

# Au/Ni/Cu 多层薄膜热带海洋气候腐蚀失效机制研究

李云双<sup>1,2</sup>, 曹江利<sup>1</sup>, 姚文清<sup>2</sup>, 严楷<sup>1,2</sup>, 陈拥军<sup>3</sup>

(1. 北京科技大学 新材料技术研究院, 北京 100083; 2. 清华大学 化学系, 北京 100084;  
3. 海南大学 材料与化工学院, 海口 570228)

**摘要:** 目的 了解 Au/Ni/Cu 多层金属薄膜在热带海洋气候下的失效机制, 为研究电子元器件表面腐蚀失效的早期预警提供参考。方法 采用磁控溅射法在 p 型单晶 Si(100) 基片上沉积 Au/Ni/Cu 薄膜, 在热带海洋气候环境下进行时效实验, 采用原子力显微镜及俄歇电子能谱对薄膜失效表面与界面结构微观变化进行研究。结果 时效实验初期, Au/Ni/Cu 薄膜表面发生了 Au 原子聚集, 形成了不再连续的岛状结构, 岛与岛之间产生了表面微裂纹。随着时效时间的延长, 表面形成腐蚀洞, 腐蚀洞附近有 Ni 和 Cu 扩散至 Au 层表面。时效时间进一步延长后, 腐蚀洞的数量增加, 面积增大, 此时样品处于腐蚀末期; 与此同时, 在未产生腐蚀洞的区域, Au/Ni/Cu 薄膜界面未出现明显粗化。结论 Au/Ni/Cu 薄膜在热带海洋气候中的失效主要是通过表面产生的腐蚀洞进行的。

**关键词:** 金属薄膜; 热带海洋气候; 腐蚀失效; 表面缺陷; 界面结构

**中图分类号:** TG174.444; TG172.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2014)06-0043-05

## Study on Corrosion Failure Mechanism of Au/Ni/Cu Multilayer Film in the Tropical Marine Climate

LI Yun-shuang<sup>1,2</sup>, CAO Jiang-li<sup>1</sup>, YAO Wen-qing<sup>2</sup>, YAN Kai<sup>1,2</sup>, CHEN Yong-jun<sup>3</sup>

(1. Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Department of Chemistry, Tsinghua University, Beijing 100084, China;  
3. School of Materials and Chemical Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To investigate the failure mechanism of Au/Ni/Cu multilayer film in the tropical marine climate, so as to provide reference for the research on the early warning of corrosion failure in electron components. **Methods** In this study, magnetron sputtering was used to develop Au/Ni/Cu thin film on p type single crystal Si(100) substrate. The surface and interface structure changes of Au/Ni/Cu thin films in the tropical marine climate were studied using atomic force microscopy (AFM) and Auger electron spectroscopy (AES). **Results** In the early stage of aging treatment, Au atoms aggregated on the Au/Ni/Cu thin film surface and formed discontinuous island structure and micro-cracks around the islands. With the increase of aging time, Ni atoms and Cu atoms diffused to the surface of the Au layer near the corrosion holes formed in the films. As the aging time increased further, the number of the corrosion holes increased, and the corrosion hole area was enlarged, at this time the samples were in the terminal

收稿日期: 2014-08-01; 修订日期: 2014-08-25

Received: 2014-08-01; Revised: 2014-08-25

基金项目: 科技部创新方法工作专项(2012IM030500)

Fund: Supported by the Ministry of Science and Technology Innovation Project (2012IM030500)

作者简介: 李云双(1989—), 男, 河北人, 硕士研究生, 主要研究薄膜制备、表面处理及失效分析等。

Biography: LI Yun-shuang(1989—), Male, from Hebei, Master student, Research focus: films preparation, surface treatment and failure analysis.

stage of corrosion. In the meantime, no obvious coarsening was observed at the interface of Au/Ni/Cu thin film in the areas away from the corrosion holes. **Conclusion** The failure of Au/Ni/Cu thin film in tropical marine climate mainly proceeded through surface corrosion hole.

**KEY WORDS:** thin metal films; tropical marine climate; corrosion failure; surface defects; interface structure

集成电路中电互联或导电带均采用金属薄膜材料制作,各种厚膜和薄膜集成电路绝大多数都是在绝缘或者半导体基片上制作电路的<sup>[1]</sup>。以单晶硅为基底,采用磁控溅射法沉积 Au/Ni/Cu 多层金属薄膜,是电子元器件中应用较多的电互联薄膜材料体系<sup>[2-5]</sup>。金层起到防止氧化与腐蚀的作用,镍层在金层与铜层之间起到阻挡 Au 与 Cu 原子互扩散的作用<sup>[1-3]</sup>,铜层起到导电作用。

电互联薄膜材料广泛应用于军用及民用装备行业,服役环境复杂多样,前人已经开展了相关研究。例如,A. Tynkova 等人<sup>[3]</sup>研究了不同气氛下,低温热处理对 Au/Ni 薄膜结构的影响;严楷等人<sup>[6]</sup>研究了真空环境中,温度、紫外辐照以及微氧含量的单一因素及多场耦合作用对 Au/Cu/Si 薄膜界面结构的影响;D. Resnik 等人<sup>[7]</sup>研究了在不同的热处理温度变化过程中,Si 基底上 Au/Ni/Al 多层薄膜的镍原子扩散以及镍铝化合物生成;Ch. Lang 等人<sup>[8]</sup>采用三维原子探针技术,研究了 Cu/Co/Au 薄膜在不同衬底温度下的界面互扩散。在热带海洋气候环境中,电互联薄膜材料会受到多种环境因素耦合作用,有可能发生性能降级,甚至失效,从而严重影响元器件的使用寿命,最终导致整个器件失效,造成严重后果<sup>[9-12]</sup>。但国内外对于服役在热带海洋气候下的 Au/Ni/Cu 薄膜材料的腐蚀失效分析鲜有报道,还较缺乏热带海洋气候对 Au/Ni/Cu 薄膜表面与界面结构影响的深入研究。

文中针对磁控溅射法制备的 Au/Ni/Cu 多层金属薄膜,在热带海洋气候下进行现场时效研究,主要研究 Au/Ni/Cu 多层金属薄膜表面与界面的结构变化,在纳米尺寸上进行失效分析及表征,为进一步研究电子元器件表面腐蚀引起失效的早期预警提供有益的参考。

## 1 实验

### 1.1 镀膜及时效实验

镀膜采用美国 Lesker-LAD18 三靶磁控溅射系统,本底真空度  $2 \times 10^{-6}$  Pa,溅射气氛为 Ar 气,溅射压强为 0.5 Pa。基底采用 p 型单晶(100)面 Si 片,依次

溅射沉积 Cu 膜、Ni 膜和 Au 膜。其中溅射 Cu 膜和 Ni 膜时采用射频镀膜方式,溅射 Au 膜时采用直流镀膜方式。

将镀膜硅片裁成 1 cm×1 cm 的样品,用中性硅胶封边,固定于载玻片上,于海南省海口市进行为期 120 天的室内暴露时效实验。海口市位于北纬 20°1',东经 110°19',地处热带海滨,属于典型热带海洋气候,年平均气温约为 25.4 °C,全年日照时间高达 2500 多个小时,平均相对湿度约为 86%,盐雾浓度大,盐雾沉降率约 24%<sup>[13-15]</sup>。

### 1.2 表征及分析

1) 采用 VHX-KEYENCE 型光学显微镜观察薄膜宏观形貌。

2) 采用岛津公司 SMP-9600 型原子力显微镜(AFM)观察薄膜样品微区形貌及表面粗糙度。所用探针为 NSG10,扫描台规格 XY 轴最大为 30 μm,Z 轴最大为 5 μm,测试温度为 25 °C。

3) 俄歇电子能谱(AES)采用 PHI-700/SAM 型俄歇纳米扫描系统测得,用以分析薄膜样品表面成分与界面结构变化。其分析器为单通道筒镜能量分析器(CMA),分辨率为 0.1%。分析时,电子束电压为 5.0 kV,电流为 10 nA,电子束与样品表面入射角为 30°。分析室真空度优于  $3 \times 10^{-7}$  Pa。在深度剖析分析中,Ar 离子束电压为 2.0 kV,束流面积为 2 mm×2 mm,溅射速率通过热氧化的 SiO<sub>2</sub> 薄膜校正<sup>[16-17]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 Au/Ni/Cu 薄膜的表面结构

热带海洋气候下室内环境中时效的样品在光学显微镜下放大 100 倍的形貌见图 1。原始 Au/Ni/Cu 金属薄膜表面均匀致密(图 1a),在实验初期,样品表面宏观上未发生明显变化,见图 1b,c。随着时效时间的延长,样品表面逐渐出现腐蚀洞,见图 1d。时效时间进一步延长后,样品表面的腐蚀洞数量逐渐增多,面积逐渐增大,形成了较大的腐蚀坑,样品腐蚀进一步加剧,经过 20 天时效实验的样品表面已经出现金

属薄膜的凸起、剥落,此时处于腐蚀末期,见图 1e。

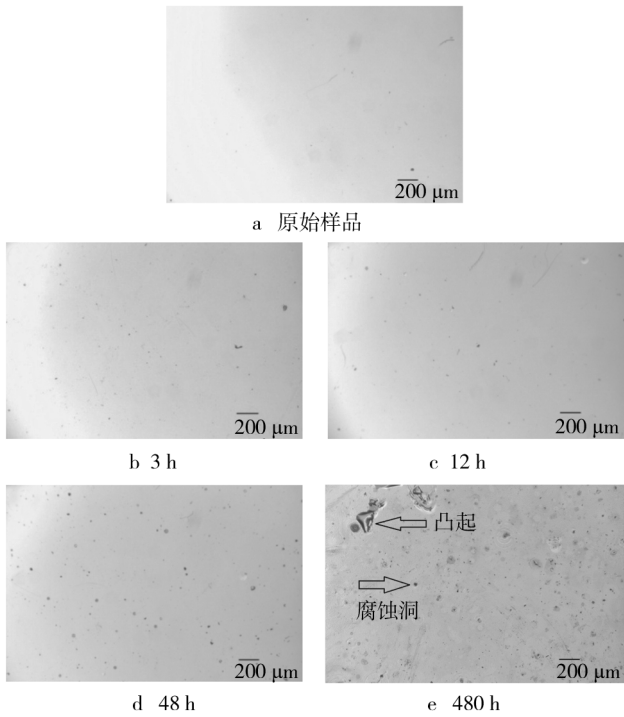


图 1 不同时效时间样品的光学显微镜照片

Fig.1 Optical microscopic images of film samples with different aging time

图 2 为不同时效时间薄膜样品的 AFM 形貌。如图 2a 可知,原始 Au/Ni/Cu 薄膜具有连续的岛状结构,即原始薄膜的形貌近似岛状,且岛与岛之间相连<sup>[18-19]</sup>,薄膜表面原子形成的颗粒尺寸大约为 20 ~ 50 nm。随着时效时间的延长,样品表面发生了 Au 原子聚集,晶粒长大,并且晶体内的缺陷增多,形成了不再连续的岛状结构,岛与岛之间产生了表面微裂纹,此时样品处于早期腐蚀,见图 2b,c。随着时效时间的进一步延长,表面结构变化明显,主要表现在表面细小微裂纹数量增多,颗粒的顶端聚集凸起,如图 3d 所示。当时效时间再进一步延长时,由图 3e 可见,表面顶端凸起的岛状颗粒数量明显增加,颗粒顶端凸起尺寸增大,表面细小微裂纹逐渐形成腐蚀洞,样品已处于腐蚀末期,见图 2e。

随着时效时间的延长,Au/Ni/Cu 金属薄膜表面粗糙度的变化如图 4 所示,图中表面粗糙度由 AFM 检测数据经统计处理所得。由图 4 可知,样品表面粗糙度最初随着时效时间的延长,增长较为缓慢,经过 240 h 作用时间后,表面粗糙度呈现明显增长趋势。由此认为,Au/Ni/Cu 薄膜在热带海洋气候室内环境下,随着时效时间的延长,样品表面细小微裂纹的数

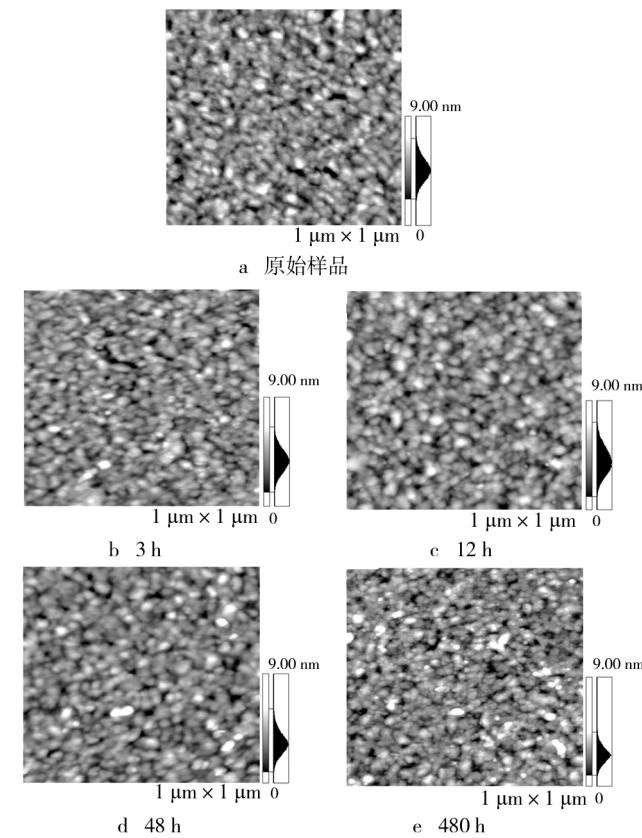


图 2 不同时效时间样品的 AFM 图

Fig.2 AFM images of film samples with different aging time

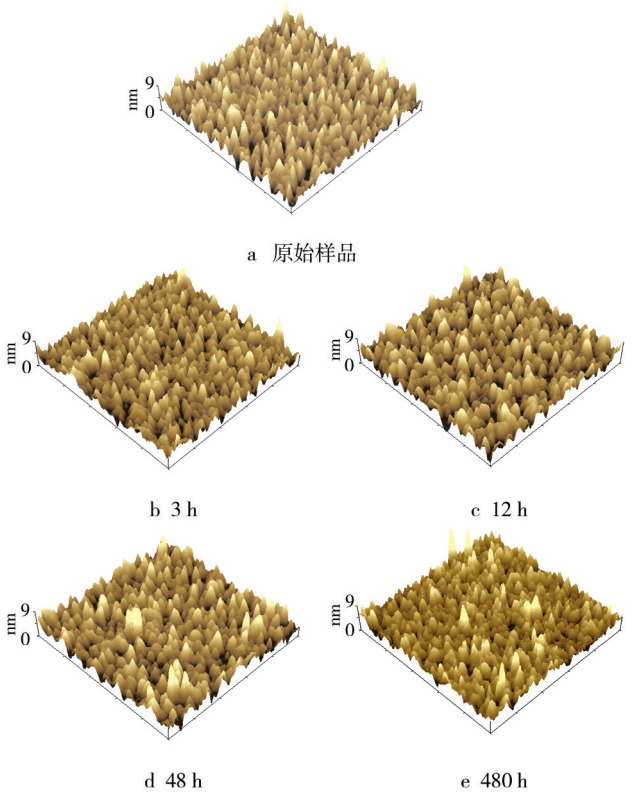


图 3 不同时效时间样品的 AFM 3D 图

Fig.3 AFM 3D images of film samples with different aging time



量增加,腐蚀洞逐渐形成并且呈现增长趋势,加快了 Ni 原子、Cu 原子向 Au 层表面及界面层的扩散,破坏了原始连续均匀致密的表面形貌,导致表面粗糙度明显增加。

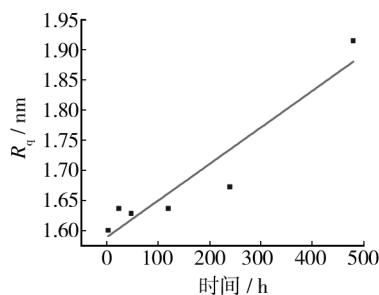
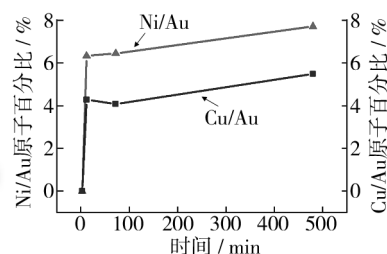
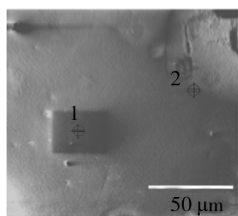


图4 样品表面粗糙度随时效时间的变化

Fig. 4 Variation of surface roughness ( $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$ ) with different aging time

## 2.2 Au/Ni/Cu 薄膜的表面成分

选取样品表面未产生腐蚀洞的区域 1 处和腐蚀洞口区域 2 处(图 5a),在俄歇电子能谱二次电子像 500 倍下进行成分分析,结果见图 5b。由图 5 可知,当时效时间为 12 h 时,Au/Ni/Cu 薄膜样品表面腐蚀洞口区域 Ni/Au、Cu/Au 原子百分比分别由 0 增加到 4.28%、6.33%。随着时效时间延长,Ni/Au、Cu/Au 原子百分比分别呈现平缓的上升趋势,逐渐增加至 5.49%、7.69%。与此同时,薄膜表面未产生腐蚀洞的区域未出现 Ni 和 Cu。由此认为,随着时效时间的延长,薄膜表面增多的细小微裂纹以及产生的腐蚀洞为 Ni 原子与 Cu 原子向表面扩散提供了通道,薄膜样品表面开始出现 Ni 原子和 Cu 原子;当时效时间进一步延长时,腐蚀洞数量增加且面积增大,加快了 Ni 原子和 Cu 原子向 Au 层表面及界面层的扩散,Ni/Au 和 Cu/Au 原子百分比也随之增加。不过随着时效时间的进一步延长,细小微裂纹与微观腐蚀洞增多,而促



a 成分分析位置(480 h 样品)

b 成分分析结果

图5 薄膜表面成分随失效时间的变化

Fig. 5 Variation of surface composition of thin film with different aging time

进 Ni 原子和 Cu 原子扩散的作用效果逐渐趋于平缓。

## 2.3 Au/Ni/Cu 薄膜的界面结构

图 6 是原始 Au/Ni/Cu 金属薄膜样品的 AES 深度剖析谱。根据国际标准 ISO 18115: 2001 (E) 对界面宽度进行量化处理<sup>[20]</sup>:将 Au/Ni、Ni/Cu 和 Cu/Si 界面上 Au、Ni、Cu 元素原子数分数为 84% 和 16% 的溅射深度之差分别定义为三个界面的宽度。由图 6 可见,样品具有清晰的层状结构,Au、Ni、Cu 层厚度分别为 69.4、130.2、139.9 nm。该样品 Au/Ni、Ni/Cu 和 Cu/Si 的界面宽度分别为 9.6、31.3、24.2 nm。

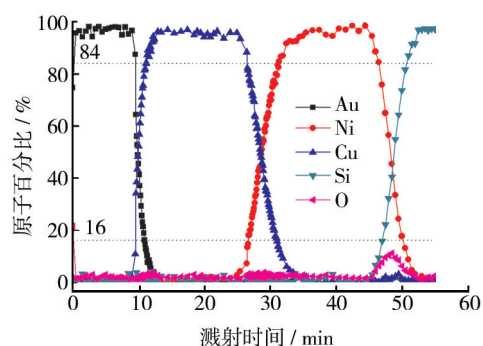


图6 原始 Au/Ni/Cu 薄膜样品沿深度方向的元素分布

Fig. 6 Element distribution diagram of the original Au/Ni/Cu film sample along the depth direction

在俄歇电子能谱二次电子像 500 倍下对图 5a 中未产生腐蚀洞的区域 1 进行分析,深度剖析薄膜早期微观腐蚀。图 7 显示,在未产生腐蚀洞的区域,Au/Ni 界面、Ni/Cu 界面宽度的变化较小,Au/Ni 方差为 0.242,Ni/Cu 方差为 4.36,界面宽度变化范围在俄歇电子能谱的误差范围之内<sup>[19]</sup>,可以认为并未发生界面粗化。

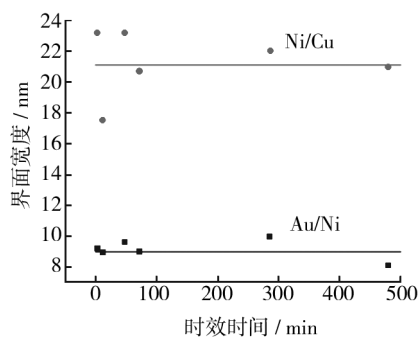


图7 薄膜界面宽度随时效时间的变化

Fig. 7 Variation of interface width with aging time

通过俄歇电子能谱对薄膜远离腐蚀洞的区域进

行深度剖析,可以了解 Ni 原子、Cu 原子向 Au 层表面的扩散情况。随着时效时间的持续延长,薄膜样品腐蚀程度加深,Au/Ni 和 Ni/Cu 界面宽度基本维持在一定范围内,Ni 原子和 Cu 原子向 Au 层表面的扩散并不明显。前期研究了紫外辐照条件下的情况,Au/Cu 薄膜界面结构出现粗化<sup>[4]</sup>,而本文针对室内现场条件的研究中则未出现这一现象,Au/Ni/Cu 薄膜在未产生腐蚀洞的区域,界面结构未发生明显粗化。Au/Ni/Cu 薄膜样品在未产生腐蚀洞的区域,表面形貌完整,保持了原始薄膜连续的岛状结构,岛状颗粒排列连续致密,表面未发生 Au 原子的聚集,晶体缺陷较少,表面细小微裂纹数量少,未形成腐蚀洞,不提供 Ni 原子与 Cu 原子向表面扩散的通道,因此阻碍了 Ni 原子、Cu 原子向 Au 层表面扩散,所以 Au/Ni/Cu 薄膜的界面结构未发生明显粗化。由此我们提出,Au/Ni/Cu 薄膜失效主要是通过表面的细小微裂纹和腐蚀洞发展的。

### 3 结论

在热带海洋气候室内环境下,Au/Ni/Cu 金属薄膜表面发生 Au 原子聚集,形成分离的岛状结构。岛与岛之间产生表面微裂纹,岛状颗粒顶端聚集凸起,最终随着时效时间的延长而形成腐蚀洞。腐蚀洞成为 Ni 原子与 Cu 原子向表面扩散的通道,引起进一步腐蚀失效,从而导致样品表面形貌破坏,表面粗糙度急剧增加。与此同时,在 Au/Ni/Cu 薄膜未产生腐蚀洞的表面区域,界面结构未发生明显粗化。

### 参考文献

- [1] POATE J M, TU K N, MAYER J W. Thin Films Interdiffusion and Reactions[J]. Journal of Polymer Science: Polymer Letters Edition, 1978, 17(1): 39.
- [2] DANYLENKO M I, KRAJINIKOV A V, VASILIEV M A. Analytical Electron Microscopy and Auger Electron Spectroscopy Study of Low-temperature Diffusion in Multilayer Chromium-Copper-Nickel-Gold Thin Films[J]. Thin Solid Films, 2003, 444(1/2): 75—84.
- [3] TYNKOVA A, SIDORENKO S, VOLOSHKO S, et al. Interdiffusion in Au (120 nm)/Ni (70 nm) Thin Films at the Low-temperature Annealing in the Different Atmospheres[J]. Vacuum, 2013, 87: 69—74.
- [4] 霍红英, 邹敏, 马光强, 等. 本底真空度对磁控溅射法制备 AZO 薄膜的影响[J]. 表面技术, 2013, 42(1): 75—77.

ence of Base Pressure on AZO Film Deposited by Magnetron Sputter Method[J]. Surface Technology, 2013, 42(1): 75—77.

- [5] 徐雪波, 贺耀华, 贺志勇, 等. 非平衡磁控溅射沉积不同成分 Ti-Ni 合金薄膜的伪弹性研究[J]. 表面技术, 2013, 42(4): 28—31.
- XU Xue-bo, HE Yao-hua, HE Zhi-yong, et al. Pseudoelasticity Behavior of Ti-Ni Alloy Film Deposited Using Unbalanced Magnetron Sputtering[J]. Surface Technology, 2013, 42(4): 28—31.
- [6] 严楷, 曹江利, 姚文清, 等. 真空环境多场耦合对 Au/Cu/Si 薄膜界面的影响[J]. 真空科学与技术学报, 2012, 33(8): 766—770.
- YAN Kai, CAO Jiang-li, YAO Wen-qing, et al. Influence of Multi-field Coupling on Interface Structures of Au/Cu/Si in Vacuum[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2012, 33(8): 766—770.
- [7] RESNIK D, VRTACNIK D, ALJANCIC U, et al. Characterization of Sputter Deposited Au/Ni/Al Multilayers on Si Substrates[J]. Vacuum, 2010, 84(1): 224—227.
- [8] LANG Ch, SCHMITZ G. Microstructure-controlled Interdiffusion of Cu/Co/Au Thin Films in Vestigated by Three-dimensional Atom Probe[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 353(1/2): 119—125.
- [9] GUDZE M T, MELCHERS R E. Operational Based Corrosion Analysis in Naval Ships[J]. Corrosion Science, 2008, 50(12): 3296—3307.
- [10] MENDOZA A R, CORVO F. Outdoor and Indoor Atmospheric Corrosion of Non-ferrous Metals[J]. Corrosion Science, 2000, 42(7): 1123—1147.
- [11] INGELGEM Y V, HUBIN A, VEREECKEN J, et al. Investigation of the First Stages of the Localized Corrosion of Pure Copper Combining EIS, FE-SEM and FE-AES[J]. Electrochemical ACTA, 2007, 52(27): 7642—7650.
- [12] 龚鹏, 范真, 丁建宁, 等. 氮化铜薄膜制备中氮气比例对其结构及微观力学性能的影响[J]. 表面技术, 2013, 42(5): 15—18.
- GONG Peng, FAN Zhen, DING Jian-ning, et al. Effect of Nitrogen Partial Pressure on the Structure and Micro-mechanical Properties of Cu<sub>3</sub>N Film[J]. Surface Technology, 2013, 42(5): 15—18.
- [13] 唐少霞, 赵志忠, 毕华, 等. 海南岛气候资源特征及其开发利用[J]. 海南师范大学学报, 2008, 21(3): 343—346.
- TANG Shao-xia, ZHAO Zhi-zhong, BI Hua, et al. Hainan Climatic Characteristics and the Development and Utilization of Resources[J]. Journal of Hainan Normal University, 2008, 21(3): 343—346.

- relationship of Inhibition Efficiency with Heat of Adsorption and Lateral Interaction Energy of Adsorbed Molecules for Adsorption Inhibitor[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 1990, 10(4): 346—354.
- [5] 白玮, 李向红, 邓书端, 等. 吐温-40 对冷轧钢在盐酸溶液中的缓蚀作用[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2010, 22(3): 200—202.
- BAI Wei, LI Xiang-hong, DENG Shu-duan, et al. Corrosion Inhibition of Tween-40 for Cold Rolled Steel in Hydrochloric Acid Solution[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2010, 22(3): 200—202.
- [6] ABD EL REHIM S S, HASSAN H H, AMIN M A. The Corrosion Inhibition Study of Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate to Aluminum and Its Alloys in 1.0M HCl Solution[J]. Materials Chemistry and Physics, 2002(78): 337—348.
- [7] 万家瑰. 酸化缓蚀剂与表面活性剂的协同效应评价[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(13): 3752—3754.
- WAN Jia-gui. Evaluation on Synergistic Effect of Acidizing Corrosion Inhibitor and Surfactant[J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(13): 3752—3754.
- [8] 郭英, 宋诗哲. 盐酸介质中 Tw-20 与聚丙烯酸对铁腐蚀的协同缓蚀作用[J]. 化工学报, 2001, 52(3): 262—265.
- GUO Ying, SONG Shi-zhe. Synergistic Inhibition of Tw-20 and Polyacrylic Acid on Iron Corrosion in Hydrochloric Acid[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2001, 52(3): 262—265.
- [9] 颜肖慈, 罗明道. 界面化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- YAN Xiao-ci, LUO Ming-dao. Interfacial Chemistry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [10] 董国君, 苏玉, 王桂香. 表面活性剂化学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.
- DONG Guo-jun, SU Yu, WANG Gui-xiang. Surfactant Chemistry[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009.
- [11] 王世荣, 李祥高, 刘东志, 等. 表面活性剂化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- WANG Shi-rong, LI Xiang-gao, LIU Dong-zhi, et al. Surfactant Chemistry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [12] 杨秀全, 徐长卿, 黄海. 一类新型多功能性表面活性剂: 烷基醚羧酸及其盐[J]. 日用化学工业, 1998(1): 26—33.
- YANG Xiu-quan, XU Chang-qing, HUANG Hai. A New Type of Multifunctional Surfactant Alkylether Carboxylic Acid and Its Salt[J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics, 1998(1): 26—33.
- [13] BINANA-LIMBLE W, ZAZA R, PLATONE E. Micellar Properties of Ethoxylated Sodium Alkylcarboxylates[J]. J Colloid Inter Sci, 1988(124): 647.
- [14] 唐红娇, 侯吉瑞, 赵凤兰, 等. 油田用非离子型及阴-非离子型表面活性剂的应用进展[J]. 油田化学, 2011, 28(1): 115—118.
- TANG Hong-jiao, HOU Ji-rui, ZHAO Feng-lan, et al. Application Progress of Nonionic and Anionic-Nonionic Surfactants Used in Oil Field[J]. Oilfield Chemistry, 2011, 28(1): 115—118.
- [15] 王军, 栾立辉, 杨许召, 等. 季铵盐双子表面活性剂的缓蚀性能研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2010, 22(3): 203—206.
- WANG Jun, LUAN Li-hui, YANG Xu-zhao, et al. Corrosion Inhibition Performance of a Cationic Gemini Surfactant HD-MB[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2010, 22(3): 203—206.
- [16] CAO C N. On Electrochemical Techniques for Interface Inhibitor Research[J]. Corros Sci, 1996, 38(12): 2073—2082.
- [17] HE Y, ZHANG J Z, YAO W Q, et al. Effect of Temperature on Residual Stress and Mechanical Properties of Ti Films Prepared by Both Ion Implantation and Ion Beam Assisted Deposition[J]. Appl Surf Sci, 2009, 255(8): 4484—4490.
- [18] KAWWAM M, ALHARBI F H, KAYED T, et al. Characterization of CuO(111)/MgO(100) Films Grown under Two Different PLD Backgrounds[J]. Appl Surf Sci, 2013, 276: 7—12.
- [19] SCUDIERO L, FASASI A, GRIFFITHS P R, et al. Characterization of a Controlled Electroless Deposition of Copper Thin Film on Germanium and Silicon Surfaces[J]. Appl Surf Sci, 2011, 257(9): 4422—4427.
- [20] ISO 18115:2001. Surface Chemical Analysis-Vocabulary[S].

(上接第 47 页)

- [14] 鲁远曙, 左卫, 王玉龙. 海洋性气候电子设备铝合金结构腐蚀防护研究[J]. 装备环境工程, 2008, 5(3): 71—75.
- LU Yuan-shu, ZUO Wei, WANG Yu-long. Research on the Corrosion and Protection of Electronic Equipment Aluminum Alloy Structure in Maritime Climate[J]. Materiel Environmental Engineering, 2008, 5(3): 71—75.
- [15] PECH-CANUL M A, CASTRO P. Corrosion Measurements of Steel Reinforcement in Concrete Exposed to a Tropical Marine Atmosphere[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(3): 491—498.
- [16] RAN J, ZHANG J Z, YAO W Q, et al. Properties of Cu Film and Ti/Cu Film on Polyimide Prepared by Ion Beam Techniques[J]. Appl Surf Sci, 2010, 256(23): 7010—7017.