscale patterning, may have a non-ignorable impact on the intrinsic physical properties of ultrathin superconducting films due to the interactions between the electron beam and the material. This study systematically examines how the electron beam exposure dose influences the superconducting properties and sheet resistance of NbN nanowires. The results show that, as the exposure dose increases, the normal-state sheet resistance of NbN nanowires significantly increases (with a maximum increase of 24%), acompanied by the reduce of activation energy of the phase slip. Meanwhile, although the superconducting critical temperature remains largely unchanged, the nanowires' ability to withstand magnetic fields at ultra-low temperatures diminishes with the increase of exposure dose. Analysis indicates that high-dose exposure introduces structural defects into the film, enhancing carrier scattering and thereby increasing electrical resistance. These findings not only define an optimal process window for fabricating high-performance superconducting nanowires but also highlight the potential of electron beam exposure as a localized method for tuning disorder in on-chip superconducting films, opening new possibilities for quantum device engineering.

Key words: superconducting nanowire; electron beam lithography; quantum phase slip effect; sheet resistance; disorder level

0 引言

超导电子学器件在极高灵敏度探测、低功耗计算等领域具有重要的应用潜力[1-3]。其中，超导纳米线是单光子探测器、量子相滑移器件及超导二极管等前沿应用的材料基础[4-6]。基于超导纳米线的单光子探测器具有高探测效率、低暗计数和快速响应等优势，超导纳米线的几何形貌与超导物性参数直接决定着器件的性能[7-9]。值得注意的是，当纳米线的横向尺寸缩小至相干长度量级时，相位滑移效应会显著增强[10-13]。有研究指出[5]，准一维超导纳米线中的量子相滑移（quantum phase slip, QPS）效应与约瑟夫森效应存在对偶关系，在高精度量子电流基准方面展现出广阔前景，因而受到广泛关注[14-17]。

在上述应用中，高质量极细纳米线的加工技术至关重要。目前用于 QPS 器件制备的主流材料，如 NbN[16, 18-19]、TiN[20-21] 和 InO_x[22] 等超导薄膜，普遍存在相干长度较短的问题，这对纳米线加工精度提出了极高要求。以 NbN 薄膜为例[23]，为实现显著的 QPS 效应，通常需达到亚 10 nm 级的加工精度，同时要保证纳米线具有良好的边缘均匀性、精确的线宽以及可控的超导电学参数（如方块电阻等）[24-27]。电子束光刻利用德布罗意波长极短的电子束进行曝光，有效突破了光学衍射的极限，已成为高分辨率纳米级图形制备的关键技术[28]。该技术通过在抗蚀剂中定义图形，并经刻蚀工艺将图形转移至超导薄膜，从而实现纳米结构的制备。

在对超薄超导薄膜进行加工时，高能电子束在引发光刻胶化学反应的同时，部分能量会穿透光刻胶并作用于下方的功能薄膜中，可能影响薄膜的晶格状态，进而改变其物性。早期研究曾探索利用此类效应，例如通过扫描电子束对 $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 高温超导薄膜进行直接“刻蚀”[29]，导致其从超导态不可逆地转变为非超导态。该现象表明，具有较高不稳定性的薄膜材料可能对电子束辐照比较敏感。在 QPS 研究中广泛使用的高度无序超导薄膜（如 NbN）具有长程无序的晶体结构，这种结构上的不稳定性再加上仅为数纳米的极小厚度同样可能导致其在高能电子束辐照下发生物性变化。然而，截至目前，关于电子束光刻对这类高度无序超导薄膜物性影响的系统性量化研究仍较为匮乏。

本文聚焦这一问题开展了深入研究。为增强 QPS 效应，通常需将超导材料的临界转变温度 T_c 调控至较低水平[3]。因此，本文以 T_c 约为 3 K、厚度为 8 nm 的 NbN 超导薄膜为研究对象，重点探究电子束光刻中曝光剂量对所制备纳米线的形貌、

超导性能及方块电阻(R_s)的调控规律。通过系统的实验与机理分析, 本研究旨在为高性能超导纳米线器件的可控制备提供可靠的工艺基础, 并探讨利用电子束实现片上局域化改性以调控其无序度的可能性。

1　实验

1.1　电子束光刻原理与工艺

电子束光刻是一种利用聚焦电子束在电子敏感抗蚀剂上直写图形的微纳加工技术, 具备分辨率高、无需掩膜等优势[30], 其基本原理是: 经电子束曝光的抗蚀剂(即光刻胶)与未曝光区域在显影液中的溶解度(或化学反应速率)不同, 会在显影后形成特定图案。随后通过湿法或干法刻蚀工艺, 可将该图形精确转移至下层功能薄膜。

基于波粒二象性理论, 光刻过程中电子束的波长 λ_e 与加速电压 V 的关系为: $\lambda_e=1.226V^{-0.5}$, 即波长与加速电压的平方根成反比。因此, 采用较高的加速电压可获得更短的电子波长, 这是实现超光学极限的高分辨率光刻的基础。另一方面, 束流大小也对加工精度有着直接影响。在精细结构加工中, 为实现更高的极限分辨率, 通常需采用小束流以获得更小束斑。本研究采用日本电子公司的 JOEL-6300FS 型超高精度电子束曝光系统, 所用工作加速电压为 100 kV, 束流为 100 pA。在此条件下, 电子束波长约为 0.12 nm, 远低于深紫外光刻的光源波长, 为高分辨率图形化提供了可能。配合高分辨率电子束光刻胶, 该系统可实现线宽低至 6 nm 的独立纳米线结构。

本研究选用以氢倍半硅氧烷(hydrogen silsesquioxane, HSQ)为有效成分的负性电子束光刻胶。HSQ 在经电子束或 X 射线辐照后会转化为非晶态 SiO_2, 未曝光区域则在显影过程中与显影液发生反应并被去除。非晶态 SiO_2 具有很小的颗粒尺寸, 可在保持良好线条边缘粗糙度的同时实现更高分辨率(<10 nm), 且图形具备优异的机械稳定性和耐等离子体刻蚀性, 适合于制备高质量的极细纳米线[31-33]。此外, 固化后的 HSQ 在扫描电子显微镜观测中不易发生形变或荷电效应, 有利于对精细结构的形貌表征。

具体的 NbN 纳米线制备工艺流程如图 1 所示: (1)首先, 在 Si 衬底上沉积 8 nm 厚的 NbN 薄膜, 并采用剥离工艺制备 Ti/Au 电极; (2)随后, 旋涂质量分数为 0.2% 的 HSQ 光刻胶, 将其厚度控制在 45 nm 左右, 以降低极窄纳米线在显影与刻蚀过程中的倒塌风险; (3)经电子束曝光与显影后, 利用感应耦合等离子体(inductively coupled plasma, ICP)刻蚀技术将图形转移至 NbN 薄膜, 最终完成纳米线器件的制备。由于曝光后的 HSQ 转化为无机介质, 不仅不会干扰后续的电学测量, 还能保护 NbN 表面免受环境中氧气的影响, 因此本工艺选择在刻蚀后保留该介质层结构。

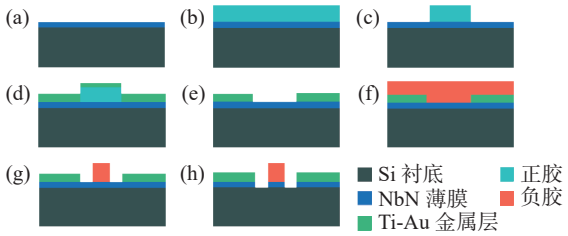

图 1　纳米线器件制备工艺流程。(a)在 Si 衬底上沉积 NbN 薄膜; (b)旋涂正性光刻胶 AZ703; (c)激光直写曝光电极图形; (d)蒸镀 Ti-Au 金属层; (e)经 Lift-off 工艺完成电极制备; (f)旋涂负性光刻胶 HSQ; (g)电子束曝光并显影纳米线图形; (h)通过 ICP 刻蚀 NbN 薄膜, 实现纳米线图形转移

Fig. 1 Fabrication process flow of the nanowire devices. (a) Deposition of an NbN thin film onto a silicon substrate; (b) spin-coating of the positive-tone photoresist AZ703; (c) direct laser writing to expose electrode patterns; (d) thermal evaporation of Ti-Au; (e) completion of electrode fabrication following the lift-off process; (f) spin-coating of the negative-tone electron-beam resist HSQ; (g) electron-beam lithography to define the nanowire structure, followed by development; (h) ICP etching of NbN to complete nanowire pattern transfer

1.2　纳米线形貌与线宽控制

合适的曝光剂量对于精确控制图形线宽至关重要。一般而言, 剂量过低会导致曝光不充分, 使图形尺寸显著小于设计值, 且边缘轮廓模糊; 而剂量过高则会引起光刻胶的过度曝光, 导致显影不彻底、图形边缘残留胶体, 严重劣化线条的粗糙度。此外, 电子束曝光剂量的选择还受到光刻胶类型、前烘与后烘温度、显影液种类与浓度以及显影温度等多种因素影响。

为制备出线宽接近目标值的纳米线, 本研究基于曝光剂量对线宽的调控规律, 在 800~6000 $\mu C\cdot cm^{-2}$ 范围内, 针对不同剂量采用相应的线宽设计值, 以制备出线宽约 150 nm、长度为 10 μm 的纳

米线，共制备 12 个纳米线样品。纳米线的设计线宽与实测线宽的对比结果如图 2 所示。可见，在曝光剂量较小时，线宽的实测值与设计值偏差较大，最高偏差超过 40 nm。

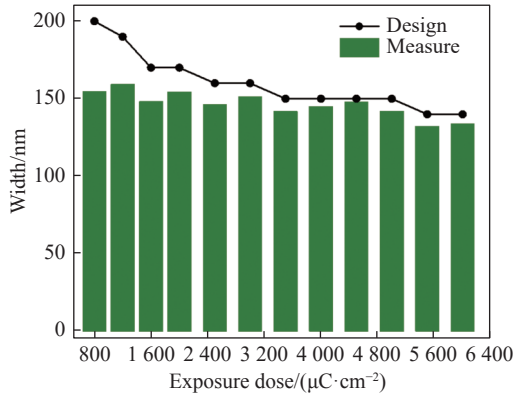

图 2 不同电子束曝光剂量下，纳米线线宽设计值与测量值的对比

Fig. 2 Comparison of designed and measured nanowire widths with different electron beam exposure doses

1.3 纳米线表征与测试

采用蔡司 Gemini300 扫描电子显微镜（scanning electron microscope, SEM）对各样品的表面形貌和线宽进行表征。电学测量使用标准四端子法，以消除接触电阻的影响。低温电输运测试在 Quantum Design 公司的综合物性测量系统（PPMS）中进行，测试过程中施加的电流为 5 nA。同时，利用 PPMS 配备的稀释制冷机模块对部分样品在 0.45~4.00 K 温区内的电阻-温度特性及 0.40 K 下的电流-电压（*I*-*V*）特性进行测量。

2 实验结果

2.1 曝光剂量对纳米线形貌的影响

不同曝光剂量下制备的 NbN 纳米线的 SEM 图如图 3 所示。结合图 2 与图 3 可知，当曝光剂量较低（如 800 μC·cm^{-2}）时，纳米线线宽收缩超过 40 nm，且边缘粗糙。该现象可归因于 HSQ 光刻胶曝光不足，向非晶 SiO_2 的转化不完全，导致残留的有机大分子结构在显影后形成缺陷，并于后续刻蚀过程中被转移至 NbN 纳米线上。可见，低剂量条件下的光刻胶胶体致密度较低，抗刻蚀能力减弱。而当曝光剂量过高（如 6 000 μC·cm^{-2}）时，纳米线边缘出现明显的白色亮点，这是过度曝光使少量残胶在 ICP 刻蚀中未被完全去除所致。

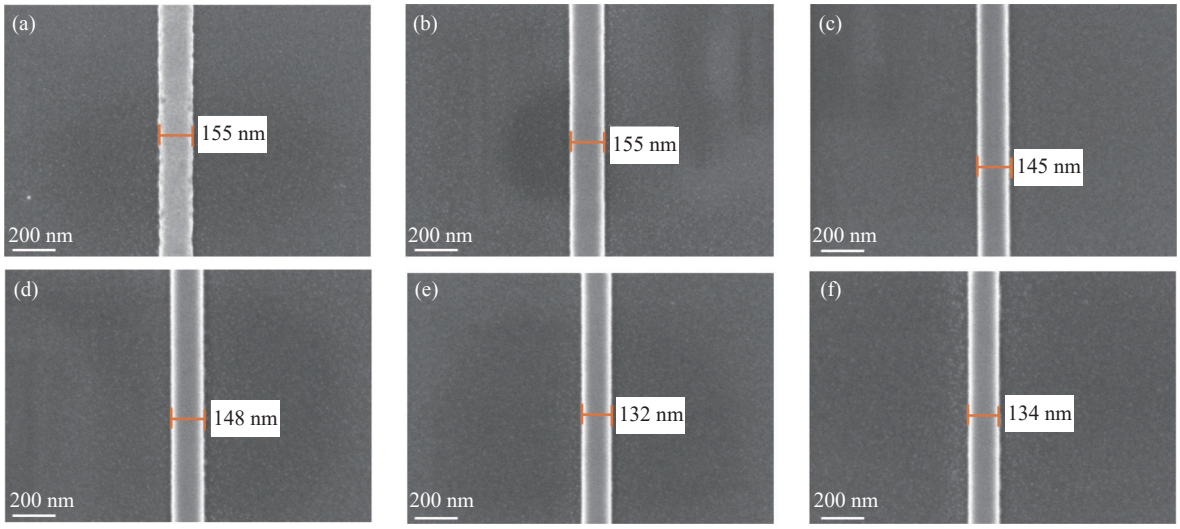

图 3 不同曝光剂量下所制备 NbN 纳米线的 SEM 图。（a）800 μC·cm^{-2}；（b）2 000 μC·cm^{-2}；（c）4 000 μC·cm^{-2}；（d）4 500 μC·cm^{-2}；（e）5 500 μC·cm^{-2}；（f）6 000 μC·cm^{-2}

Fig. 3 SEM images of the NbN nanowires fabricated with different exposure doses. (a) 800 μC·cm^{-2}; (b) 2 000 μC·cm^{-2}; (c) 4 000 μC·cm^{-2}; (d) 4 500 μC·cm^{-2}; (e) 5 500 μC·cm^{-2}; (f) 6 000 μC·cm^{-2}

2.2 曝光剂量对纳米线超导电性的影响

不同曝光剂量下制备的 NbN 纳米线的方块电阻-温度（R_s-T）曲线如图 4(a)、(b) 所示。可以看出，纳米线在正常态下的方块电阻呈现一定的分布。进一步分析表明，随着电子束曝光剂量的增加，纳米线的正常态方块电阻 R_{sn} 显著上升，如图 4(c) 所

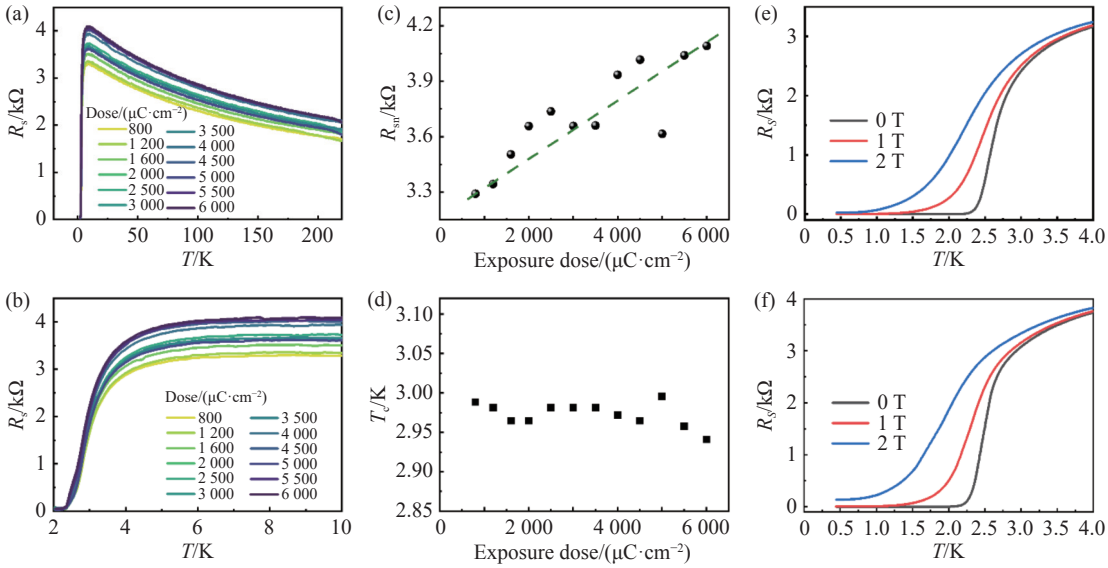

图 4　(a)不同曝光剂量下制备的 12 个纳米线样品的 R_s-T 曲线; (b)R_s-T 曲线在低温区的放大图; (c)所有纳米线样品在 10 K 温度下的正常态方块电阻; (d)纳米线临界转变温度 T_c 与曝光剂量的关系; 曝光剂量为(e)1 600 μC·cm^{-2} 和(f)6 000 μC·cm^{-2} 的样品在不同磁场下的 R_s-T 曲线

Fig. 4　(a) R_s-T curves of 12 nanowire samples fabricated using different exposure doses; (b) magnified view of the R_s-T curves in the low-temperature region; (c) sheet resistance of all nanowire samples in the normal state at 10 K; (d) relationship between critical transition temperature of nanowires and exposure dose; R_s-T curves under varying magnetic fields for samples with exposure doses of (e) 1 600 μC·cm^{-2} and (f) 6 000 μC·cm^{-2}

示。这里, R_{sn} 定义为纳米线在 10 K 时的方块电阻。当曝光剂量从 800 μC·cm^{-2} 增加至 6 000 μC·cm^{-2} 时, R_{sn} 由 3.29 kΩ 升至 4.09 kΩ, 增幅约为 24%。相比之下, 超导临界温度 T_c 在此剂量范围内的变化较小, 最大波动幅度仅为 1.8%, 如图 4(d) 所示。T_c 定义为电阻下降至正常态电阻值的 50% 时所对应的温度。

值得注意的是, 低温下的正常态(方块)电阻反映了样品中杂质或缺陷引起的无序所导致的电子散射程度, R_{sn} 越大, 表明无序度越高。通常情况下, 此类无序会通过削弱电子库伦屏蔽效应或增强电子局域化来抑制薄膜的超导电性[34–35]。因此, 在超导薄膜中, 临界转变温度通常与正常态电阻率呈负相关的关系(电阻率与本文所用方块电阻反映的趋势一致)[23]。从这一角度而言, 图 4(c)、(d) 中观察到的现象较为反常。该结果表明, 在特定机制下, 高曝光剂量虽增强了无序度并提高了正常态方块电阻, 却未显著影响其超导电性。有一点值得注意的是, 此处 T_c 值的确定是基于正常态电阻下降一半所对应的温度, 实质上反映的是平均场临界温度。而在纳米线样品中, 起主导作用的是相滑移效应。从本文后面的数据可以看到, 曝光剂量对相滑移效应相关的输运特征还是有着显著影响的。

为进一步探究曝光剂量对纳米线性能的调控作用, 对其在磁场下的电阻行为进行了研究, 结果如图 4(e)、(f) 所示。可以看出, 在低磁场(0 T 和 1 T)条件下, 曝光剂量为 1 600 μC·cm^{-2} 和 6 000 μC·cm^{-2} 样品的 R_s-T 曲线演化趋势基本一致, 再次表明了曝光剂量对纳米线的超导行为影响不显著。然而, 当磁场强度增加至 2 T 时, 两者表现出显著差异: 曝光剂量为 6 000 μC·cm^{-2} 的样品在约 0.5 K 时已明显偏离零电阻态, 而 1 600 μC·cm^{-2} 样品仍基本维持零电阻状态。这表明在较高曝光剂量下, 尽管纳米线的 T_c 保持稳定, 但在极低温条件下对外加磁场的耐受能力有所下降。

2.3　曝光剂量对热激活相滑移行为的影响

在准一维超导纳米线中, 由于涨落效应增强, 可能发生相滑移现象。当纳米线的横截面尺度接近其相干长度时, 会出现由量子涨落驱动的量子相滑移效应[27, 36-38]。本文研究的纳米线线宽约为 150 nm, 在此尺度下量子相滑移效应较弱, 热激活相滑移

(thermally activated phase slip, TAPS)在超导转变过程中占主导地位[39-42]。TAPS 的存在使得超导转变附近的电阻-温度(R-T)曲线偏离适用于大尺寸超导体的平均场理论,在对数坐标的 R-T 曲线上表现为明显的展宽特征。

两个曝光剂量(1 600 μC·cm^{-2} 和 6 000 μC·cm^{-2})的样品在低至 0.45 K 温度下的 R-T 曲线如图 5(a)所示,其中纵坐标采用对数刻度。可以看出,曝光样品剂量较大的超导转变宽度更宽,表明较高的曝光剂量增加了纳米线样品中 TAPS 效应的发生概率。TAPS 过程占主导的体系中,R-T 曲线可以用 Langer-Ambegaokar-McCumber-Halperin(LAMH) 模型[43-44]进行拟合:

$$R_{\mathrm{LAMH}}=\frac{\pi\hbar^2\Omega}{2e^2k_{\mathrm{B}}T}\exp(-\Delta F/k_{\mathrm{B}}T) \tag{1}$$

$$R^{-1}=R_{\mathrm{LAMH}}^{-1}+R_N^{-1} \tag{2}$$

式中,k_{B} 为玻尔兹曼常数,e 为单个电子的电荷,$\hbar$ 为普朗克常数,Ω 为相滑移尝试频率,ΔF 为 TAPS 的激活能。R、R_{LAMH} 和 R_{N} 分别为总电阻、基于 LAMH 模型的 TAPS 电阻和正常态电阻。拟合结果表明,LAMH 理论能够较好地描述 2 K 以上的电阻转变行为;在更低温度下,实验数据与拟合曲线的偏离可能源于量子相滑移效应的影响。基于拟合所得参数,曝光剂量为 1 600 μC·cm^{-2} 和 6 000 μC·cm^{-2} 样品的相滑移激活能 ΔF 分别为 13.9 meV 和 12.4 meV,表明更高的曝光剂量有助于降低相滑移激活能。

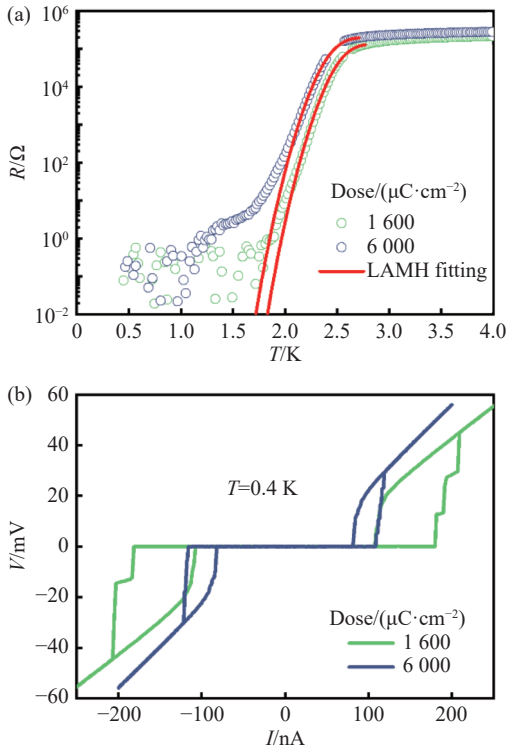

图 5 (a) 曝光剂量为 1 600 μC·cm^{-2} 和 6 000 μC·cm^{-2} 纳米线的 R-T 曲线及 LAMH 拟合结果;(b) 0.4 K 下测得的 I-V 曲线

Fig. 5 (a) R-T curves of nanowire samples fabricated with exposure doses of 1 600 μC·cm^{-2} and 6 000 μC·cm^{-2}, along with fitting curves derived from the LAMH model; (b) corresponding I-V curves measured at 0.4 K

此外,对上述两种曝光剂量的纳米线在更低温(0.4 K)下进行了 I-V 特性测量,结果如图 5(b) 所示。可以看出,低曝光剂量样品表现出更高的超导开关电流(I_{sw})与回滞电流(I_{r}),而高剂量样品则具有更低的 I_{sw} 与 I_{r},且回滞区间显著缩小。这一变化趋势与相同曝光条件下纳米线宽度减小导致的相滑移效应增强现象一致[39]。这说明高曝光剂量增加了纳米线中的无序度,降低了超导态的稳定性,因而增强了 TAPS 效应。

需要指出的是,图 5(b) 中的 I-V 曲线为 10 次重复扫描后的平均结果。在低曝光剂量下制备的纳米线中,开关电流处出现多台阶特征,这源于单个 TAPS 事件的固有随机性[13, 39, 45]——从超导态向正常态跃迁的开关电流值具有随机性,因此平均后的 I-V 曲线呈多台阶结构。而在高剂量样品中,该现象消失,I-V 曲线表现为单一跳变点。这表明随着无序度的增加,纳米线中可能形成大量相位滑移中心,其开关行为由多个相滑移事件的协同作用主导,个体随机涨落被系统整体平均化。因此,该演化过程实质上反映了从单个随机相滑移事件主导向多事件集体行为转变的物理机制。

2.4 重复性验证与随时间的演化行为

为验证实验结果的可靠性,对同一硅片上不同位置的多根纳米线样品进行了重复性测量,其 R_{s}-T 曲线如图 6(a) 所示。结果显示,在相同剂量下制备的纳米线的 R_{s}-T 曲线之间仅存在微小偏差。以曝光剂量为 800 μC·cm^{-2} 的样品为例,两条曲线在 10 K 时的方块电阻 R_{sn} 相对偏差约为 2.3%。这表明电子束曝光剂量对纳米线方块电阻的调控具有可重复性,并非偶然现象。同时,该结果也说明,本研究所采用的 8 nm 厚 NbN 超薄薄膜具有优异的片上均匀性,且电子束曝光系统在 100 kV 工作电压下

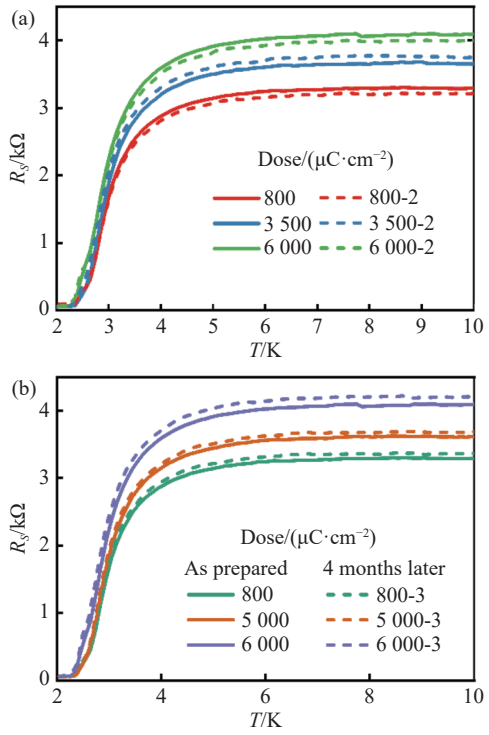

图 6　(a)同一硅片上不同位置纳米线样品的 R_s-T 曲线对比; (b)样品放置 4 个月后的 R_s-T 数据与初始制备状态的对比

Fig. 6 (a) Comparison of R_s-T curves for nanowire samples fabricated at different positions on the same silicon wafer; (b) comparison of R_s-T data between samples after four months of storage and the as-prepared samples

具备良好的稳定性。

另外, 为检验电子束曝光对纳米线性能调控的长期稳定性, 选取 3 种不同曝光剂量的样品, 在制备后于空气中放置 4 个月, 再次进行低温电阻测量, 并与初始数据进行对比, 结果如图 6(b) 所示。可以看出, 存放 4 个月后样品的正常态电阻略有上升, 增幅约为 2.5%(以曝光剂量为 6000 μC·cm^{-2} 的样品为例), 该变化明显小于曝光剂量从 5000 μC·cm^{-2} 增至 6000 μC·cm^{-2} 所引起的电阻差异。这表明, 纳米线本身以及电子束曝光引入的调控效应均具有较高的时间稳定性。正常态电阻的轻微升高可能源于空气中纳米线边缘的轻微氧化或表面退化。

3　讨论

上述结果说明, 通过精确调控电子束曝光剂量, 可在同一芯片上制备出几何尺寸相同但方块电阻不同的高质量纳米线, 这为系统研究纳米线中的量子相滑移效应提供了一条可行的技术路径。其内在原因在于, 较大的曝光剂量意味着更多电荷在光刻胶表面累积, 从而加剧“邻近效应”[46–47], 即电子在光刻胶和衬底中的散射导致非目标区域接收到额外能量沉积。这种非局域曝光会使整个纳米线区域受到较均匀的辐照, 进而提升了薄膜整体的无序度。

基于上述结果, 在制备高性能 NbN 超导纳米线时, 可确定一个最佳曝光窗口。该窗口的下限由图形能否清晰转移所决定, 上限则受限于可接受的无序度增长程度。具体而言, 若希望避免电子束曝光对超导物性造成显著影响, 可在保证图形完整性的前提下, 将曝光剂量控制在 1200~3000 μC·cm^{-2} 的较低剂量区间; 若旨在主动利用电子束调控薄膜无序度, 则可采用 3000~6000 μC·cm^{-2} 的高剂量区间。在此过程中, 需综合考虑高剂量对实际线宽及边缘形貌的影响, 对设计参数进行适当的修正。

值得注意的是, 在图 4(c) 中, 当曝光剂量达到 5000 μC·cm^{-2} 时, 方块电阻出现异常下降, 同时 T_c 略有上升。重复实验验证了该现象的可重现性。初步推测这可能是由于在特定剂量下, 适中的能量沉积诱发了局部缺陷退火或有序化过程。当能量累积至该阈值时, 电子束可能促使薄膜中不稳定的非晶区或晶格畸变发生结构弛豫, 原子排列趋于有序, 从而减少了电子散射中心。这一推断有待后续通过高分辨率的表征手段进行进一步的验证。

更重要的是, 本研究揭示了电子束光刻技术超越传统图形化功能的新潜力。可主动利用高剂量曝光对超导性的抑制效应, 将其发展为一种局域化的“电子束辐照改性”技术。例如, 在制备量子相滑移器件时, 可通过在芯片特定区域施加高的曝光剂量, 从而在同一衬底上制备出具有不同无序度的纳米线, 并可用于研究量子相滑移与无序度之间的依赖关系。这一策略为基于量子相滑移效应的量子计量芯片及超导量子比特的设计提供了更高的灵活性与新的调控自由度。

4　结论

本文系统研究了 NbN 纳米线制备过程中电子束曝光剂量对其形貌与超导性能的影响。结果表明: 过低的曝光剂量会导致纳米线边缘粗糙度增加; 正常态方块电阻和热激活相滑移效应均随曝光剂量的升高而增强, 而超导临界温度基本保持不变。

同时，本研究证实电子束光刻可在精确定义纳米线结构的同时有效调控 NbN 薄膜的无序度，这对于量子相滑移效应的相关研究具有重要意义。未来工作将进一步系统研究加速电压与束流强度对薄膜无序度的影响，以实现在更大范围内对超导薄膜物性的精准调控。

数据可用性声明

本论文的关联数据可在科学数据银行（ScienceDB）数据库中访问、获取（https://doi.org/10.57760/sciencedb.j00273.00001）。

参考文献：

[1] KRYLOV G, FRIEDMAN E G. Physics and devices of superconductive electronics[M]//Single flux quantum integrated circuit design. Cham: Springer International Publishing, 2022: 15-38.

[2] 李春光, 王佳, 吴云, 等. 中国超导电子学研究及应用进展 [J]. 物理学报, 2021, 70(1): 184-209.

[3] CLARKE J, BRAGINSKI A I. The SQUID handbook: Fundamentals and technology of SQUIDs and SQUID systems[M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004.

[4] 陈敬学, 李浩. 高速超导纳米线单光子探测器研究进展 [J]. 功能材料与器件学报, 2025, 31(1): 1-10.

[5] MOOIJ J E, NAZAROV Y V. Superconducting nanowires as quantum phase-slip junctions[J]. Nature Physics, 2006, 2(3): 169-172.

[6] ZHANG X, HUAN Q, MA R, et al. Superconducting diode effect in a constricted nanowire[J]. Advanced Quantum Technologies, 2024, 7(9): 2300378.

[7] GUO S, CHEN Q, PAN D, et al. Fabrication of superconducting niobium nitride nanowire with high aspect ratio for X-ray photon detection[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 9057.

[8] XU G Z, ZHANG W J, YOU L X, et al. Millimeter-scale active area superconducting microstrip single-photon detector fabricated by ultraviolet photolithography[J]. Optics Express, 2023, 31(10): 16348-16360.

[9] ZHANG L, YOU L X, LIU D K, et al. Characterization of superconducting nanowire single-photon detector with artificial constrictions[J]. AIP Advances, 2014, 4(6): 067114.

[10] LARKIN A, VARLAMOV A. Theory of fluctuations in superconductors[M]. Oxford: Clarendon Press, 2005.

[11] ALTOMARE F, CHANG A M. One-dimensional superconductivity in nanowires[M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013.

[12] ARUTYUNOV K Y, GOLUBEV D S, ZAIKIN A D. Superconductivity in one dimension[J]. Physics Reports, 2008, 464(1/2): 1-70.

[13] BEZRYADIN A. Superconductivity in nanowires: Fabrication and quantum transport[M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013.

[14] DI MARCO A, HEKKING F W J, RASTELLI G. Quantum phase-slip junction under microwave irradiation[J]. Physical Review B, 2015, 91(18): 184512.

[15] KATAOKA M. Nanowire device slips ahead in current race[J]. Nature, 2022, 608: 40-41.

[16] SHAIKHAIDAROV R S, KIM K H, DUNSTAN J W, et al. Quantized current steps due to the a. c. coherent quantum phase-slip effect[J]. Nature, 2022, 608(7921): 45-49.

[17] WANG Z M, LEHTINEN J S, ARUTYUNOV K Y. Towards quantum phase slip based standard of electric current[J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(24): 242601.

[18] PELTONEN J T, ASTAFIEV O V, KORNEEVA Y P, et al. Coherent flux tunneling through NbN nanowires[J]. Physical Review B, 2013, 88(22): 220506.

[19] PELTONEN J T, PENG Z H, KORNEEVA Y P, et al. Coherent dynamics and decoherence in a superconducting weak link[J]. Physical Review B, 2016, 94(18): 180508.

[20] PURMESSUR C, CHOW K, VAN HECK B, et al. Operation of a high-frequency, phase-slip qubit[EB/OL]. (2025-02-10). https://arxiv.org/abs/2502.07043.

[21] HÖNIGL-DECRINIS T, ANTONOV I, SHAIKHAIDAROV R, et al. Capacitive coupling of coherent quantum phase slip qubits to a resonator[J]. New Journal of Physics, 2023, 25(11): 113020.

[22] ASTAFIEV O V, IOFFE L B, KAFANOV S, et al. Coherent quantum phase slip[J]. Nature, 2012, 484(7394): 355-358.

[23] WANG X, WANG L, LIU Y, et al. Investigation of the Pauli paramagnetic effect in systematically tuned NbN thin films[J]. Physica C: Superconductivity and Its Applications, 2023, 606: 1354223.

[24] VANEVIĆ M, NAZAROV Y V. Quantum phase slips in superconducting wires with weak inhomogeneities[J]. Physical Review Letters, 2012, 108(18): 187002.

[25] ARUTYUNOV K Y, RAMOS-ÁLVAREZ A, SEMENOV A

V, et al. Superconductivity in highly disordered NbN nanowires[J]. Nanotechnology, 2016, 27(47): 47LT02.

[26] ZHAO W, LIU X, CHAN M H W. Quantum phase slips in 6 mm long niobium nanowire[J]. Nano Letters, 2016, 16(2): 1173-1178.

[27] CONSTANTINO N G N, ANWAR M S, KENNEDY O W, et al. Emergence of quantum phase-slip behaviour in superconducting NbN nanowires: DC electrical transport and fabrication technologies[J]. Nanomaterials, 2018, 8(6): 442.

[28] PAIN L, TEDESCO S, CONSTANCIAS C. Direct write lithography: The global solution for R&D and manufacturing[J]. Comptes Rendus Physique, 2006, 7(8): 910-923.

[29] 林世昌, 张燕生, 柴璋, 等. 电子束刻蚀超导膜的实验研究[J]. 电子科学学刊, 1995, 17(5): 553-556.

[30] CHANG T H P, THOMSON M G R, KRATSCHMER E, et al. Electron-beam microcolumns for lithography and related applications[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 1996, 14(6): 3774-3781.

[31] BONAM R, VERHAGEN P, MUNDER A, et al. Performance characterization of negative resists for sub-10-nm electron beam lithography[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2010, 28(6): C6C34-C6C40.

[32] GRIGORESCU A E, HAGEN C W. Resists for sub-20-nm electron beam lithography with a focus on HSQ: State of the art[J]. Nanotechnology, 2009, 20(29): 292001.

[33] NAMATSU H, TAKAHASHI Y, YAMAZAKI K, et al. Three-dimensional siloxane resist for the formation of nanopatterns with minimum linewidth fluctuations[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 1998, 16(1): 69-76.

[34] ANDERSON P W, MUTTALIB K A, RAMAKRISHNAN T V. Theory of the "universal" degradation of T_c in high-temperature superconductors[J]. Physical Review B, 1983, 28(1): 117-120.

[35] LIU Y, LIU Y, XU Z, et al. From weak to strong-coupling superconductivity tuned by substrate in TiN films[J]. Superconductor Science and Technology, 2024, 37(10): 105015.

[36] MOOIJ J E, SCHÖN G, SHNIRMAN A, et al. Superconductor-insulator transition in nanowires and nanowire arrays[J]. New Journal of Physics, 2015, 17(3): 033006.

[37] GOLUBEV D S, ZAIKIN A D. Quantum tunneling of the order parameter in superconducting nanowires[J]. Physical Review B, 2001, 64: 014504.

[38] BEZRYADIN A. Quantum suppression of superconductivity in nanowires[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2008, 20(4): 043202.

[39] WANG X, XU Z, LIU X, et al. Evolution of phase slips with wire width and observation of critical-voltage feature without high-impedance environment in NbN nanowires[J]. Superconductor Science and Technology, 2024, 37(4): 045001.

[40] BEZRYADIN A, LAU C N, TINKHAM M. Quantum suppression of superconductivity in ultrathin nanowires[J]. Nature, 2000, 404(6781): 971-974.

[41] LAU C N, MARKOVIC N, BOCKRATH M, et al. Quantum phase slips in superconducting nanowires[J]. Physical Review Letters, 2001, 87(21): 217003.

[42] GOLUBEV D S, ZAIKIN A D. Thermally activated phase slips in superconducting nanowires[J]. Physical Review B, 2008, 78(14): 144502.

[43] LANGER J S, AMBEGAOKAR V. Intrinsic resistive transition in narrow superconducting channels[J]. Physical Review, 1967, 164(2): 498-510.

[44] MCCUMBER D E, HALPERIN B I. Time scale of intrinsic resistive fluctuations in thin superconducting wires[J]. Physical Review B, 1970, 1(3): 1054-1070.

[45] SAHU M, BAE M H, ROGACHEV A, et al. Individual topological tunnelling events of a quantum field probed through their macroscopic consequences[J]. Nature Physics, 2009, 5(7): 503-508.

[46] CHANG T H P. Proximity effect in electron-beam lithography[J]. Journal of Vacuum Science & Technology, 1975, 12(6): 1271-1275.

[47] YOUNGMAN C I, WITTELS N D. Proximity effect correction in vector-scan electron-beam lithography[C]// Proceedings of the Developments in Semiconductor Microlithography III. Bellingham: SPIE, 1978: 54-58.