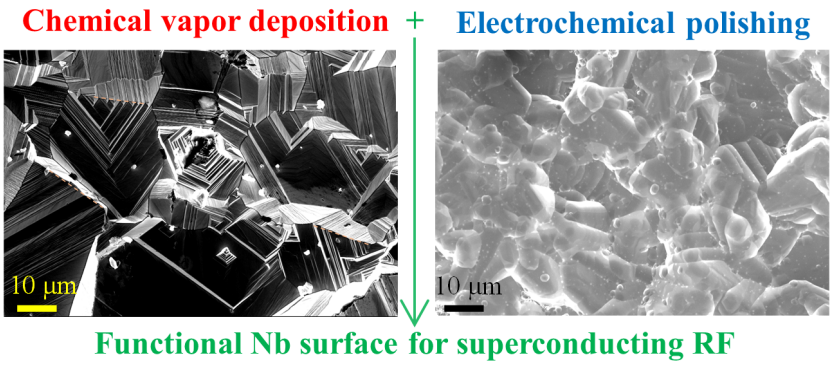
arXiv:2301.00788v1 [

Grap摘要

化学气相沉积铌薄膜的电化学抛光

Zeming Sun、Mingqi Ge、James T. Maniscalco、Victor Arrieta、Shawn R. McNeal、Matthias U.Liepe



亮点

化学气相沉积铌薄膜的电化学抛光

Zeming Sun、Mingqi Ge、James T. Maniscalco、Victor Arrieta、Shawn R. McNeal、Matthias U.Liepe

- 研究证明，电化学抛光（EP）可有效降低化学气相沉积（CVD）铌薄膜的表面粗糙度。

- CVD 铌薄膜含有台阶、扭折和金字塔状特征，导致表面粗糙度较大。这些薄膜的电抛光涉及宏观和微观尺度的平滑。

- 观察到电抛光过程中可能存在对晶体取向的依赖，这表明局部增强的电流密度和氧化物介电层厚度变化会产生显著影响。

- 通过 EP-CVD 联合技术获得所需的表面状态，标志着铌薄膜在超导射频领域的一种可行应用。

化学气相沉积铌薄膜的电化学抛光

ZemingSun[a, *], Mingqi Ge[a, 1], James T. Maniscalco[a, 2], Victor Arrieta[b], Shawn R. McNeal[b], Matthias U. Liepe[a, **]

[a]康奈尔加速器科学与教育实验室，美国纽约州伊萨卡，邮编 *14853*[b]*Ultramet*，美国加利福尼亚州帕科伊马，邮编 *12173*

摘要

将化学气相沉积（CVD）与电化学抛光（EP）工艺相结合，是制备高性能超导薄膜的一种有前景的途径，可用于制造经济高效的超导射频（SRF）粒子加速器组件和超导量子计算机组件。沉积后电化学抛光工艺可显著降低铌薄膜的表面粗糙度，这是获得最佳超导表面状态所必需的。在本研究中，我们考察了化学气相沉积生长并经电化学抛光的铌薄膜的表面形貌、粗糙度和晶体取向，并分析了晶粒生长和抛光机制。研究发现，化学气相沉积薄膜由台阶、扭折和金字塔状特征构成，导致峰谷距离过大。结果表明，电化学抛光能显著降低金字塔结构的高度，并有效减小整体表面粗糙度。与缓冲化学抛光（BCP）不同，电化学抛光结果显示出可能存在对晶体取向的依赖性，这表明该工艺受到局部增强的电流密度和氧化物介电层厚度变化的影响。这些认识揭示了化学气相沉积生长的铌薄膜所涉及的电化学抛光原理，有助于进一步优化薄膜射频超导应用的表面轮廓。

*zs253@cornell.edu

**mul2@cornell.edu[1]现任职于杰斐逊实验室[2]现任职于SLAC

提交至《应用表面科学》的预印本 *2023*年*1*月*3*日

关键词：电化学抛光、化学气相沉积、铌、薄膜、表面粗糙度、晶体取向

1. 引言

铌（Nb）是一种重要的超导材料，可用于超导射频（SRF）腔——现代粒子加速器中容纳电磁场的腔室 [1], ，也用于新兴技术领域量子计算机所需的组件 [2]。SRF 腔是众多应用中的关键组件，包括同步辐射和自由电子激光光源（例如，直线加速器相干光源（LCLS）） [3, 4], 、暗物质搜寻等高能物理研究 [5], 、用于半导体器件制造的高精度（< 5 nm）光刻 [6], ，以及生物制药和医疗应用 [7]。

自加速器从低梯度常导射频转向高梯度超导射频以来，块体铌一直是实现高加速梯度的主流腔体技术。块体铌腔由高纯度铌制成，残余电阻率比（RRR）超过 300；其制造需要成本高昂的三次电弧熔炼 RRR-500+起始材料。一种有望实现适用于超导射频应用的低成本腔体的方案，是在低成本、高导热的铜（Cu）腔体基底上涂覆铌薄膜。薄膜技术之所以可行，是因为超导射频腔的活性区域由场穿透深度决定；在内表面，该深度通常为几十至数百纳米，例如铌的穿透深度为例如， ~ 40 nm。此外，由于热导得到改善，铌镀铜腔在运行期间具有更高的热稳定性。作为结构主体的铜腔壁可使废热向外扩散并排出，而铌薄膜则是与射频场相互作用的关键部件。控制腔体表面粗糙度并减少表面缺陷，对于获得高品质因数至关重要，因为这些特征产生的局部热量可能导致腔体表面的超导态逐步丧失，这种现象称为“失超” [8]。

除溅射 [9, 10, 11] 和外延 [12], 外，还研究了在碳化硅和石墨基底上使用 $NbCl_5$ 和 $NbBr_5$ 前驱体 [13, 14, 15]沉积铌薄膜的化学气相沉积（CVD）技术。这种气相沉积技术适用于涂覆形状复杂的腔体内表面

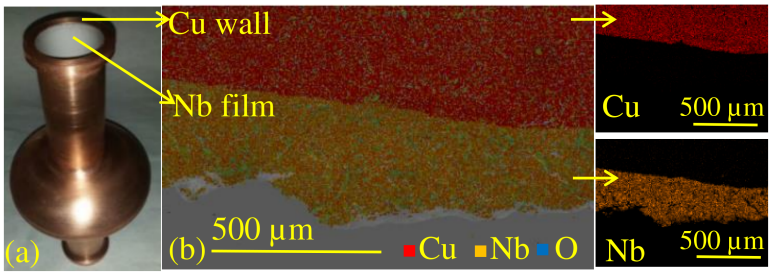


图1：（a）内表面涂覆化学气相沉积铌薄膜的铜超导射频腔照片。（b）铜基底上化学气相沉积铌薄膜的截面能量色散X射线能谱映射。样品取自腔体。插图显示铜基底和铌薄膜的位置。

。Ultramet 开发了先进的 CVD 工艺，用于沉积高 RRR（> 280），并利用快速 CVD 工艺能力制造出可测试的独立式块体铌 3.9 GHz 腔体 [17]。Ultramet 与康奈尔大学超导射频组合作，将先进的 CVD 工艺技术改造用于在直径5英寸的板材上气相沉积厚膜和薄膜铌，随后将该工艺扩展到在全尺寸单 cell ILC 设计的 1.3 GHz 椭圆铜腔内表面形成铌薄膜（图 1a）[17, 16]。本研究中 Ultramet 制备的 CVD 铌薄膜涂层在 2 K 时表现出高于 10^{10} 的品质因数，以及低至 ~ 5 nΩ 的剩余电阻 [16]。图 1b 显示了通过能量色散X射线能谱仪（EDS）对一块从经过电化学抛光的铌/铜腔体上切取的样品横截面进行元素映射的结果。图中优异的铌-铜界面证实，厚度为 ~ 400 µm 的铌薄膜与铜基底牢固结合，且薄膜中未观察到铜夹杂。然而，即使经过电化学抛光处理，仍存在高达 ~ 150 µm 的厚度变化。表面粗糙度可能在局部增强磁场，并对射频性能产生负面影响，例如导致高加速梯度下品质因数（Q_0）下降 [18]。此外，这类场增强可能导致失超，并因超导性永久丧失而限制最大场能力。

因此，必须制备光滑的射频表面。此前对块体铌的研究涉及机械抛光 [19], 、使用缓冲化学抛光（BCP）等化学方法 [20], ，以及电化学抛光（EP） [21]。在这些方法中，采用直流电流，以 9 份浓缩 H_2SO_4 配 1 份 48% 氢氟酸进行处理的电化学抛光过程，通常用作关键的表面精整工艺，在块体铌上可实现令人鼓舞的 300 nm 粗糙度

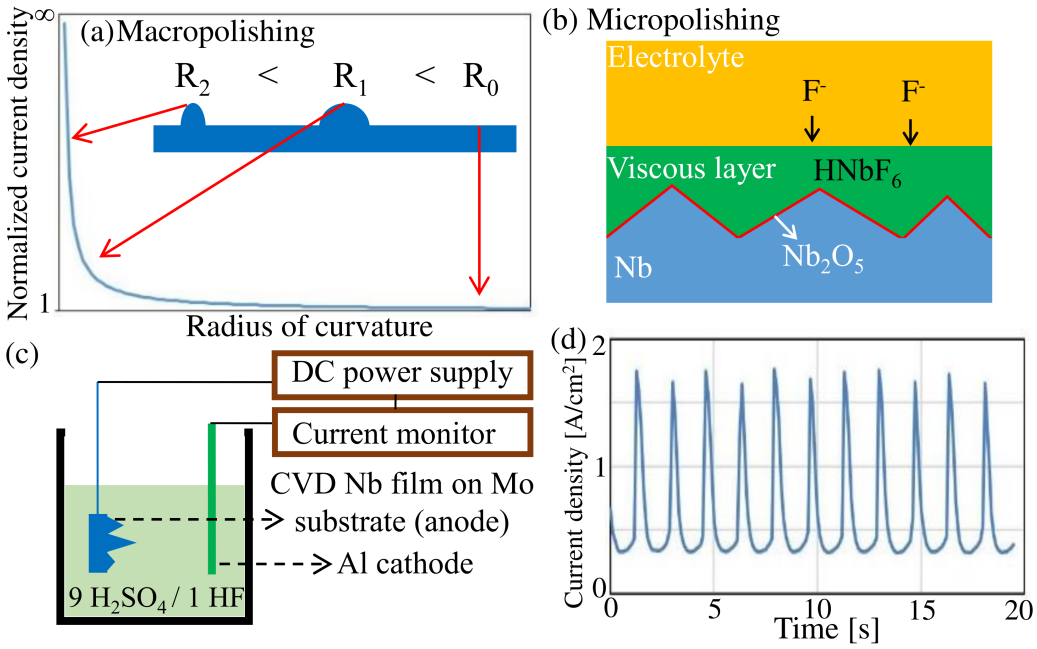


图2：(a、b) 使用 H_2SO_4/氢氟酸电解液对铌表面进行电化学抛光的机理：(a) 宏观抛光和 (b) 微抛光。(c) 电化学抛光系统示意图，以及 (d) 抛光电流振荡。

。文献综述表明，尚未有人研究通过电抛光处理来改善用于超导射频应用的铌薄膜表面。

根据表面特征的尺寸，电化学抛光分为两类：宏观抛光和微抛光。Landolt 等人 [23, 24] 和 Hryniewicz 等人 [25] 已对两者的基本原理进行了综述。如图2a所示，曲率半径较小的位置处的局部电流密度会显著增大，其关系可表示为 [26]

$$\sigma = \frac{\frac{2\varepsilon\Delta V}{R}}{exp(\frac{-2\Delta n}{R}) - 1}_{\Delta\ n\to 0} \tag{1}$$

其中，σ 为表面电荷密度，R为曲率半径，Δn为垂直于表面的有限距离，ΔV为距离 Δn两端点之间的电势差，ε 为电介质常数。因此，对于粗糙度较高的表面，通过宏观抛光使峰部和凹陷区域趋于平整，主要取决于它们的电流

密度差异。相比之下，亚微米粗糙度表面具有曲率半径较大的特征（更接近图2a中的R_0），这使峰部和凹陷区域之间的电场更加均匀，并使微观抛光占据主导地位，其作用方式是控制反应物（水、F^-、SO_4^{2-}）和产物（$HNbF_6$ 及其他络合物）等物种的质量传输。已有大量研究探讨块体铌表面[21, 27, 28]抛光过程中的传输机制。Tian等人 [21, 27] 指出，F-离子的传输受限是一种作用机制，并验证了理论界面模型，如图2b所示，其中显示了致密的Nb_2O_5 薄膜以及$HNbF_6$ （和其他络合物）扩散层。块体固体与液相区域之间会形成黏性层和/或介电膜，从而促进峰部区域发生反应；与凹陷区域相比，该处物种（F^-）能够随机扩散。

将电抛光应用于Nb薄膜时存在局限性，这是由于化学气相沉积所形成的独特表面轮廓和结构特性，本文对此进行了详细阐述。例如，薄膜表面呈现出多种尺寸的特征，从 $\sim$ 100 μm的大型金字塔状特征到数纳米大小的扭折和台阶不等；在允许的抛光厚度极限下，如何平滑表面是一项挑战。此外，与块体铌相比，薄膜中的位错、杂质和空位等晶体缺陷以及内应力更为常见。由于存在缺陷位点，人们担心难以形成致密的介电膜，也难以获得理想的电场分布。铜电化学抛光研究曾报告称，薄膜样品未能形成介电膜，因此抛光结果不理想；而块体样品则未出现此问题 [29]。这些挑战促使我们研究铌薄膜的电抛光。

本文分析了与化学气相沉积生长的Nb薄膜电抛光处理相关的新现象，并进一步推进电化学抛光-化学气相沉积复合技术，为基于薄膜的Nb射频腔及其他超导应用铺平道路。我们重点比较沉积态薄膜与电化学抛光薄膜的特性。具体而言，我们研究了表面形貌、粗糙度和晶粒取向。此外，我们还讨论了化学气相沉积生长模式，因为观察到的这些独特表面特征对于确定后续电抛光过程的机理至关重要。此外，迄今的电抛光结果表明，抛光效果可能与晶体取向有关；文中还将分析结果与受化学控制的缓冲化学抛光处理进行了比较。

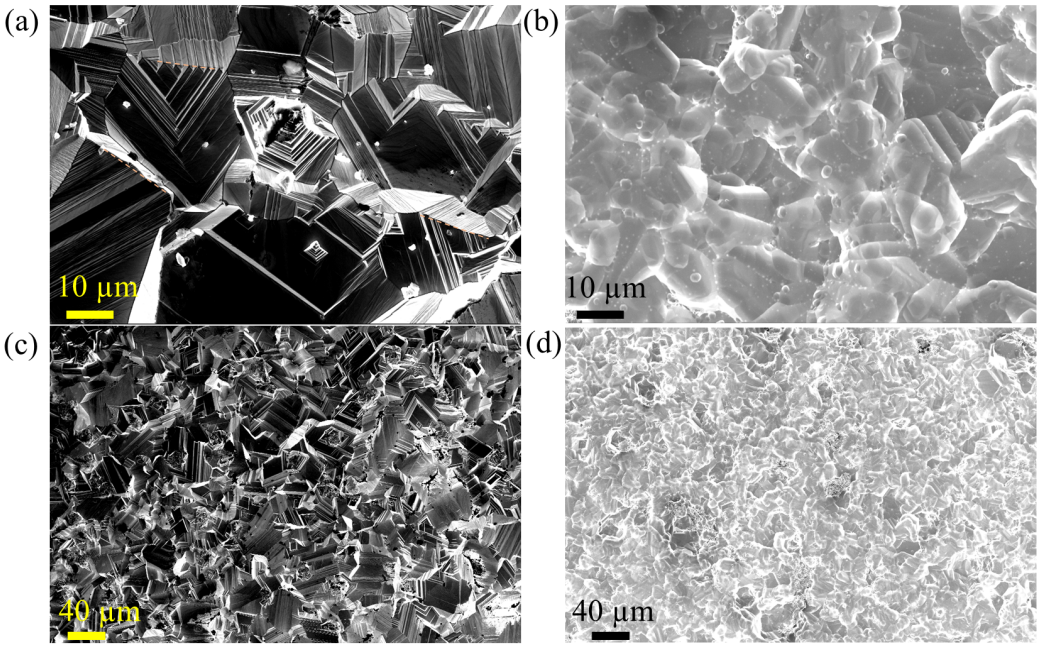


图3：钼基底上化学气相沉积铌薄膜在电抛光前（a、c）和电抛光后（b、d）的表面扫描电子显微镜图像对比，不同宽度的场分别为：（a、b）100 µm；（c、d）500 µm。

2. 实验部分

采用低温化学气相沉积工艺，在钼（Mo）基底上制备了厚度为 $> 100\ \mu$m的Nb薄膜。化学气相沉积Nb薄膜由Ultramet提供，具体工艺配方未予公开。采用双电极系统（图2c）对沉积态薄膜进行了电化学抛光，标称去除厚度为 $10\ \mu$m；该系统以化学气相沉积Nb/Mo为阳极、Al为阴极，电解液为98%的H_2SO_4 和48%的HF，体积比为9:1。康奈尔大学、费米国家加速器实验室、高能加速器研究机构及其他加速器实验室的腔体抛光通常采用双电极系统 [16, 22, 30]。监测电流振荡状态（图2d），以促进致密 Nb_2O_5 介电层的生成并随后将其去除。作为电抛光的参照样品，采用标准缓冲化学抛光（BCP）溶液对样品进行抛光；该溶液由48%的氢氟酸、70%的硝酸和85%的磷酸按1:1:1的体积比配制而成。

为评估表面形貌的变化，使用配备镜筒内探测器的蔡司 Gemini 扫描电子显微镜（SEM），在低电压条件（1–5

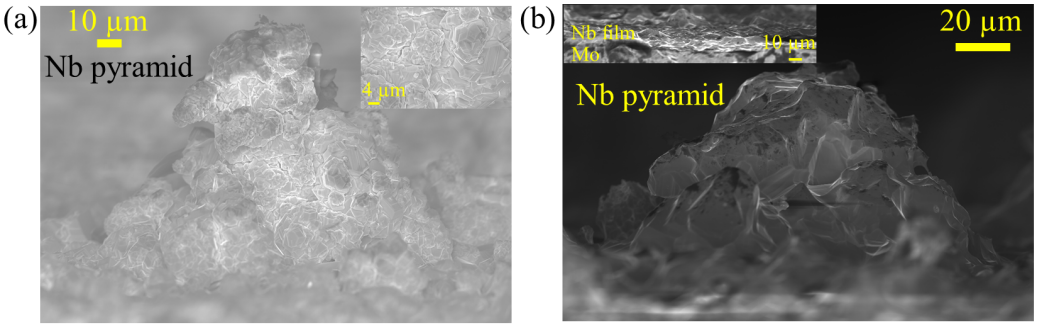


图 4：观察到的最大金字塔状特征在 (a) 电抛光前和 (b) 电抛光后的截面扫描电子显微镜图像对比。插图分别放大展示了 (a) 化学气相沉积金字塔和 (b) 电抛光后的相对平滑区域。

kV）下进行表面和截面成像。使用能量色散X射线能谱（EDS）获取化学信息。通过原子力显微镜（AFM，Asylum MFP-3D）测量薄膜的表面粗糙度，但较高的（$> 100\mu$m）金字塔结构影响了测量，因此 AFM 结果仅对相对平滑的区域进行了比较。为进行有效比较，将薄膜竖直放置在扫描电子显微镜下，对最高金字塔结构的截面进行成像和比较。此外，还采集了高分辨率X射线衍射（XRD，Rigaku SmartLab）图谱，用于分析晶粒取向。采用波长为 0.154 nm 的 Cu Kα 辐射。

3. 结果与讨论

3.1. 表面形貌

图 3 展示了沉积态薄膜和电抛光薄膜的表面形貌。沉积态薄膜（图 3a）虽然均匀覆盖了基底表面，但呈现出晶面和台阶的特征。此外，在大视野宽度下观察时，表面上还广泛分布着金字塔状结构（图 3c）。图 4a 展示了所观察到的最大金字塔结构的截面。总之，表面粗糙度有两个来源：（1）高度达 $100\ \mu$m 的金字塔结构；（2）出现在相对平坦区域和金字塔结构上的台阶-拐折结构。需要注意的是，台阶等虽小但尖锐的特征会因强烈的局部场增强而对射频性能产生不利影响。因此，有必要对薄膜表面进行抛光，以改善表面状况。

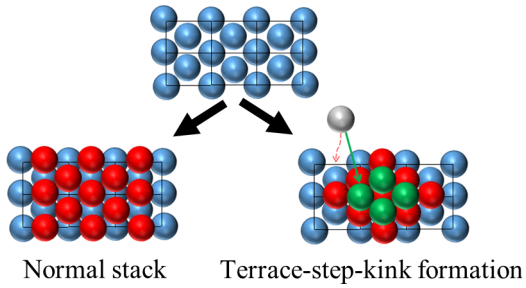


图5：展示铌（110）晶面上平台-台阶-拐折形成的原子模型。蓝色、红色和绿色原子分别表示第1、第2和第3原子层。

关于台阶-拐折结构和金字塔结构的形成，我们分析了薄膜生长机制。根据典型的平台-台阶-拐折模型 [31]，，成核事件发生在多个位点，随后以岛状生长模式形成金字塔结构。如图 5 所示，前驱体发生化学反应后产生的铌原子吸附在平台（平坦表面）上，随后扩散至拐折位点（平台边缘处的位点），此处的表面能通常较低。如果吸附原子（吸附的原子）在平台上的横向扩散不足，这些吸附原子便会聚集形成金字塔状岛，同时出现台阶。一旦岛大量形成，这种效应就会进一步增强，因为吸附原子无法扩散并并入已有的岛中。因此，平台-台阶-拐折结构和金字塔结构在化学气相沉积铌表面占据主导地位。

化学气相沉积后，进行了电抛光，以从两个方面改变表面形貌，即去除或平滑大型金字塔结构，并消除表面台阶和拐折。如图3b和3d所示，电抛光后，边缘和尖锐特征显著变圆。进一步观察截面（图4b）发现，沉积时相对平坦的区域变得更加平滑；小岛完全溶解，而一些高度达 50 μm的大岛仍然存在，但其表面也变得平滑。这表明，无论扭折和台阶位于何处，它们都容易成为抛光的起始位置，从而形成平滑、棱角较少的表面。

由于面临非原位观察的挑战，我们比较了电抛光前后观察到的最高金字塔结构的高度。例如，抛光前的金字塔高度高达 ~ 100 μm，而抛光后观察到的最高金字塔结构高度为 ~ 50 μm。这一经验性比较表明，由于这些曲率半径较小的金字塔结构受到强烈的宏观抛光，其高度被抛去了超过一半

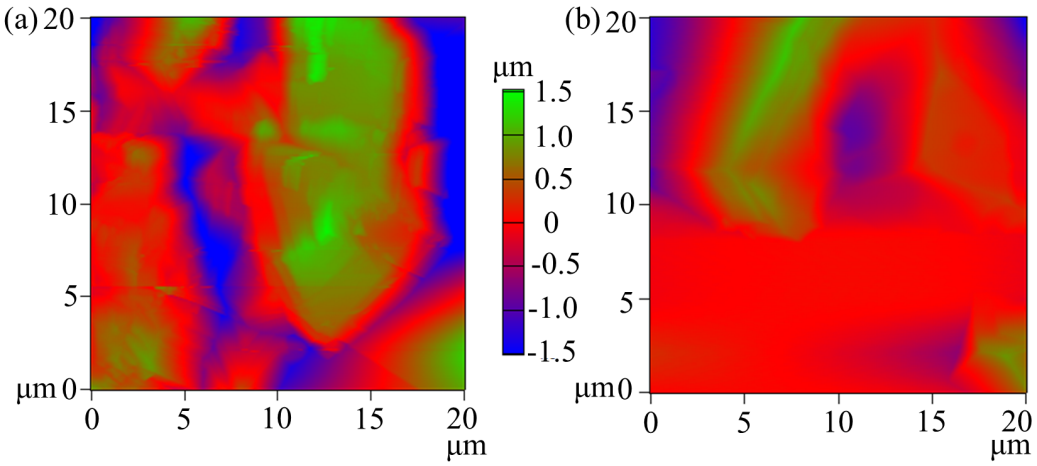


图 6：在相对平坦区域拍摄的代表性原子力显微镜图像：（a）电抛光前；（b）电抛光后。

（图 2a 中更接近 R_2 的位置）。

在化学气相沉积金字塔上拍摄的高倍图像（插图，图 4a）显示，该金字塔由小晶核（5 – 10 μm）组成，其台阶与拐点形貌与其他相对平坦区域相似。电抛光后（图 4b），这些特征消失，形成了光滑的金字塔表面。此观察表明，微抛光也发挥了作用：它通过平整台阶与拐点处的高度差并溶解小晶核来实现这一效果。需要指出的是，我们的首要目的是钝化尖锐特征；虽然高大的金字塔并不理想，但经过平滑处理的金字塔对场增强的影响较小。

3.2. 表面粗糙度

由于仪器景深能力有限，使用原子力显微镜测量 a >10 μm 不平整表面的表面粗糙度颇具挑战。图 4 中的截面扫描电子显微镜图像提供了电抛光前后金字塔结构高度变化的经验性比较。此处，在相对平坦的区域拍摄原子力显微镜图像，作为粗糙度变化的指示。

如图 6 所示，在具有代表性的 20^2 μm^2 区域中，电抛光后平滑区域（以红色标示）显著扩大。考虑到一些无法避免的小岛，沉积态样品的峰谷距离较大，为 4.2 μm。相比之下，电抛光样品的该值降低至

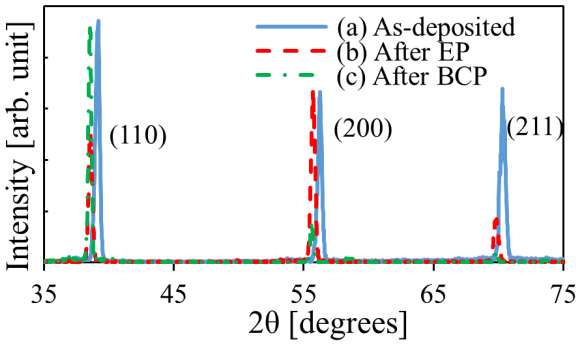


图7：化学气相沉积铌薄膜的X射线衍射图谱：(a) 沉积态，(b) 电抛光后，(c) 缓冲化学抛光后。强度以沉积态薄膜为参照，按其最高衍射峰归一化。

2.6 μm。其他表面参数再次表明，表面粗糙度降低了 $\sim 50\%$，例如，平均偏差（R_a）从 590 nm 降至 270 nm，均方根（R_q）从 740 nm 降至 390 nm。薄膜上经电抛光平滑区域的 R_a 值接近电抛光块体表面的典型值（$\sim$ 300nm），这表明电抛光应用于薄膜时效果显著。未来的工作应着重去除残留的金字塔特征。

3.3. 晶体取向

比较了经电化学（EP）和化学（BCP）抛光的化学气相沉积铌薄膜的X射线衍射特征（图7）。沉积态薄膜呈现出明显的（110）峰，该峰源于立方钼基底上的外延生长，同时还出现了（100）和（211）衍射峰。图8展示了除（110）外延外，（100）和（211）晶面的形成机制。在体心立方（bcc）结构中，[111] 方向是最密排方向，（110）晶面易沿该方向滑移，从而形成（100）晶面（图8a）。位于（100）和（110）晶面之间的位错，其伯格斯矢量为a/2 [111]。此外，绕 [111]轴旋转70.5度后，（211）和（110）晶面可形成孪晶结构（图8b）。扫描电子显微镜（SEM）下广泛观察到这些孪晶结构，在图3a中以虚线标出。

此外，我们观察到电抛光过程中存在取向依赖性。例如，如图7所示，最高衍射峰从最初的最高（110）晶面峰转变为（100）晶面峰。随后，将强度归一化至

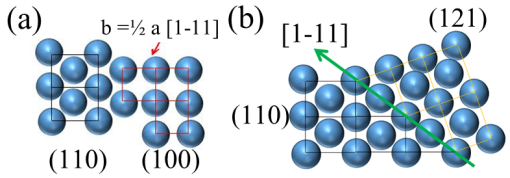


图8：原子模型展示了除（110）晶面外，（a）（100）晶面和（b）（211）晶面的形成机制。晶格常数以“a”表示，伯格斯矢量以“b”表示。

（100）晶面峰。事实上，（110）晶面的强度减半，（211）晶面的强度也下降了超过一半。（电抛光后衍射角向较小角度偏移，表明薄膜中的压应力得到释放。）

然而，取向依赖行为确实给传统解释带来了一些微妙的问题；在微抛光过程中，晶体取向的影响理应受到抑制。一般而言，电抛光受电化学反应和扩散过程控制。不过，在微抛光过程中，限制因素是质量传输，而非电荷转移 [23]。物种扩散是随机运动，因此被认为与取向无关；而受反应控制的抛光通常依赖于取向，因为表征特定晶面上平均原子数的平面密度各不相同，如表1所示。

表1：铌中（110）、（100）和（211）晶面的平面密度和晶面间距。晶格常数（a）为330 pm。

晶面取向	(110)	(100)	(211)
面密度	$\frac{\sqrt{2}}{a^2}$	$\frac{1}{a^2}$	$\frac{\sqrt{6}}{3a^2}$
晶面间距	$\frac{\sqrt{2}a}{2}$	$\frac{a}{2}$	$\frac{\sqrt{6}a}{6}$

为检验电抛光过程中的取向依赖性是否源于反应控制过程，我们进行了缓冲化学抛光，其化学反应与电抛光相似 [31]。根据X射线衍射结果（图7），与（110）晶面相比，平面密度较低的（100）和（211）晶面在缓冲化学抛光后强度显著降低。这种缓冲化学抛光行为与电抛光结果显著不同，支持了电抛光受反应控制程度较低这一理论。

我们进一步分析导致取向

依赖性的可能机制。我们的结果表明，电化学抛光过程中同时涉及宏观抛光和微观抛光。受几何因素影响的局部电场在金字塔结构处发挥重要作用；这些位置的局部抛光电流密度增大，从而使抛光速率显著提高。假设金字塔结构的统计分布均匀，沉积态薄膜中强度最高表明占主导的群体为（110）结构金字塔（图7a），因此，整体金字塔结构的减少会优先发生在（110）晶面。例如，比较图4中的金字塔结构截面，电抛光后半峰全宽仍保持 $80\ \mu$m，而高度则从100μm降至 $50\ \mu$m，这表明抛光主要沿垂直方向进行，即 $[110]$ 取向。

另一种可能的机制基于传统理论（即，质量传输控制电抛光）；尽管物种扩散不受晶体取向影响，但电抛光过程中的氧化层生长（图 2b）会随晶体取向而变化。较大的局部抛光电流会形成更厚的氧化层，因而带来更高的抛光速率——这一情形会产生与上述讨论相似的结果。无论局部抛光电流产生何种影响，（110）晶面上的氧化层生长速率均高于其他晶面 [33, 34]。（110）晶面上较厚的氧化层会使该晶面在电抛光过程中去除更多材料。总之，优先抛光至关重要，因为它可能具备选择性抛光能力；要证实本研究所指出的机制，还需开展进一步研究。

4. 结论

总之，成功对化学气相沉积（CVD）铌薄膜进行了电化学抛光（EP），以降低其表面粗糙度，并将其与缓冲化学抛光（BCP）进行了比较。本文分析了表面形貌、粗糙度和晶体取向等特征，以揭示化学气相沉积生长及电抛光机制。

沉积态薄膜由相对平坦的区域和金字塔结构区域组成，导致峰谷距离达到 $> 100\ \mu$m。观察到的台阶与拐点表明，金字塔结构的形成与平台-台阶-拐折模型有关。此外，化学气相沉积晶体中存在大量（110）晶面，以及一些滑移诱导的（100）晶面和（211）孪晶面。

研究证明，电抛光能有效降低相对平坦区域的平均表面粗糙度，并显著降低金字塔高度，即降低一半以上。这些平滑作用对提升化学气相沉积铌基腔体的射频性能至关重要。除金字塔高度降低外，金字塔上的台阶与拐点也消失了，这表明电抛光过程中同时发生了宏观和微观平滑作用。与化学抛光（缓冲化学抛光）相比，电抛光中的反应控制机制可以忽略不计。局部增强的电流密度和氧化物介电层的厚度变化可能是化学气相沉积薄膜抛光的控制因素，从而导致了本研究观察到的晶体取向依赖性。总体而言，化学气相沉积铌薄膜的电抛光过程更为复杂，既会去除微米尺度以上的尖锐特征，也会去除微米尺度以下的尖锐特征。

我们对电抛光化学气相沉积技术的演示，表明铌薄膜可切实应用于新兴的超导应用领域。

数据可用性声明

支持本研究结论的数据，可向作者提出合理请求后获取。

利益冲突

V.A. 和 S.R.M. 任职于 Ultramet。Z.S.、M.G.、J.T.M. 和 M.U.L. 声明不存在相互竞争的经济利益。

致谢

本研究由美国能源部小企业创新研究计划第二阶段奖项 DE- SC0015727 资助，并得到美国国家科学基金会 PHY-1549132 项目及明亮束流中心的支持。

参考资料

[1] H. Padamsee，超导射频加速器成功发展 50 年——综述，《超导科学与技术》30（2017）053003。 doi:10.1088/1361-6668/aa6376。

[2] A.Blais, A. L. Grimsmo, S. M. Girvin, A. Wallraff, 《电路量子电动力学》, Rev. Mod. Phys. 93 (2021) 025005。doi:10.1103/RevModPhys.93.025005。

[3] W. Decking 等，《由超导直线加速器驱动的兆赫兹重复频率硬X射线自由电子激光》，自然·光子学 14 (2020) 391–397。doi:10.1038/s41566-020-00712-8。[4] E. Prat 等，《由高亮度低能电子束驱动的紧凑且经济高效的硬X射线自由电子激光》，自然·光子学 14 (2020) 748–754。doi:10.1038/s41566-020-0607-z。[5] E. Sicking, R. Strom，《借助紧凑型直线对撞机，从精密物理迈向能量前沿》，自然·物理学 16 (2020) 386–392。doi:10.1038/s41567-020-0834-8。[6] W. Ehrfeld, A. Schmidt，《深X射线光刻的最新发展》，J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanometer. Struct. Process. Meas. Phenom. 16 (1998) 3526。doi:10.1116/1.590490。[7] E. J. Jaeschke 等，《同步辐射光源与自由电子激光：加速器物理、仪器技术与科学应用》，施普林格，Cham，2020。[8] C. Benvenuti, N. Circelli, M. Hauer，《用于超导加速腔的铌薄膜》，Appl. Phys. Lett. 45 (1984) 584。doi:10.1063/1.95289。[9] C. T. Wu，《磁控溅射铌薄膜的内应力》，《薄固体薄膜》64 (1979) 103–110。doi:10.1016/0040-6090(79)90549-2。[10] V. Palmieri, R. Vaglio，《Nb/Cu界面处的热接触电阻：限制溅射薄膜射频超导腔性能的因素》，《超导科学与技术》29 (2015) 1。doi:10.1088/0953-2048/29/1/015004。[11] W. M. Roach, D. B. Beringer, J. R. Skuza, W. A. Oliver, C. Clavero, C. E. Reece, R. A. Lukaszew，《用于超导射频腔应用的铜表面铌薄膜沉积研究》，Phys. Rev. ST Accel. Beams 15 (2012) 062002。doi:10.1103/PhysRevSTAB.15.062002。[12] A. R. Wildes, J. Mayer, K. Theis-Brohl，《蓝宝石上外延铌的生长与结构》，《薄固体薄膜》401 (2001) 7–34。doi:10.1016/S0040-6090(01)01631-5。

[13] Q. Liu, L. Zhang, L. Cheng, J. Liu, Y. Wang, 铌涂层在碳化硅上的低压化学气相沉积，《应用表面科学》255（2009）8611–8615。 doi:10.1016/j.apsusc.2009.06.037.[14] Q. Liu, L. Zhang, L. Cheng, 铌涂层在石墨上的低压化学气相沉积，《Vacuum》85（2010）332–337。 doi:10.1016/j.vacuum.2010.07.006.[15] M. Miyake, Y. Hirooka, R. Imoto, T. Sano，铌在石墨上的化学气相沉积，《薄固体薄膜》63（1979）303–308。doi:10.1016/0040-6090(79)90033-6.[16] M. Ge, V. Arrieta, T. Gruber, J. J. Kaufman, M. Liepe, J. T. Manis- calco, S. McNeal, T. Oseroff, R. D. Porter, Z. Sun，康奈尔大学的化学气相沉积铜基底超导射频腔研究，载于：第19届国际射频超导会议（SRF2019）论文集，德国德累斯顿，2019年，第381页。 doi:10.18429/JACoW-SRF2019-TUFUB8.[17] R. Porter, D. L. Hall, M. Liepe, J. T. Maniscalco, V. Arrieta, S. Mc- Neal, B. Williams，通过化学气相沉积（CVD）制备的高性能铌薄膜，载于：第18届国际射频超导会议（SRF2017）论文集，中国兰州，2017年，第674页。doi:10.18429/JACoW-SRF2017-WEXA03.[18] J. Knobloch, R. L. Geng, M. Liepe, H. Padamsee，晶界处磁场增强导致超导腔中的高场Q斜率，载于：第9届国际射频超导会议（SRF1999）论文集，美国新墨西哥州圣菲，1999年，第77页。[19] C. A. Cooper, L. D. Cooley，通过机械抛光使超导射频腔表面达到镜面般光滑并修复缺陷，《超导科学与技术》26（2013）015011。 doi:10.1088/0953-2048/26/1/015011.[20] H. Tian, C. E. Reece, M. J. Kelley, S. Wang, L. Plucinski, K. E. Smith, M. M. Nowell, 针对超导射频（SRF）腔制造条件进行化学抛光的铌表面研究，《应用表面科学》253（2006）1236–1242。 doi:10.1016/j.apsusc.2006.01.083。

[21] H. Tian, S. G. Corcoran, C. E. Reece, M. J. Kelley，氢氟酸-硫酸电解液中铌电抛光的机理，《J. Electrochem. Soc.》155（2008）D563。 doi:10.1149/1.2945913.[22] K. Saito，超导腔电抛光技术的发展，载于：2003年粒子加速器会议论文集，2003年，第462页。 doi:10.1109/PAC.2003.1288950.[23] D. Landolt, P. F. Chauvy, O. Zinger，金属的电化学微加工、抛光与表面结构化：基本原理及新进展，《Electrochim. Acta》48（2003）3185–3201。 doi:10.1016/S0013-4686(03)00368-2.[24] D. Landolt，电抛光的基本原理，《Electrochim. Acta》32（1987）1–11。 doi:10.1016/0013-4686(87)87001-9.[25]T. Hryniewicz，电抛光过程中的微观平滑概念，《Surf. Coat. Technol.》64（1994）75–80。 doi:10.1016/S0257-8972(09)90006-8.[26] E. Luo，表面电荷密度关于表面曲率的分布函数，《J. Phys. D: Appl. Phys.》19（1986）1。 doi:10.1088/0022-3727/19/1/005.[27] H. Tian, C. E. Reece，铌电抛光过程中氟的扩散系数评估，《Phys. Rev. ST Accel. Beams》13（2010）083502。 doi:10.1103/PhysRevSTAB.13.083502.[28] A. Chandra, M. Sumption, G. S. Frankel，关于铌电抛光机理的研究，《J. Electrochem. Soc.》159（2012）C485。 doi:10.1149/2.054211jes.[29] J. Huo, R. Solanki, J. McAndrew，阳极层及其对块体铜和电镀铜薄膜电抛光的影响研究，《J. Appl. Electrochem.》34（2004）305。 doi:10.1023/B:JACH.0000015621.31360.14.[30] A. C. Crawford，铌射频腔的极端扩散限制电抛光，《Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A: Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip.》849（2017）5。 doi:10.1016/j.nima.2017.01.006。

[31] Z. Zhang、M. G. Lagally，《薄膜生长早期阶段的原子过程》，《科学》276（1997）377。 doi:10.1126/science.276.5311.377.[32] G. Ciovati、H. Tian、S. G. Corcoran，铌的缓冲电化学抛光，《应用电化学杂志》41（2011）721。 doi:10.1007/s10800-011-0286-z.[33]A. D. Batchelor、D. N. Leonard、P. E. Russell、F. A. Stevie、D. P. Griffis、G. R. Myneni，（100）、（110）和（111）面单晶铌的透射电子显微镜和二次离子质谱分析，《AIP会议论文集》927（2007）72。doi:10.1063/1.2770680.[34] C. Nico、T. Monteiro、M. P. F. Graca，铌氧化物和铌酸盐的物理性质：综述与展望，《材料科学进展》80（2016）1。 doi:10.1016/j.pmatsci.2016.02.001.