材料基因组计划概述

赵朝阳1)

1) 北京科技大学……国家材料服役安全科学中心, 北京 100083

🖂通信作者, E-mail:2199474541@qq.com

摘 要 材料是社会发展的重要物质基础，材料创新是各种颠覆性技术革命的

关键词 材料设计; 材料基因组计划; 高通量实验平台; 高通量计算平台; 材料数据库;

分类号 UNKNOWN

Electrochemical Deposition

*ZHAO Zhaoyang*1)

1. National Center for Material Service Safety, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

🖂Corresponding author, E-mail:2199474541@qq.com

**ABSTRACT**

Developments and current situation on the studies of electrochemical deposition were outlined. The mechanisms and methods of electrochemical deposition, process condition and parameters and other influencing factors were introduced in this passage. The function of electrochemical deposition, the mechanisms of electrical crystallization, complexing and additive during the process of deposition was also included. New technology and research methods of electrochemical deposition and the relationship between the microstructure and performance of plating.

**KEY WORDS** electrochemical deposition; electrochemical crystallization; structure and performance of plating; film; coating material

1. 前言

电化学沉积是一门古老的技术。金属电化学沉积在19世纪早期如1840年即已出现银和金的镀覆专利。不久以后又发明了镀镍技术。电镀铬工艺至今也约有一个世纪。科学技术的不断发展和深入，电化学沉积的研究领域不断拓宽和扩展，已迅速地发展成为具有重大工业意义的一门技术，并已获得了巨大的成功。传统的电沉积过程，如Cu|Ni|Cr[1～4]，强调的是装饰性和防腐性。今天，具有特殊用途的镀层的研究、开发和应用则已成为核心内容。

现代电化学沉积研究的内容之一是新型、符合质量和技术要求的镀层及其叠层在电子工业中的应用。如线路板、接触器中采用Cu[2]、Ni[3]，或化学镀Ni-P[5,6]，Sn及其合金[7,8]，以及Au、Ag、Pd及其合金镀层[5,9～11]；微电子镀覆[12];半导体材料上镀覆[13]，以及磁记录介质和磁头中采用的磁性材料镀层[14]。所获得的镀层及其叠层必须达到符合要求的物理、机械和电性能如密度、硬度、延性、内应力和结合力、抗张强度、表面光洁度、孔隙率、组织结构、电阻率和接触电阻等。

1. 电化学沉积法

电化学沉积法既是一种化学过程，又是一种氧化还原过程。近年来，应用电化学沉积法成功地制备了金属化合物半导体薄膜、高温超导氧化物薄膜、电致变色氧化物薄膜及纳米金属多层膜，使这种新技术更加引起科研人员的高度重视。

电化学沉积法是一种电解方法镀膜的过程，它研究的重点是“阴极电沉积”。电化学沉积是在含有被镀金属离子的水溶液(或非水溶液、熔盐等)中通直流电，使正离子在阴极表面放电，得到金属薄膜[15]。

* 1. 沉积机理
     1. 阴极还原沉积机理

阴极沉积是把所要沉积的阳离子和阴离子溶解到水溶液或非水溶液中，同时溶液中含有易于还原的一些分子或原子团，在一定的温度、浓度和溶液的pH值等实验条件下，控制阴极电流和电压就可以在电极表面沉积出所需的薄膜。在通电的情况下，阴极表面首先生成很多OH-，金属离子与其作用生成金属氢氧化物沉淀，然后在特定温度下金属氢氧化物分解生成金属氧化物。有很多种方法可产生OH-，根据文献报道，以下3种方法最常用:

1) NO3-+H2O+2e-=NO2-+2OH- Eθ=0.01V(SHE)

2) O2+2H2O+4e-=4OH- Eθ=0.413V(SHE)

3) H2O2+2e-=2OH- Eθ=0.01V(SHE)

Switzer等提出的阴极还原沉积机理认为，在pH值小于7的溶液中进行阴极电沉积时，溶液的还原剂(如H2O，NO3-等)首先在电极表面还原，并形成OH-。随后，溶液中的金属离子或络合物与吸附在电极表面OH-发生反应，生成金属氢氧化物;金属氢氧化物进一步脱水生成氧化物薄膜，如ZnO在NESA玻璃上的阴极还原沉积过程。

* + 1. 阳极氧化沉积机理

阳极沉积一般在较高的pH值溶液中进行，一定电压下溶液中的低价金属阳离子在阳极表面被氧化成高价阳离子，然后高价阳离子在电极表面与溶液中的OH-发生反应生成各种薄膜。

大多数情况下，氧化物电沉积是按阴极还原机理进行的，只有少数氧化物的电沉积按阳极氧化沉积机理进行，因此，对该机理的研究较少。直到目前，对其认识程度还是落后于阴极还原沉积机理。DennisTench等提出，在pH值较高的溶液中，一定电压下，溶液中的低价金属阳离子在电极表面被氧化成高价阳离子，高价阳离子与电极表面溶液中的OH-发生反应，可生成氢氧化物或羟基氧化物，经过进一步脱水即生成氧化物[3]。

* 1. 沉积方法
     1. 恒电流法和恒电压法

电化学沉积法制备薄膜、涂层时按其所用电能的供给方式可分为恒电流法和恒电压法。恒电流法是采用恒电流电解，此法数学模型的理论分析较为简单。但是，恒电流法电解时，电极电位容易受外界影响而波动，因而得不到均匀的镀层，采用恒电压法可以避免上述问题。恒电压法是将电解时的电极电位恒定在某一值，使镀液中的金属离子发生电化学还原而析出;当电极电位恒定在另一值时，镀液中另一种金属离子还原析出。如此交替改变电位，以形成金属多层膜。

* + 1. 单槽法和双槽法

按沉积设备不同，电沉积方法分为双槽法、单槽法。双槽法是在含有不同电解质溶液的电解槽中交替电镀得到多层膜的方法。将阴极周期性地在含有不同金属离子的电解槽之间移动，交替电镀即可获得金属层和金属层周期性分布的多层膜。在双槽法中，单层厚度可以由电流和控制阴极在每一槽的驻留时间来决定，因为双槽法需将试样在不同电解槽之间移动，为避免两镀槽间的相互渗漏和相互污染，对设备要求较高，而试样不可避免地将产生表面氧化、溶解以及溶液改变期间的置换反应，所以现在很少采用。

目前，多层膜的制备大都采用单槽法。单槽法是将两种或几种活性不同的金属离子以合适的配比加入到同一电解液中，控制沉积电位或电流，使其在一定范围内周期性变化，得到成分和结构周期性变化的膜层。金属离子发生共沉积。实验中可以通过控制溶液中活性金属离子的浓度和电沉积条件，获得由纯金属层和含定量活性金属的合金层组成的金属多层膜。由于在该方法中，底材总是浸渍在电解液中，因而避免了镀液交叉污染的危险;同时通过控制电源和溶液传质等参数可以精确控制膜层结构，从而可实现膜层的功能设计;另外，它可以一次快速地沉积调制波长为1 nm的多层膜。

单槽法制备多层膜实际上是一个脉冲电沉积过程，为了获得相邻层的界面成分转变锐利的多层膜，必须保证在较短的脉冲期内获得锐利的电势转换。为了使层间过渡锐化，使用一种三脉冲技术，它是在高电流脉冲后引入一个短时的零脉冲。原位计算机控制及高速电量计将会进一步提高单槽沉积多层膜的质量。因此，单槽法也存在一定的缺陷，在脉冲关断时间内产生置换反应，由电位较正的金属置换电位较负的金属。研究结果表明，该置换反应形成的中间层将大大影响多层膜界面间组分，为减少这种影响，Joseph Yahalom等[16]针对Fe-Cu多层膜沉积，提出了如下解决方法:添加氯化物以抑制铁的溶解;添加光亮剂以改善Cu层在Fe地层上的横向生长;最有效的办法是在电位较负的金属的平衡电位附近沉积电位较正的金属。

* 1. 电解质体系

电化学沉积法按其所用的溶液种类可以分为水溶液电沉积、非水溶液电沉积和熔盐电沉积。水溶液电沉积是在水中溶解可溶于水的金属盐，电解该溶液进行薄膜沉积。通常说的电镀就是指这种水溶液的电沉积制备金属薄膜。非水溶液电沉积是在有机溶剂和无机溶剂中溶解金属盐，电解该溶液制备薄膜，目前制备超导氧化物薄膜多采用这种方法。熔盐电沉积是通过加热熔化金属盐类，然后电解熔化盐的方法来得到薄膜。研究表明，水溶液、有机溶剂和水-有机混合溶剂等3种体系均可作为薄膜的电解质溶液，它们有各自的优缺点和用途，其选用方法主要取决于要制备何种组成结构和性质的薄膜。

* + 1. 水溶液

把所需要沉积的阳离子和阴离子溶解在水溶液中，同时溶液中含有易于还原的一些分子或原子团，在一定的温度、浓度和pH值等条件下，控制电流和电压可在电极表面沉积出各种氧化物薄膜，大部分溶液体系为水溶剂体系。一般来讲，在水溶液体系中得到的沉积层较厚，沉积物容易聚集成较大的颗粒，而且由于水被还原放出氢气，沉积层呈多孔状，例如，铁电陶瓷和电致变色薄膜就主要在水溶液体系中沉积。

* + 1. 有机溶剂

将所需沉积的阳离子和阴离子溶解在有机溶剂中，再添加一些促进沉积的添加剂，即形成了有机溶液体系，该方法一般用于制备在水溶液中无法实现的或沉积效果不太好的氧化物薄膜。相对于水溶液体系，有机溶液体系研究和开发比较少，常用的有二甲亚砜、二甲基甲酰胺、乙腈等有机溶剂。例如，在有机溶液体系中，氧化物沉积层非常薄而且均匀，即可得到纳米级颗粒的精细氧化物薄膜。

* + 1. 水-有机混合溶剂

在有些氧化物的电化学沉积中，用单一的水溶剂或有机溶剂均得不到满意的氧化物薄膜，主要原因是要么金属离子在水溶液中不稳定，要么有机溶剂中缺少合适的还原剂，为了扬长避短，人们采用了水-有机混合溶剂体系，克服了两者的缺点，并成功地制备出了相关氧化物。例如，在电化学沉积ZrTiO4与光电陶瓷TiO2等含钛氧化物时，由于Ti离子在水溶液中不能稳定存在，会形成胶体钛盐，因此采用了水—有机混合溶液，使Ti离子能稳定存在于溶液中[17]。

* 1. 影响因素

薄膜电沉积的影响因素相当复杂，薄膜性能不仅取决于基体种类、电压、电流、温度、溶剂、溶液及pH值浓度、溶质浓度，而且还受溶液离子强度、电极表面状态等因素的影响。

* + 1. 电流和电位

各种薄膜只能在一定范围的电位和电流条件下才能得到，因为每种物质的氧化物还原均在一定条件下才能发生。通常过电位越大，沉积时所需电流密度也越大，恒电流沉积时过电位随时间延长而逐渐增大;恒电位沉积时，电流密度随时间延长而逐渐变小，无论是恒电流还是恒电位沉积，氧化物沉积量随时间延长逐渐增加。但只有在电化学沉积初期与理论值比较接近，以后随时间推移，二者偏差越来越大。

* + 1. 浓度

氧化物的沉积量受溶液浓度影响较大，在其他条件相同时溶液主盐含量越高氧化物沉积量就越大。此外，溶液浓度还对镀层的表面形貌、结构、组成及其他性质都有很大的影响。例如，在Pb(NO3)2的溶液中进行阴极电化学沉积时，当Pb(NO3)2浓度为0.2～0.5mol L时，沉积层主要是由金属Pb构成，溶液浓度为0.05～ 0.10 mol L时，沉积层则主要是由Pb(OH)2构成；Pb(NO3)2的浓度低于0.02mol L时，沉积层主要由β- PbO构成，随着溶液中Pb(NO3)2浓度的降低，沉积层的颜色也相应地呈现连续变化。

* + 1. pH值

在水溶液中进行电化学沉积薄膜时，pH值直接影响了电极上进行的电化学反应及随后在电极表面上进行的化学反应。通常，只有在一定的pH值范围内，各种薄膜才能在电极表面上沉积。当溶液的pH值不同时，从同一种溶液中可以沉积出组成和结构完全不同的氧化物产物。例如：在含有钙离子和磷酸根离子的溶液中，在Ti基体上沉积钙磷生物陶瓷时，pH值大于7，沉积产物主要为羟基磷灰石化合物(HAP)；pH值小于7，沉积层为含两个水的磷酸氢钙(CaHPO4·2H2O)；pH值在6.4～ 6.8，沉积产物为含8个钙的磷酸钙化合物[Ca8H2(PO4)6][18]。

1. 电化学沉积的应用
   1. 防护-装饰性镀层

传统的防护-装饰性Cu| Ni| Cr电沉积的研究不断深入，应用范围不断扩大。作为内层，Cu

和Ni的电沉积层已获得更加广泛的应用。许家园等[32]研究结果指出，酸性镀铜镀液中Cl-离

子加速Cu2+离子的放电反应并使后者按两个单电子步骤进行;铜沉积层呈立方结构Cu，镀液

中过量的Cl-也使镀层包含CuCl，Cu电沉积层中含有CuCl导致其电化学活性降低。经过努

力，科研组获得一种新型的光亮镀铜整平剂，整平能力优于国内大量使用的210型酸铜添加

剂。

葛福云等[33，34]，杨防祖等[35]较详细地研究添加剂的作用及对镍电沉积层结构与性能的影

响，指出苯磺酸钠较稳定，在电极表面吸附弱，对Ni沉积层的活性及织构影响很小。糖精和苯

亚磺酸钠在镍的电沉积过程中夹杂进镀层而形成含硫Ni，从而导致沉积层晶粒细化、显微硬

度提高和(111)晶面织构系数明显增大。含硫镍除了FCC结构外，还包括少量的非平衡态的六

方结构，在～200℃左右放热转化为FCC结构。含硫镍较无硫镍有较高的电化学活性，其原因

是:由于含硫镍中的硫改变了Fermi能级附近的轨道，使原来HOMO与LUMO之间增加一

新的能级，从而改变了含硫镍的反应活性，使之更易被腐蚀，且不钝化。黄令等[36，37]对Ni的电

沉积初期行为进行了深入研究，结果表明，Ni的电沉积经历成核过程，而不是欠电位沉积，沉积层为均匀的层状结构。H3BO3、Ce4+和Nd3+作用下，Ni的电结晶过程均遵从瞬时成核和三维

生长方式。H3BO3对晶体生长过程有明显的阻化作用，而Ce4+和Nd3+则对晶体生长有明显的促进作用。NdCl3能更有效地抑制析氢反应。

仿金、黄铜合金[38]、最白的金属之一铑[39]和枪黑色Sn-Ni合金的电镀拓宽了防护-装饰性

镀层的研究和应用范围。陈秉彝等[40，41]详细地研究了枪黑色锡镍合金电镀工艺、添加剂的研制和镀层性能。结果表明，采用自行研制的添加剂XSN，可以获得可直接工业生产、符合质量

要求的枪色镀层。改变镀层中金属比可获得高锡(75 wt% )、中锡和低锡，颜色分别呈现浅蓝黑

色、棕蓝黑色和深蓝黑色的合金镀层。添加剂XSN-2浓度、pH值、温度(<45℃ )和电流密度变化使锡含量有规律地变化。镀层的耐磨性和抗变色性不仅与锡含量有关，也与镀层厚度有关，

分别指出了获得了中等耐磨性、抗变色性的深枪黑色和高耐磨性、抗变色性的浅枪黑色镀层的镀液组成和工艺条件。

3。2代铬镀层

铬(VI)毒性大，是造成环境污染最严重和对人体健康危害最大的有害重金属之一。代铬镀层的研究已引起人们的重视。Ni-W、Ni-W-B和Ni-W-P合金可以作为符合部分性能要求的代铬镀层。黄令等[42～ 48]的研究结果表明，在以柠檬酸铵为络合剂的溶液中，可以获得与基底结合牢固，光亮且平整的Ni-W、Ni-W-B和Ni-W-P合金镀层。Ni-W-P(B)合金电沉积层较Ni-W有较低的电化学活性，它们的电结晶过程均遵从扩散控制瞬时成核三维生长模式，随着过电位的增加，电极表面上晶核数增多。由于W、B或P的存在使合金晶格产生扭曲、缺陷和胀大，引起正畸变，晶面间距增大。Ni-W合金电沉积层为纳米尺寸晶块结构，而Ni-W-P和Ni-W-B合金镀层呈非晶态结构。 Ni-W、Ni-W-P和Ni-W-B合金镀层的显微硬度随镀液组成和沉积条件变化而变化，一般分别在500～ 600、450左右和550～ 650 kg /mm2。在Ni-W-B合金电沉积过程中伴随着化学沉积镍等过程以及Na2B4O7在镀层中的夹杂;热处理过程中Ni-W和Ni-W-B合金发生晶粒粗化过程以及Ni-W-B合金发生新相形成过程，产生Ni4W和镍硼化物等沉淀物。热处理后Ni-W(400℃ ， 2 h)和Ni-W-B(500℃ ， 2 h)合金有最大显微硬度，分别为919。8和1132。2 kg /mm2。

3。3高择优取向电沉积层

金属和合金在电沉积过程中，电沉积层中有相当数量的晶粒表现出某种共同的取向特征，即产生择优取向现象。用高择优取向电沉积层替代单晶材料，如应用于制备超结构多层膜的基底镀层，无疑具有重要价值。许书楷等[49～ 55]经过研究，成功地获得了多种具有不同晶面择优的电沉积层。在酸性硫酸锌溶液中，由于KMnO4的中间吸附，控电位和控电流沉积可分别获得TC(0002)达99%和TC(1011)达97%的Zn电沉积层，氢在此两种晶面择优的镀层上过电位不同。在锌酸盐溶液中加入AA-1和DIE两种添加剂，可在2～ 4 A/dm2范围内获得TC(1120)>90%的高择优Zn沉积层，若同时又含有络合剂EDTA和TEA则可在2～ 6 A/dm2范围内获得TC(1120)为98%～ 99%的高择优Zn镀层，且此沉积层晶粒细密，表面光亮。在上述含有添加剂、络合剂的锌酸盐体系中引入NiSO4，在一定条件下可沉积光亮5。6% Ni-Zn合金，其相结构为η相，(100)晶面织构度高达94。3%。

在镍镀液中，1。9 mmol/L Ce(SO4)2的加入使Ni沉积层的结构更有规则，采取侧向生长模式，具有均匀的层状结构和类似单晶(TC(220)=92%～ 95% )的特征，并具有较好的耐蚀性。1。1 mmol/L NbCl3加入可使Ni沉积层的择优度由TC(220)=92%提高至94%。该沉积层作为电极在1 mol/L NaOH中表现出明显的催化氢放出的特性，氢析出超电势( i =100μA/cm2)与多晶Ni相比降低可达223 mV，交换电流密度提高7倍，达6。0× 10-4 A/cm2。

此外，高择优取向Ni电沉积层作为电极材料，在1。0 mol/L NaOH和分别为0。05 mol/L的甲醇、乙醇、丙醇和葡萄糖中有较高的电氧化催化活性[56]，控电位E=0。55 V(SCE)。其电氧化电流分别为无择优Ni的2、1。8、2和2。2倍。

3。4贵金属及其合金镀层

钯及其合金与金的某些性能相近，具有导电性好、化学稳定性高、白色外观以及抗蚀、耐磨和可焊等优良特性。它们在装饰行业和电子工业等领域得到了广泛的应用。在钯的电沉积中氢与钯极易共沉积，从而吸附、渗透和溶解于沉积层中，由于沉积层α、β相结构的变化和氢脆必然导致镀层产生高内应力，出现针孔和龟裂，严重影响钯镀层的物理和化学性能。杨防祖等[57～61]利用自行研制的添加剂，可在柠檬酸钾和草酸铵体系、电流密度0。5～ 3。5 A/dm2、温度40～ 60℃的宽范围内获得平整、光亮、电流效率达到92%的钯电沉积层。钯镀液有极佳的分散能力和覆盖能力。含有光亮剂的镀液中所获得的钯电沉积层氢含量较无添加剂的显著提高，适当的表面活性剂可极大降低镀层氢含量。采用一定方式的脉冲电镀可获得厚度达5μm以上且不脆的纯钯镀层。在电沉积初期，沉积层内应力变化较大，随后逐渐趋于稳定。钯电沉积遵循连续成核和三维生长的电结晶机理。

李凤凌[62]和杨防祖等[63]指出在一定工艺条件下，镀层中的Ni(或Co)含量随镀液中镍(或钴)离子浓度的增大而线性增加。根据需要可获得不同组成的Pd-Ni(或Pd-Co)合金电沉积层。分极化曲线测定说明合金电沉积钯对镍的电沉积起催化作用，而镍对钯的沉积起阻化作用。钯镍镀层比纯钯更容易用电化学法驱除镀层中的吸收氢。

佘沛亮[64]研究结果表明，钯铁合金镀层磁性测试，钯铁合金镀层中Fe的相对含量在64。1%时磁矫顽力出现一个极小值。不同组成钯铁合金镀层的垂直与平行两个方向的磁矫顽力差别不大。合金镀层的饱和磁感应强度Bs可能与镀层的晶粒尺寸有关。钯铁合金薄膜渗氢研究结果表明，随着极化电流的增加，氢的渗透电流和D值都增大。提高合金膜厚度将降低氢在薄膜中的扩散系数，并使D值也降低。

比较Pd /GC、Pt/GC和33。6 at% Pd-Pt/GC电极对乙醇电催化氧化活性。指出Pt/GC具有最高的催化活性，钯与铂的合金化则不仅能够提高电极的峰值电流密度，而且还能够延长电极的循环使用寿命。红外光谱实验结果则表明，乙醇在Pt/GC电极上的电催化产物为

CH3COO-。

电子工业飞速发展，电化学沉积新技术在该领域中的应用也不断扩大。目前，超大型(ULSI)封装技术的化学镀和电镀软金新工艺研究结果表明，铜引线线间距为30μm的软胶片，经化学镀Ni-P合金后，进行电镀或化学镀金，所获得的厚度为0。5～ 1。0μm的高纯度Au镀层不产生线间短路，线结合力(wire bonding test)高于5 g，达到工业要求。

3。5纳米结构电沉积层

采用电沉积技术制备纳米级微晶尺寸合金和超结构多层膜比物理方法有更加优越的特点，如可在常温下操作，可以简单地通过控制电流或电位和镀液的浓度来控制电沉积层的组成和膜的厚度。黄令[37]和李振良[65]成功地获得了Ni-Mo、Ni-Mo-P和Ni-W纳米晶合金镀层和Ni-Mo-PTFE、Ni-W-SiO2、Ni-W-SiC复合镀层。电化学阻抗测试结果表明Ni-Mo共沉积过程经历了吸附中间产物的步骤。在30%的KOH溶液中，温度为25℃时，Ni-Mo合金析氢过程按Volmer-Heyrovsky机理进行，析氢过电位比多晶镍电极降低246 mV。Ni-Mo-P较Ni-Mo合金镀层则有更好的析氢电催化活性。Ni-Mo-PTFE在NaOH溶液中对甲醇的电氧化具有催化

活性。

Ni-W合金沉积层经硫酸腐蚀后表面主要由NiO、Ni(OH)2、WO2、WO3构成，该钝化膜呈

多层结构。在距离表面1。5 nm处，镍钨均以单质态存在。相对于Ni-W合金，Ni-W-SiO2和Ni-

W-SiC复合镀层有更好的耐磨性和更低的电化学活性。

目前，在制备超结构多层膜过程中，首次提出以高择优取向Cu电沉积层作为磁性Pd /Co-

Pd超结构膜的基底镀层，在含有相对较低浓度钯盐和较高浓度钴盐的单槽电解液中，采用电

位或电流脉冲方法获得该多层膜。探索具有“巨磁阻”效应的该多层膜的形成机理和条件，以及

结构与性能。

3。6可焊性镀层

Sn及其合金作为可焊性镀层已获得广泛和深入的研究与应用。镀液中Sn2+离子的水解和氧化而严重地影响着其稳定性和镀层性能。姚士冰等[66]研究锡镀液中Ce3+离子的作用，结果证明电镀锡时并不发生Ce与Sn的共沉积，Ce3+离子的主要作用是阻止镀液中Sn2+离子的水解和氧化，达到稳定镀液的作用，因而得到的Sn镀层纯度提高，结构缺陷减少，且降低表层氧含量，改善Sn镀层的可焊性。

牛振江等对无铅可焊性锡和锡合金电沉积进行了研究，合成了一类新的钒化合物稳定剂，通过自然氧化和加速氧化的测试，表明该稳定剂对酸性镀锡溶液有很好的稳定作用，可使镀液的使用寿命提高5倍以上。电化学和光谱分析结果显示，起稳定作用主要是低价的钒化合物，低价钒化合物可有效地消除镀液中的溶解氧，防止镀液中亚锡离子的氧化。稳定剂还可改善酸性锡镀液的性能，提高电流效率，提高镀层的表面质量，使镀层表面更均匀致密，减小了表面的氧化层厚度，有利于提高镀层的可焊性。

4结语

电化学沉积法制备薄膜和涂层材料开辟了制备复合材料的新途径，由于该技术制备的复合材料具有显著的优点，正日益受到世人关注。目前，用电化学方法沉积的薄膜和涂层的品种不断增多，随着对沉积工艺改进和对反应机理的深入研究，薄膜和涂层的性能将不断提高，应用范围将不断扩大。

电沉积法虽然工艺简单，但影响因素却相当复杂，薄膜性能不仅决定于电流、电压、温度、溶剂、溶液的pH值及其浓度，还受到溶液的离子强度、电极的表面状态等因素的影响，尤其是用电沉积法制备理想的、复杂组成的薄膜材料较为困难。另外，对于基体表面上晶核的生成和长大速度不能控制，制得的化合物半导体薄膜多为多晶态或非晶态，性能不高。因此如何采用该方法制备高性能、高质量的薄膜及涂层材料将是今后研究的重点。

参 考 文 献

1. 汪洪， 向勇， 项晓东，等. 材料基因组——材料研发新模式[J]. 科技导报， 2015， 33(10):13-19.
2. 赵继成. 材料基因组计划简介[J]. 自然杂志， 2014， 36(2):89-104.
3. National Research Council. Integrated computational materials engineering: a transformational discipline for improved competitiveness and national security[M]. National Academies Press， 2008.
4. Curtarolo S， Morgan D， Ceder G. Accuracy of ab initio methods in predicting the crystal structures of metals: A review of 80 binary alloys[J]. Calphad， 2005， 29(3): 163-211.
5. Wang Y， Lv J， Zhu L， et al. Crystal structure prediction via particle-swarm optimization[J]. Physical Review B， 2010， 82(9): 094116.
6. Seiser B， Drautz R， Pettifor D G. TCP phase predictions in Ni-based superalloys: Structure maps revisited[J]. Acta Materialia， 2011， 59(2): 749-763.
7. 王海舟， 汪洪， 丁洪， 等. 材料的高通量制备与表征技术[J]. 科技导报， 2015， 33(10): 31-49.
8. Xiang X D， Sun X， Briceno G， et al. A combinatorial approach to materials discovery[J]. Science， 1995， 268(5218): 1738.
9. Potyrailo R， Rajan K， Stoewe K， et al. Combinatorial and high-throughput screening of materials libraries: Review of state of the art[J]. ACS combinatorial science， 2011， 13(6): 579-633.
10. Hanak J J. The “multiple-sample concept” in materials research: Synthesis， compositional analysis and testing of entire multicomponent systems[J]. Journal of Materials Science， 1970， 5(11): 964-971.