文章编号: 1007-4252(2025)06-0486-08 DOI: 10.20027/j.gncq.2025.0040 CSTR: 32180.14.j.gncq.2025.0040

高质量 NbTiN 超导薄膜制备工艺改进与性能表征

陈 颖, 郑晓晴, 周 慧, 陈敬学, 马 淼, 李 浩, 张孝富*, 尤立星
(中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

摘要: NbTiN 薄膜因具有低电阻率、高临界温度、高临界电流密度以及高临界磁场等优异的超导电子学性能, 被广泛应用于各类超导电子器件和量子混合电路中。然而, 传统共溅射过程中的靶中毒现象阻碍了高质量 NbTiN 薄膜的稳定制备, 且薄膜沉积速率受限。为解决这一问题, 并提升沉积速率与均匀性, 对溅射气体与反应气体的导入方式进行了改进: 将氩气(Ar)单独导入靶材附近, 而氮气(N_2)则直接通入衬底材料附近。改进后的 NbTiN 沉积工艺显著提高了低气压下等离子体的稳定性, 并能够在不同衬底上制备出具有优良超导电性的 NbTiN 薄膜。

关键词: 超导薄膜; NbTiN; 磁控溅射; 靶中毒
中图分类号: TB333 **文献标志码:** A

Improvement of fabrication process and property characterization of high-quality NbTiN thin films

CHEN Ying, ZHENG Xiaoqing, ZHOU Hui, CHEN Jingxue, MA Miao,
LI Hao, ZHANG Xiaofu*, YOU Lixing
(Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: NbTiN thin films have gained widespread application in superconducting electronics and quantum hybrid circuits owing to their superior superconducting characteristics, such as low resistivity, high critical temperature, high critical current density, and high critical magnetic field. Nevertheless, the target poisoning effect in conventional co-sputtering methods poses significant challenges to the stable fabrication of high-quality NbTiN films, while also restricting the deposition rate. To mitigate this problem and enhance both the deposition rate and film quality, this study introduced a modification in the delivery of sputtering and reactive gases. Specifically, argon gas was directed toward the niobium and titanium targets, while nitrogen gas was exclusively supplied to the substrates. By employing this

收稿日期: 2025−06−09; **修订日期:** 2025−06−30
基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 62301543); 科技创新 2030“量子通信与量子计算机”资助项目(No. 2023ZD0300100).
作者简介: 陈 颖(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为超导纳米线单光子探测器(E-mail: yingchen@mail.sim.ac.cn).
通信作者: 张孝富(1988—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为超导薄膜材料与物理以及新型超导量子器件 (E-mail: zhangxf@mail.sim.ac.cn).

modified NbTiN deposition technique, plasma stability was improved at relatively low pressures, enabling the preparation of high-quality NbTiN films on various substrates.

Key words: superconducting thin film;　NbTiN;　magnetron sputtering;　target poisoning

0　引言

NbN 和 NbTiN 作为常用的氮化物超导材料，长期以来备受关注。凭借其低电阻率(ρ_n)、高临界温度(T_c)、高临界电流密度(J_c)、高临界磁场(B_{c2})等特性，这些材料被广泛应用于超导纳米线单光子探测器(superconducting nanowire single-photon detector, SNSPD)[1-5]、超导谐振腔[6-8]、热电子辐射热计[9-10]和超导-绝缘-超导(superconductor-insulator-superconductor, SIS)混频器[11-12]等超导器件中。随着各类应用对器件性能需求的持续提升，对高质量超导薄膜的制备要求也日益严苛。

NbN 薄膜的超导性能与其化学组分和结晶度密切相关，而这两个因素会因衬底类型的变化而发生改变，使得在不同衬底上制备高质量 NbN 薄膜变得十分困难[13-14]。相比之下，NbTiN 薄膜的超导性能对结晶度的依赖性较低[13]，且 Ti 元素的引入可有效削弱衬底晶格失配对薄膜的影响，不仅更易制备出高 T_c 样品[15-16]，而且对衬底的兼容性也更强[17-18]。在薄膜制备过程中，Ti 元素能够捕获 N 原子并减少晶格空位，因此 NbTiN 薄膜的电阻率显著低于 NbN 薄膜[18]，可用于制备动态电感更小、恢复时间更短的 SNSPD[19]等器件。此外，研究表明，NbTiN 薄膜的超导参数具有更高的均匀性，这种均匀性可抑制由晶界或缺陷引发的局域非平衡超导涨落，进而有效避免 SNSPD 中某些区域在低于材料整体 J_c 理论值的偏置电流下提前进入正常态而产生的暗计数。因此，NbTiN 薄膜可用于制备暗计数更低的 SNSPD[20]。基于上述优势，NbTiN 材料在超导电子学领域展现出广阔的应用前景和重要的研究价值。

磁控反应溅射沉积是目前制备 NbTiN 薄膜的常用工艺。已有研究表明，采用该工艺可在常温下制备出具有较高 T_c 的 δ 相 NbTiN 薄膜[21]。然而，由于 NbTiN 薄膜对不同衬底的晶格匹配程度不同，在常规磁控反应溅射技术中，难以基于相同工艺参数在不同衬底上制备出性能优良且一致性高的薄膜，高质量的 NbTiN 薄膜通常只能沉积在 MgO 等晶格失配度较低的衬底材料上[21-22]。在任意晶格结构的平整材料表面沉积高质量 NbTiN 薄膜，成为研制极低温超导传输线以及开发高灵敏度天线、谐振器、滤波器、延迟线等器件的关键。此外，由于传统反应溅射过程中难以避免反应气体与靶材表面的接触，往往会出现靶中毒现象(即靶材表面成分发生变化)。这不仅会降低薄膜沉积速率，还会影响薄膜的均匀性，导致难以稳定制备性能优良的薄膜[23-24]。

为此，本文提出了一种可避免共溅射沉积薄膜过程中靶中毒问题的方法。研究结果表明，该方法不仅能有效提升磁控溅射在不同衬底上制备薄膜的稳定性，还可保持薄膜优良的超导性能。

1　实验部分

1.1　实验装置改进

如图 1(a)所示，在使用磁控反应溅射设备制备 NbTiN 薄膜时，常规工艺过程为通过进气孔通入 Ar/N_2 混合气体。该混合气体在电场作用下与加速电子发生碰撞，电离产生大量 Ar 离子、N 离子和二次电子。离子在电场作用下加速轰击靶材，溅射出中性靶材原子，这些原子与 N 原子结合形成氮化物并沉积于衬底材料表面形成薄膜。在此过程中，大量二次电子被磁场束缚于靶材表面，在环形磁场和电场的共同作用下沿靶面做圆周运动，进一步电离出大量 Ar 离子轰击靶材，从而提高了薄膜沉积速率。

然而，在常规工艺中，N_2 会直接接触靶材表面，并在 Ar 离子轰击和靶材温度升高的共同作用下与靶材发生化学反应，从而在靶面形成一层氮化物。理想情况下，这层氮化物会受到离子轰击而被剥离，暴露出靶材表面，进而再次形成氮化物，这一过程依次循环往复。然而，当反应气体通入量过大时，氮化物的生成速率大于其剥离速率，靶中毒现象将逐渐加剧，不仅导致溅射效率降低，影响薄膜组分，还会抑制 NbTiN 薄膜的超导电性能并降低其均匀性。

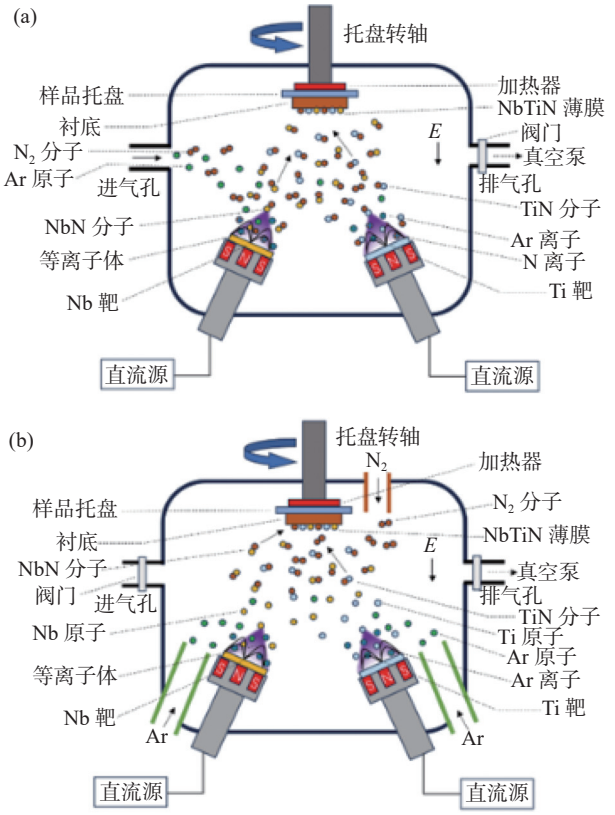

图 1 (a)常规的反应溅射过程示意图;(b)本研究改进后的反应溅射过程示意图

Fig. 1 (a) Schematic diagram of the conventional reactive sputtering process; (b) schematic diagram of the improved reactive sputtering process in this research

为应对靶中毒现象带来的不利影响,已有研究提出可在低 N_2 分压下提高衬底和靶材面积比,以快速制备符合化学计量比的薄膜[23, 25]。其他常见抑制靶中毒现象的方法包括精确控制反应气体流量、采用抗中毒能力更强的合金靶材、延长预溅射时间以及提高预溅射功率以提升清洗效率等。然而,这些方法或进一步提高了工艺要求,或需要开腔换靶,从而延长工艺时间,降低了实际应用中的便利性,且均未从根本上解决靶中毒问题。

本研究通过改变溅射气体与反应气体的导入方式来实现对靶中毒现象的有效控制。如图 1(b)所示,在薄膜沉积过程中,不再通入 Ar/N_2 混合气体,而是将 Ar 气和 N_2 分别通向靶材和衬底表面。通向靶材附近的 Ar 气用于电离后轰击靶材以得到靶材原子,通向衬底附近的 N_2 则用于与靠近衬底的靶材原子发生反应以形成 TiN 与 NbN,并最终沉积于衬底上,形成 NbTiN 固溶体薄膜。由于 N_2 源远离靶材区域,靶材表面不再生成大量的氮化物,从而有效避免了靶中毒现象的发生。

这一改进措施仅需调整设备的气体通路,无需对设备进行复杂调整,且对避免靶中毒现象、提升工艺稳定性表现出显著效果。此外,由于仅将 Ar 气通入靶材附近,增强了靶枪附近等离子体的稳定性,使得在更低气压下即可起辉并保持稳定的等离子体,有助于进一步提高 NbTiN 超导薄膜材料的临界温度和临界电流密度。同时,由于靶材表面附近 N 离子浓度大幅降低,NbTiN 薄膜的沉积速率被提高到常规沉积工艺的 2 倍以上。

1.2 薄膜制备工艺与表征

结合改进后的工艺,本实验采用日本爱发科公司生产的 MPS-6000 型超高真空磁控溅射设备,在单晶 Si 衬底 (100)、低压化学气相沉积法制备的 SiO_2/Si 衬底、商用显微镜玻璃载玻片(glass)、3 种取向的 MgO 衬底((100)、(110) 和 (111))及聚酰亚胺(polyimide, PI)衬底上同时制备 NbTiN 薄膜。工艺参数设置如下:Nb 靶和 Ti 靶的功率分别为 125 W 和 100 W,氩气和氮气流速分别为 10 sccm (1 sccm = 标准状况下 1 $cm^3 \cdot min^{-1}$)和 2 sccm,气体压强约为 0.2 Pa,沉积时间为 37 min。经 Bruker 公司的材料形貌分析仪测量,所得 NbTiN 薄膜的厚度约为 200 nm,Nb/Ti 原子比控制在 0.65/0.35。

利用 Quantum Design 公司的物性测试系统(physical property measurement system, PPMS)对不同衬底上制备的 NbTiN 薄膜在面外磁场下进行正常态-超导态转变测试。

2 不同衬底上 NbTiN 薄膜的超导性能

首先对单晶 Si 衬底和 SiO_2/Si 衬底上制备的 NbTiN 薄膜进行表征。图 2(a)和(b)分别展示了这两种衬底上 NbTiN 薄膜在不同面外磁场下的电输运特性。为便于比较,本实验中将电阻下降至正常态电阻值一半时所对应的温度定义为薄膜材料的临界温度 T_c。随着磁场从 0 T 逐渐增加至 9 T,单晶 Si 衬底上 NbTiN 薄膜的 T_c 从 14.53 K 逐渐降低至 12.69 K,而 SiO_2/Si 衬底上 NbTiN 薄膜的 T_c 从 14.43 K 逐渐降低至 12.73 K。两种衬底上薄膜的临界温度及其磁场依赖行为较为接近,如图 2(c)所示。通过 WHH 模型[26-27] 对 T_c 附近的上临界磁场

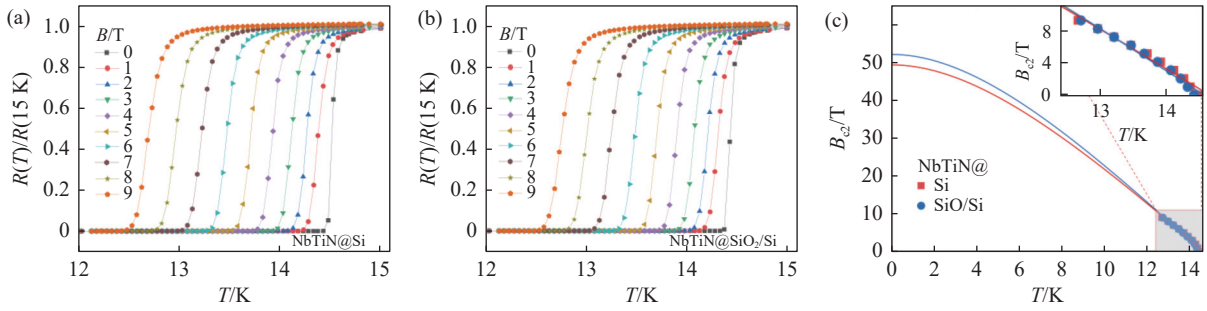

图 2　(a)单晶 Si 衬底和 (b)SiO_2/Si 衬底上 NbTiN 薄膜的归一化电阻随温度的变化; (c)两种衬底上 NbTiN 薄膜的上临界磁场与温度的关系, 插图为 T_c 附近的放大图, 实线为依据 WHH 模型拟合的结果

Fig. 2　Normalized resistance vs. temperature of NbTiN films sputtered on (a) single-crystal Si substrate and (b) SiO_2/Si substrates; (c) upper critical magnetic field vs. temperature for NbTiN films on both substrates. The inset shows the enlarged view near T_c. The solid lines represent the fitting results according to the WHH model

$B_{c2}(T)$ 数据进行拟合, 得到单晶 Si 衬底和 SiO_2/Si 衬底上 NbTiN 薄膜的零温上临界磁场 B_{c2} 分别约为 49.31 T 和 52.08 T。

对于玻璃衬底上的 NbTiN 薄膜, 其 T_c 随着磁场强度的增加从 14.38 K 逐渐降低至 12.63 K, 如图 3(a)所示。其上临界磁场随温度的变化趋势与单晶 Si 衬底和 SiO_2/Si 衬底上的情况基本一致, 如图 3(b)所示。同样利用 WHH 模型进行拟合, 可得玻璃衬底上 NbTiN 薄膜的零温上临界磁场 B_{c2} 约为 51.33 T。

如图 4(a)~(c)所示, 在沿 3 种不同晶向的 MgO 衬底上, NbTiN 薄膜表现出相近的超导特性。具体而言, 在 9 T 的磁场强度下, MgO(100) 衬底上薄膜的 T_c 从 13.83 K 降低至 12.28 K, MgO(110) 衬底上薄膜的 T_c 从 13.78 K 降低至 12.18 K, MgO(111) 衬底上薄膜的 T_c 从 13.98 K 降低至 12.38 K。如图 4(d)所示, 3 种晶相衬底上 NbTiN 薄膜在零磁场下的 T_c 很接近, 且在磁场下的变化趋势也一致。基于 WHH 模型的拟合结果显示, MgO(100)、MgO(110) 和 MgO(111) 衬底上的 NbTiN 薄膜的零温上临界磁场 B_{c2} 的数值很接近, 分别约为 54.59 T、54.19 T 和 54.57 T。

PI 材料因其高耐热性、优良的耐腐蚀性、出色的机械性能以及优异的电绝缘性能, 在微电子和航空、航天等领域受到广泛关注[28]。本文也研究了在 PI 衬底上制备的 NbTiN 薄膜的超导特性。如图 5 所示, 随着磁场强度的增加, NbTiN 薄膜的 T_c 从零场下的 13.45 K 降低至 9 T 时的 11.73 K, 并经 WHH 模型拟合得到其 B_{c2} 约为 48.78 T。

图 6(a)展示了零场下不同衬底上 NbTiN 薄膜的电阻率随温度的变化情况, 得到的不同衬底上制备 NbTiN 薄膜的 T_c 值如图 6(b)所示。结果显示,

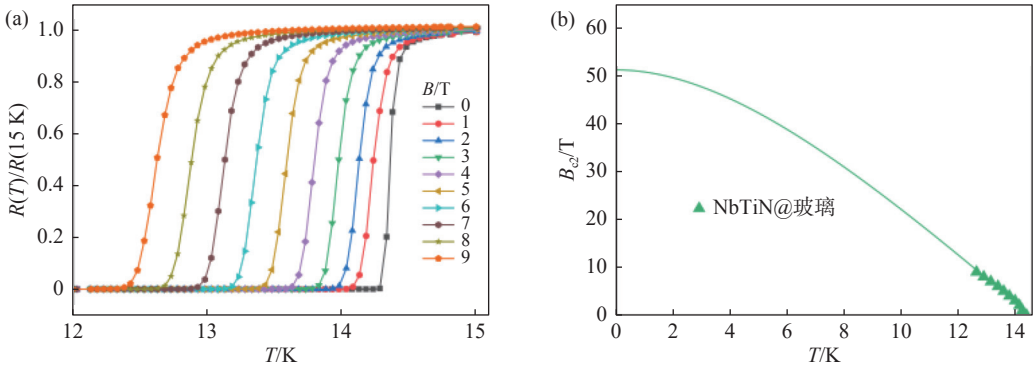

图 3　(a)玻璃衬底上 NbTiN 薄膜归一化电阻随温度的变化; (b)玻璃衬底上 NbTiN 薄膜的上临界磁场与温度的关系, 实线为依据 WHH 模型拟合的结果

Fig. 3　(a) Normalized resistance vs. temperature of NbTiN films on glass substrate; (b) upper critical magnetic field vs. temperature for NbTiN films on glass substrates. The solid line represents the fitting result accordingto the WHH model

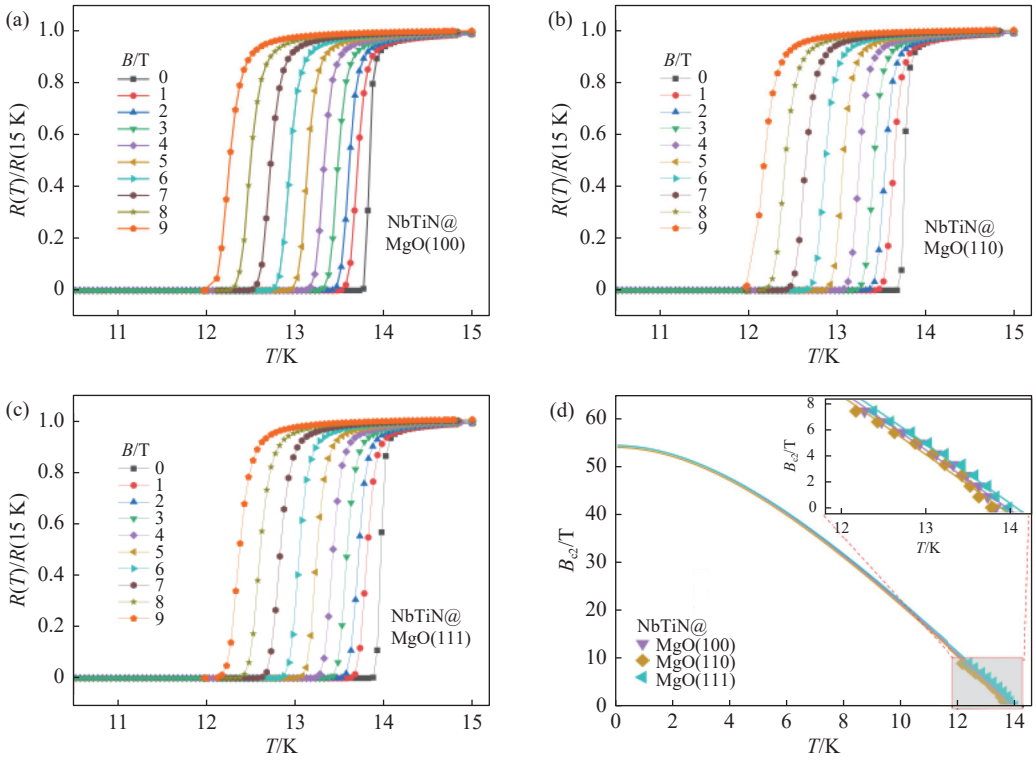

图 4 (a)MgO(100)、(b)MgO(110) 和(c)MgO(111) 衬底上 NbTiN 薄膜的归一化电阻随温度的变化;(d)3 种晶向的 MgO 衬底上 NbTiN 薄膜的上临界磁场与温度的关系,插图为 T_c 附近的放大图,实线为依据 WHH 模型拟合的结果

Fig. 4 Normalized resistance vs. temperature of NbTiN films on (a) MgO(100), (b) MgO(110), and (c) MgO(111) substrates; (d) upper critical magnetic field vs. temperature for NbTiN film on MgO substrates with three different orientatios. The solid lines represent the fitting results according to the WHH model

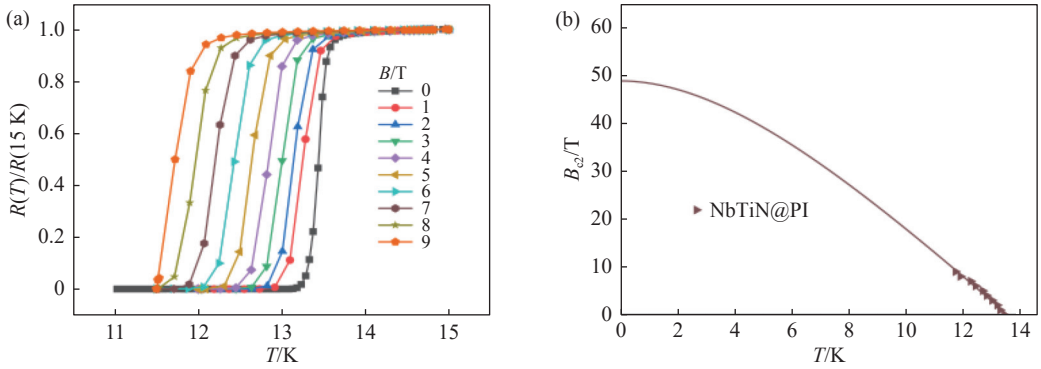

图 5 (a)PI 衬底上 NbTiN 薄膜的归一化电阻随温度的变化;(b)PI 衬底上 NbTiN 薄膜上临界磁场与温度的关系,实线为依据 WHH 模型拟合的结果

Fig. 5 (a) Normalized resistance vs. temperature of NbTiN films on PI substrate; (b) upper critical magnetic field vs. temperature for NbTiN films on PI substrates (fitting results according to the WHH model)

使用改良工艺在不同衬底上制备的 NbTiN 薄膜的临界温度均在 14 K 附近,最大差值为 1.08 K,平均值为 14.06 K,最大差值与均值的比为 7.68%。

为进一步对比采用传统工艺与本研究改进后的方法制得的 NbTiN 薄膜的性能差异,采用传统磁控溅射方法和相同工艺参数,在 SiO_2/Si 衬底上制备了厚度为 200 nm 的 NbTiN 薄膜,沉积时间为 77 min,并对其超导性能进行了测量,结果显示在图 6 中(以“normal”标记来区分)。从图 6(a)可以看出,采用传统工艺与改进后工艺制备的薄膜的超

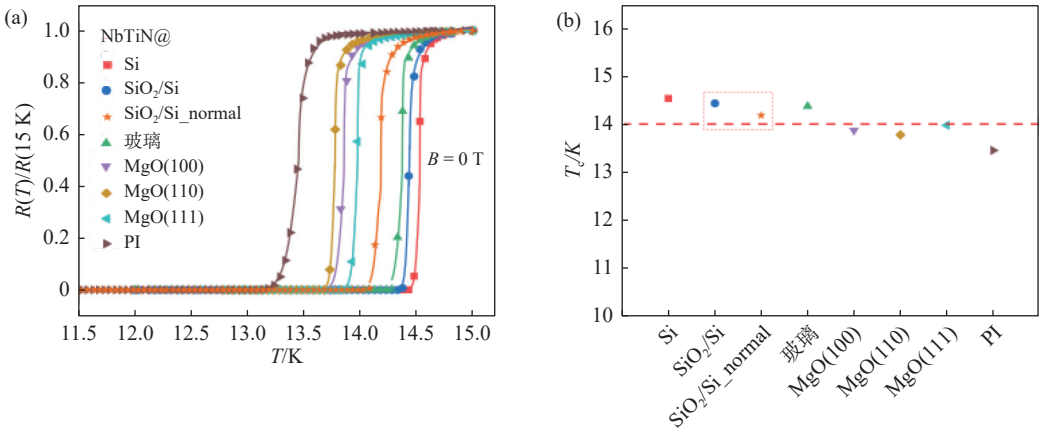

图 6　(a)零场下 NbTiN 薄膜在不同衬底上的归一化电阻随温度的变化; (b)不同衬底上的薄膜在零场下的临界温度 T_c

Fig. 6 (a) Normalized resistance vs. temperature of NbTiN films on different substrates under zero field; (b) critical temperature of NbTiN films on different substrates under zero field

导转变趋势无明显差异。两种薄膜在零场下的 T_c 如图 6(b)中红色虚线框所示, 传统工艺制备的薄膜在零场下的 T_c 为 14.19 K, 略低于采用新工艺制备的薄膜的 14.43 K。

3　讨论

测试数据表明, 在单晶 Si 衬底和 SiO_2/Si 衬底上制备的 NbTiN 薄膜具有相近的超导临界温度和上临界磁场, 说明改进后的工艺能够在硅基衬底上有效制备高质量 NbTiN 薄膜, 且几乎不受晶格失配问题的影响。此外, 本次实验所采用的玻璃衬底为普通非晶材料, 在该衬底上制备的 NbTiN 薄膜的 T_c 高达 14.38 K, 已达到前人在特制磷硅玻璃衬底上制备的 NbTiN 薄膜的水平(14.3 K)[29]。因此, 本研究提出的工艺方法有助于拓展常规玻璃衬底在超导电子学领域的应用范围。

在不同晶向 MgO 衬底上制备的 NbTiN 薄膜表现出良好的一致性, 但其 T_c 总体低于其他衬底材料上的薄膜。考虑到 MgO 衬底与 NbTiN 材料之间良好的晶格匹配, 该现象与相关研究[21]的结论相悖。我们推测, 原因可能在于 MgO 衬底表面因潮解导致不平整, 影响了 NbTiN 薄膜的整体均匀性, 从而对其临界温度产生了一定影响。采用等离子体清洗处理后的 MgO 衬底有望进一步提升薄膜质量。

PI 材料因其优良的绝缘性能和较宽的工作温度范围, 已在多个领域得到广泛应用, 尤其在超导领域, 常被用作 SIS 异质结和高温超导线材中的绝缘层[30]。本实验的结果表明, 在 PI 衬底上生长的 NbTiN 薄膜同样具备良好的超导特性, 显示出其在超导纳米线单光子探测器等超导器件中的应用潜力。这为 PI 材料在超导领域的进一步应用提供了实验依据, 当然目前仍需进一步研究与测试验证。

另外值得注意的是, 本实验制备的 NbTiN 薄膜表现出较高的零温上临界磁场强度, 这有助于推动 NbTiN 在 SIS 器件中的应用, 也有利于在超导射频腔中实现较高的加速场, 并可应用于强磁场及其他超导量子器件领域[31-33]。

最后, 本文对比了传统磁控溅射工艺与改进后的新工艺在 SiO_2/Si 衬底上所制备的 NbTiN 薄膜的超导性能差异。结果表明, 新工艺制备的薄膜的 T_c 略高。综合不同衬底上的测试数据, 采用改进后的磁控溅射工艺制备的 NbTiN 超导薄膜展现出优异的一致性, 显著降低了薄膜对衬底的依赖性, 同时大幅提高了沉积速率, 相较传统工艺显示出明显的综合优势。

4　结论

综上所述, 本研究通过改进磁控溅射工艺, 提出了一种独立通入 Ar 和 N_2 气体的方法, 有效抑制了传统反应溅射中的靶中毒现象, 显著提升了 NbTiN 薄膜的沉积速率及其超导性能的稳定性。实验结果表明, 基于改进后的工艺, 在单晶 Si 衬底、SiO_2/Si 衬底、普通玻璃衬底、不同晶向 MgO 衬底及 PI 衬底上均可成功制备高质量的 NbTiN 薄膜, 其临界温度均在 14 K 附近, 零温上临界磁场 B_{c2} 可

达 40 T 以上。尤为重要的是，不同衬底上薄膜的性能差异较小，为制备高质量 NbTiN 薄膜提供了普适且可靠的工艺路径，并进一步拓展了 NbTiN 材料的研究与应用前景。

未来可通过对 MgO 衬底等晶格匹配优良的衬底进行预处理，进一步提升 NbTiN 薄膜的超导性能；同时，通过深入研究 NbTiN 薄膜的晶格匹配机理来指导薄膜质量的进一步提高。

参考文献：

[1] TANNER M G, NATARAJAN C M, POTTAPENJARA V K, et al. Enhanced telecom wavelength single-photon detection with NbTiN superconducting nanowires on oxidized silicon[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(22): 221109.

[2] HENRICH D, DÖRNER S, HOFHERR M, et al. Broadening of hot-spot response spectrum of superconducting NbN nanowire single-photon detector with reduced nitrogen content[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 112(7): 074511.

[3] PAN Y, ZHOU H, ZHANG X, et al. Mid-infrared Nb_4N_3-based superconducting nanowire single photon detectors for wavelengths up to 10 μm[J]. Optics Express, 2022, 30(22): 40044-40052.

[4] MA R, SHU R, ZHANG X, et al. Single photon detection performance of highly disordered NbTiN thin films[J]. Journal of Physics Communications, 2023, 7(5): 055006.

[5] 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.

[6] ENDO A, SFILIGOJ C, YATES S J C, et al. On-chip filter bank spectroscopy at 600-700 GHz using NbTiN superconducting resonators[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(3): 032601.

[7] CARTER F W, KHAIRE T, CHANG C, et al. Low-loss single-photon NbN microwave resonators on Si[J]. Applied Physics Letters, 2019, 115(9): 092602.

[8] ZHAO S, WITHINGTON S, THOMAS C N. Nonlinear characteristics of Ti, Nb, and NbN superconducting resonators for parametric amplifiers[J]. Superconductor Science and Technology, 2023, 36(10): 105010.

[9] MAEZAWA H, YAMAKURA T, SHIINO T, et al. Stability of a quasi-optical superconducting NbTiN hot-electron bolometer mixer at 1.5 THz frequency band[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21(3): 640-644.

[10] SHI H, XU T, ZHE Y, et al. A niobium nitride superconducting hot electron bolometer direct terahertz detector working at 9 K[J]. Applied Physics Letters, 2025, 126(4): 042601.

[11] UZAWA Y, KROUG M, KOJIMA T, et al. Design of terahertz SIS mixers using Nb/AlN/Nb junctions integrated with all-NbTiN tuning circuits[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, 27(4): 1500705.

[12] HE L, LIN F, HE X. Design of waveguide NbN-based superconductor-insulator-superconductor mixer for 650 GHz[J]. Advanced Photonics Research, 2025: 2400197.

[13] MAKISE K, TERAI H, TAKEDA M, et al. Characterization of NbTiN thin films deposited on various substrates[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21(3): 139-142.

[14] ZHANG L, PENG W, YOU L X, et al. Superconducting properties and chemical composition of NbTiN thin films with different thickness[J]. Applied Physics Letters, 2015, 107(12): 122603.

[15] MACHHADANI H, ZICHI J, BOUGEROL C, et al. Improvement of the critical temperature of NbTiN films on III-nitride substrates[J]. Superconductor Science and Technology, 2019, 32(3): 035008.

[16] MA R, HUAN Q, HUANG J, et al. Disorder enhanced relative intrinsic detection efficiency in NbTiN superconducting nanowire single photon detectors at high temperature[J]. Applied Physics Letters, 2024, 124(7): 072601.

[17] TAKEDA M, SHAN W, KOJIMA T, et al. Mixing properties of NbN-based SIS mixers with NbTiN wirings[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2009, 19(3): 436-439.

[18] YAMAMORI H, SASAKI H, KOHJIRO S. Preparation of overdamped NbTiN Josephson junctions with bilayered Ti–TiN barriers[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 108(11): 113904.

[19] YANG X, YOU L, ZHANG L, et al. Comparison of superconducting nanowire single-photon detectors made of NbTiN and NbN thin films[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(1): 2200106.

[20] DORENBOS S N, REIGER E M, PERINETTI U, et al. Low noise superconducting single photon detectors on silicon[J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(13): 131101.

[21] ZHANG L, ZHONG Y L, XIE J J, et al. Effect of nitrogen content on the structure and superconductivity of reactive

sputtered NbTiN thin films[J]. Superconductor Science and Technology, 2024, 37(9): 095010.

[22] LUO P, ZHAO Y. Niobium nitride preparation for superconducting single-photon detectors[J]. Molecules, 2023, 28(17): 6200.

[23] GÜTTLER D. An investigation of target poisoning during reactive magnetron sputtering[D]. Dresden: Technische Universität Dresden, 2009.

[24] GÜTTLER D, ABENDROTH B, GRÖTZSCHEL R, et al. Mechanisms of target poisoning during magnetron sputtering as investigated by real-time in situ analysis and collisional computer simulation[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(25): 6134-6136.

[25] 佟洪波, 柳青. 反应溅射制备 AlN 薄膜靶中毒机制的研究[J]. 真空科学与技术学报, 2011, 31(6): 739-742.

[26] HELFAND E, WERTHAMER N R. Temperature and purity dependence of the superconducting critical field, H_{c2}. II[J]. Physical Review, 1966, 147(1): 288-294.

[27] SAJILESH K P, SINGH D, BISWAS P K, et al. Superconducting properties of the noncentrosymmetric superconductor LaPtGe[J]. Physical Review B, 2018, 98(21): 214505.

[28] 刘金刚, 任茜. 聚酰亚胺薄膜 60 年商业化进展 [J]. 精细与专用化学品, 2025, 33(5): 1-9.

[29] WANG C, ZHANG J, ZHANG L, et al. Co-sputtering NbTiN thin films on PSG/Si substrates[J]. Superconductor Science and Technology, 2016, 29(2): 025005.

[30] SAMOILENKOV S, MOLODYK A, LEE S, et al. Customised 2G HTS wire for applications[J]. Superconductor Science and Technology, 2016, 29(2): 024001.

[31] HUAN Q, MA R, ZHANG X, et al. Impact of on-chip gate voltage on the electric properties of NbTiN superconducting nanowire transistor[J]. Applied Physics Letters, 2024, 124(13): 132601.

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

[33] MA R, GUO Z, CHEN D, et al. Drone-based superconducting nanowire single-photon detection system with a detection efficiency of more than 90%[J]. Advanced Photonics Nexus, 2025, 4(2): 026003.