



电镀制造单晶铜

李廷举

大连理工大学材料科学与工程学院, 大连 116024

E-mail: tjuli@dlut.edu.cn

Production of single-crystal copper by electrodeposition

Tingju Li

School of Material Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

E-mail: tjuli@dlut.edu.cn

doi: [10.1360/TB-2023-0858](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0858)

金属及合金由于在力、热、电、磁等方面所具有的优异特性, 成为人类文明与技术进步的关键材料. 通常, 冶炼加工获得的金属与合金均为多晶, 存在各种取向的晶粒及大量晶界, 通过对冶炼及加工工艺的设计优化, 可以实现微观结构的调控, 进而获得能够满足实际应用的理想材料. 而在一些特定应用场合及高端应用领域, 晶界的存在往往会影响材料的具体表现, 如导电性、抗疲劳性、抗蠕变性能等. 因此, 单晶金属材料在很多领域都具有不可替代性, 而单晶金属的制备也是科学与工程研究重点关注的热点问题.

传统块体金属单晶是通过提拉法(Czochralski method)制备得到, 这一技术往往要求复杂、精细的工艺参数, 耗时长且良品率低, 因此获得的单晶材料价格昂贵, 应用场景有限. 电镀技术始于19世纪初, 是利用电解原理在金属表面沉积一

层其他金属或合金的过程. 经过200多年的发展, 电镀技术得到了长足的发展, 广泛地应用于各个领域. 在单晶衬底上外延电镀为获得高度有序的金属薄膜提供了一种经济高效的方法. 但是在传统外延电镀中, 随镀层厚度增加, 孪晶出现, 并进一步导致镀层结构向多晶转变, 使得传统单晶衬底上的外延电镀只能获得几微米厚的单晶薄膜^[1,2].

北京大学王恩哥、刘开辉团队及其合作者^[3]基于“原子台阶诱导晶格复制”的外延新思路, 提出使用高指数面单晶铜作为阴极实现单晶铜片的外延电镀, 相关研究成果发表于 *Science Bulletin*. 他们在前期工作中, 基于高温退火技术发展了A4尺寸大小、30余种晶面指数单晶铜箔的制备方法^[4,5]. 在本工作中, 他们以高温退火得到的高指数面单晶铜箔(25 μm 厚)作为阴极, 商用多晶铜板作为阳极, 在酸性硫酸铜

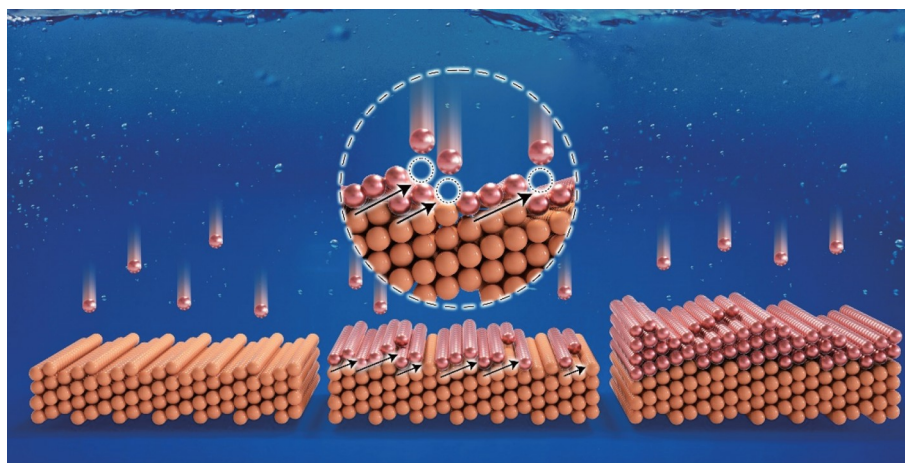


图 1 (网络版彩色)电镀制造单晶铜片原子示意图

Figure 1 (Color online) Atomic schematics of production of single-crystal Cu plate by electrodeposition

溶液中进行电镀。结果证明, 电镀铜在单晶铜表面实现同质外延生长, 完美地复制了高指数面单晶铜衬底的晶格取向。从原子尺度可以进一步理解为, 高指数单晶铜表面的原子台阶, 在电镀过程中成为天然、理想的“核”, 辅助铜原子的有序沉积, 大大减少缺陷、层错或晶格孪晶的形成, 成功解决了传统外延电镀过程中镀层缺陷积累导致镀层结构向孪晶以及多晶转变的问题, 实现单晶厚铜片的外延电镀(图1)。他们提出的“原子台阶诱导晶格复制”这一单晶铜外延电镀机制, 有望适用于其他金属或合金, 对发展单晶金属及合金的通用制备技术具有重要意义。

该工作针对传统单晶衬底上外延电镀只能获得几微米厚单晶金属薄膜这一问题, 创新性地提出了利用表面具有原子台阶的高指数面单晶衬底作为阴极实现毫米厚单晶铜片的外延电镀。一方面, 这项工作证明金属键外延与更为常见的共价键外延一样, 可以受到衬底有效调控, 为单晶金属及合金材料的外延制备提供了新的思路。另一方面, 该工作通过简单、易操作、低成本、可规模化的电镀技术实现单晶厚铜片的制备, 解决了单晶铜制备成本高、尺寸有限的问题, 极大地推动其在第五代移动通信技术(5G)中高速、大功率电路板以及柔性电路板、单晶靶材等领域的应用。

参考文献

- 1 de Cusminsky J B. The role of stacking fault energy in metal electrodeposition. *Scripta Metall*, 1976, 10: 1071–1073
- 2 Kozlov V M, Bicelli L P. Formation of structural defects during metal electrocrystallization. *J Cryst Growth*, 1996, 165: 421–428
- 3 Li X, Zhang Z, Zhang Z, et al. Production of single-crystal Cu plates by electrodeposition on high-index Cu foils. *Sci Bull*, 2023, 68: 1611–1615
- 4 Wu M, Zhang Z, Xu X, et al. Seeded growth of large single-crystal copper foils with high-index facets. *Nature*, 2020, 581: 406–410
- 5 Xu X, Zhang Z, Dong J, et al. Ultrafast epitaxial growth of metre-sized single-crystal graphene on industrial Cu foil. *Sci Bull*, 2017, 62: 1074–1080