

## 膜层材料与技术

## 化学镀锡中光亮剂 PPS、咪唑和 HD 在 Sn 表面的吸附作用实验与模拟研究

肖忠良<sup>1</sup>, 曾鹏<sup>1</sup>, 周朝花<sup>1</sup>, 夏妮<sup>1</sup>, 刘青<sup>1</sup>, 池振振<sup>1</sup>,  
吴道新<sup>1</sup>, 宋刘斌<sup>1</sup>, 曹忠<sup>1</sup>, 黄勇<sup>2</sup>, 周光华<sup>2</sup>(1.长沙理工大学 化学与生物工程学院 交通与电力材料保护湖南省重点实验室, 长沙 410114;  
2.奥士康科技股份有限公司 湖南省印制电路板(PCB)工程技术研究中心, 湖南 益阳 413054)

**摘要:** **目的** 研究以丙烷磺酸吡啶盐(PPS)、咪唑、己炔二醇(HD)为代表的三大类光亮剂,在化学镀锡过程中改善镀锡层表面形貌和影响镀速的作用机理。**方法** 采用电化学阴极极化法,研究化学镀锡过程中光亮剂分子对镀锡液在沉锡过程中对沉锡峰电位变化的影响,运用 Forcite 模块中的 COMPASS 力场进行分子动力学计算,研究光亮剂分子在 Sn 层表面吸附过程的能量变化。**结果** 阴极极化结果表明,光亮剂的加入会使沉锡峰电位负移,该过电位导致晶核水平增长速度大于垂直生长速度,从而起到整平作用,并在一定程度上抑制晶须的形成。分子动力学计算结果显示,PPS、咪唑、HD 均有自发吸附到 Sn 层表面的趋势,且在 Sn(111)面的吸附能分别为-445.338、-9.84、-22.651 kcal/mol,表明三种光亮剂分子均易吸附在 Sn 层表面(吸附能数据越低,越容易吸附在锡层表面),从而在一定程度上抑制锡层的生长。**结论** 光亮剂与 Sn 作用的吸附能,与其在化学镀过程中对 Sn 层表面形貌的改善和镀速减少有正相关作用。该研究为化学镀锡过程中光亮剂的选择提供了理论基础。

**关键词:** 化学镀锡; 吸附; 光亮剂; 分子动力学; COMPASS 力场; 吸附能**中图分类号:** TQ153.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)12-0270-07**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.12.036

## Adsorb-Ability Experimental and Simulation Study of PPS, Imidazole and HD on the Sn Surface in Electroless Tin Plating

XIAO Zhong-liang<sup>1</sup>, ZENG Peng<sup>1</sup>, ZHOU Zhao-hua<sup>1</sup>, XIA Ni<sup>1</sup>, LIU Qing<sup>1</sup>, CHI Zhen-zhen<sup>1</sup>,  
WU Dao-xin<sup>1</sup>, SONG Liu-bin<sup>1</sup>, CAO Zhong<sup>1</sup>, HUANG Yong<sup>2</sup>, ZHOU Guang-hua<sup>2</sup>

(1.Hunan Province Key Laboratory of Transportation and Electric Material Protection, School of Chemistry and Biological

收稿日期: 2018-03-09; 修订日期: 2018-05-19

**Received:** 2018-03-09; **Revised:** 2018-05-19**基金项目:** 国家自然科学基金(51604042, 51774051, 31527803, 21275022, 21545010, 21501015); 中国科学院环境监测 STS 项目(KFJ-SW-ST-173); 湖南省科技计划项目(2015GK1046); 湖南省战略性新兴产业科技攻关与重大成果转化项目(2015GK1046); 国家工业和信息化部、财政部绿色制造系统集成项目(2017-81); 长沙市科技计划项目资助(kq1701077, kq1706063)**Fund:** National Natural Science Foundation of China (51604042, 51774051, 31527803, 21275022, 21545010, 21501015), Chinese Academy of Sciences Environmental Monitoring STS Project (KFJ-SW-ST-173), Hunan province Science and Technology Plan Project (2015GK1046), the Hunan Province Strategic Emerging Industry Science and Technology Research and Major Achievement Transformation Project (2015GK1046), Ministry of industry informatization and Green Manufacturing System Integration Project of Financial Department (2017-81), Scientific and Technological Plan Project of Changsha (kq1701077, kq1706063)**作者简介:** 肖忠良(1964—), 男, 博士, 教授, 研究方向为材料电化学、腐蚀和防护。**Biography:** XIAO Zhong-liang (1964—), Male, Doctor, Professor, Research focus: corrosion and protection, materials electrochemistry.**通讯作者:** 吴道新(1971—), 男, 博士, 教授, 研究方向为无机功能材料。**Corresponding author:** WU Dao-xin (1971—), Male, Doctor, Professor, Research focus: inorganic functional materials.

Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2.Hunan Printed Circuit Board (PCB) Engineering Technology Research Center, Aoshikang Technology Co. Ltd, Yiyang 413054, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the effect mechanism of improving tin coating apparent morphology and influencing deposition rate by adding propane sulfonic acid pyridine salt (PPS), imidazole, 3-hexyne-2,5-diol(HD) as representatives of three types of brighteners during the process of electroless tin. The effect of brighteners on the peak potential change of tin deposition in tin plating bath was studied by electrochemical cathode polarization method. The molecular mechanics calculation method was carried out by COMPASS force field in Forcite model to explore the adsorption process of brighteners on the surface of Sn layer and. From the results of cathodic polarization, the addition of brightener could make the peak potential of tin deposition negatively shift. The over-potential caused the horizontal growth rate of nuclei to be greater than that of the vertical growth rate, thus leveling the Sn layer and inhibiting the formation of whiskers to a certain extent. Molecular dynamics calculation results demonstrated that PPS, imidazole and HD had a tendency to be spontaneously adsorbed to the surface of the Sn layer and the adsorption energy of PPS, imidazole and HD in the Sn(111) surface were  $-445.338$  kcal/mol,  $-9.84$  kcal/mol and  $-22.651$  kcal/mol, respectively. The molecules of three brighteners were more likely to be adsorbed on the surface of the Sn layer, thereby inhibiting the growth of the Sn layer to some extent. The adsorption energy of brightener on Sn surface has a positive correlation with the improvement of Sn's apparent morphology and reduction of plating rate during electroless plating and provides some theoretical basis for the selection of brightener.

**KEY WORDS:** electroless tin plating; adsorption; brightener; molecular mechanics; COMPASS force field; adsorption energy

随着电子产品越来越小型化,作为微细线路和微电子器件载体的线路板也日趋小型化,传统的热风整平工艺已经不能满足时代需要<sup>[1-6]</sup>。而电镀锡在线路板日趋精密化的今天,使用也受到一定限制,其关键原因在于镀液分散能力不好,镀层不均匀,同时电流密度变化会造成镀层成分变化较大。另外,电镀过程中需要加入大量的钢珠作为导电体,几乎 90% 的材料及能源都用在钢珠镀覆上,造成了极大的浪费<sup>[7-12]</sup>。而化学镀锡工艺具有镀液分散能力好、镀层金属平整、能耗少、适合小型产品批量生产等优点<sup>[13-15]</sup>。

化学镀锡工艺尽管有很多优点,但同样存在不少问题,如锡表面有黑色条纹或黑斑、表面粗糙等问题。针对这些问题,已有不少学者在文献中提到了相关的解决方案,如孙武<sup>[16]</sup>采用 PPS 细化晶粒可提升锡表面质量,程骄<sup>[17]</sup>添加 HD 能得到光亮洁白的镀层,苏传港等<sup>[18]</sup>采用咪唑可以得到光亮平整的镀层。虽然上述学者采用光亮剂都得到了效果较好的镀锡层,但是对于光亮剂在镀锡过程中的作用机理探讨尚未见报道。

本文从化学镀锡中光亮剂的作用出发,通过电化学阴极极化方法测试光亮剂在 Sn 表面吸附而导致的电极电位变化,并对 COMPASS 力场进行分子动力学计算,探讨其改善 Sn 表面观形貌及影响镀速的作用机理。

## 1 实验

### 1.1 化学镀锡基础配方

碱液(除油): 15 g/L NaOH, 20 g/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 50 g/L  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ , 5 g/L  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , 1 mL/L OP-10。酸液: 7 mL/L 98% $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 100 g/L  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 。沉锡液: 20 mL/L 甲

基磺酸亚锡, 50 mL/L 甲基磺酸, 1 mL/L OP-10, 90 g/L 次亚磷酸钠, 100 g/L 硫脲, 1 g/L 光亮剂(PPS、咪唑、HD), 1.5 g/L 对苯二酚。所有药品均为分析纯。

### 1.2 试样的制备

本实验选用  $2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 0.01\text{ cm}$  铜片作为镀锡基体。首先将基体浸入碱液中,温度  $50 \sim 75\text{ }^\circ\text{C}$ , 时间 5 min。而后用去离子水洗净,再将基片浸入酸液中,温度  $30 \sim 40\text{ }^\circ\text{C}$ , 时间 2 min。取出后用纯水洗净,并将处理过的基片投入沉锡液中,温度  $(50 \pm 2)\text{ }^\circ\text{C}$ , 时间 10 min。最后用去离子水洗净,并用热风吹干。所有溶液都在用之前最新配制。

### 1.3 镀层表面性能测试

镀层厚度采用荧光测厚仪(韩国微先锋 XRF-2000L)进行测量,其精确度为  $2.5 \times 10^{-4}\text{ }\mu\text{m}$ , 计算出锡的沉积速率为:

$$v = D/t \quad (1)$$

式中:  $v$  为镀层沉积速率 ( $\mu\text{m}/\text{min}$ );  $D$  为镀层厚度 ( $\mu\text{m}$ );  $t$  为施镀时间 (min)。

根据 GB/T 5270—2005,利用宽度为 25 mm 左右、具有 8 N 结合力的 3M 胶带做 Sn 层剥离实验<sup>[19]</sup>,根据粘结胶带上所粘金属粉末的多少来判断结合力大小,共分五级: 5 级为粘结胶带上无金属层剥落或金属粉末; 4 级为粘结胶带上微量锯齿状金属层剥落或金属粉末; 3 级为粘结胶带上少量锯齿状金属层剥落或粉末; 2 级为粘结胶带上大量锯齿状金属层剥落或金属粉末; 1 级为粘结胶带上绝大部分区域有锯

齿状金属层剥落或金属粉末。

采用日本日立公司 S-4800 型 SEM 仪,对镀层表面形貌、颗粒大小、均匀性进行分析,放大倍数为 3500 倍<sup>[20]</sup>。

#### 1.4 阴极极化测试

采用三电极体系电化学工作站 (CHI760, 上海辰华仪器公司) 对镀液进行阴极极化测试,以 2 cm×2 cm 的铜片为工作电极,甘汞电极为参比电极, Pt 电极为对电极。初始电压设置为 0 V,终止电压设置为 -1.2 V,扫描速度为 0.01 V/s。所采用的基础液配方为 30 mL/L 甲基磺酸亚锡+50 mL/L 甲基磺酸+1.5 g/L 对苯二酚。光亮剂质量浓度为 1 g/L。测试沉

锡峰电位。

#### 1.5 分子动力学计算

光亮剂分子的初始构型采用 MS 软件包中的 Visualizer 模块进行构建,并利用该软件中的 Dmol3 模块,在不施加任何对称性限制的条件下优化分子构型。运用密度泛函理论广义梯度近似 GGA-PBE 交换关联函数及加极化函数展开的双数值基组 (DNP) 处理价电子波函数,对体系中所有原子进行全电子计算,热拖尾效应和实空间的截断半径分别采用 0.005 Ha 与 0.048 nm,以改进计算,所有计算都考虑非自旋限制性<sup>[21]</sup>。所构建的三种光亮剂分子优化几何构型如图 1 所示。

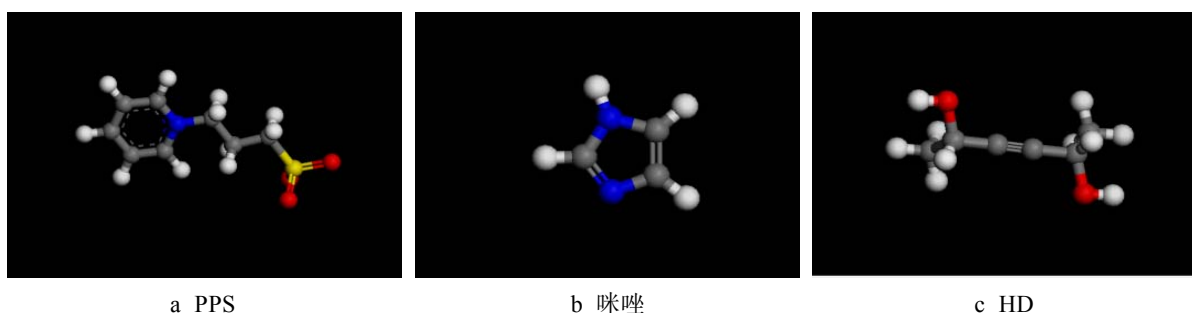


图 1 3 种光亮剂分子的优化构型

Fig.1 Optimization configuration of the molecule of three brighteners (fig.b imidazole)

采用三维周期性的平板结构代替无限大的 Sn 表面,选择 Sn 最稳定的低米勒指数面(111)面作为研究对象。首先导入 MS 中自带的纯 Sn 晶胞模型,利用 Build 模块中的 Cleave 工具,切割出 Fractional 中 Top 值为 1.0、厚度为 3.0 的 Sn(111)面,并建立  $U=8$ 、 $V=3$  的超晶胞,超晶胞参数为  $a=36.72$ ,  $b=13.77$ ,  $c=8.43$ 。在超晶胞上层构建 2.5 nm 的真空层,以确保周期性结构之间无相互作用,平板结构的底层原子固定在原位,其他所有原子均保持自由状态。所构建的 Sn(111)面的超晶胞几何构型如图 2 所示。

采用 MS 中的 Amorphous Cell Tools 工具,建立三个分别含有两个光亮剂分子的无定形盒子,并调整

其尺寸让其长宽与 Sn(111)超晶胞尺寸一致,最后利用 Build 模块中的 Build layers,将 Sn(111)超晶胞与光亮剂无定形盒子叠加所得的几何结构如图 3 所示。

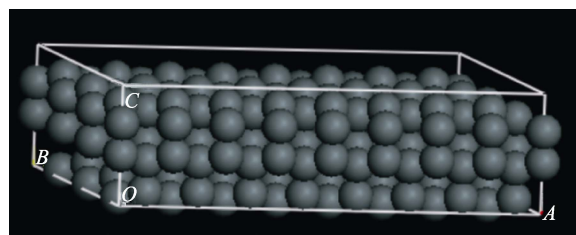


图 2 Sn(111)面的几何构型

Fig.2 Geometrical configuration of Sn(111)

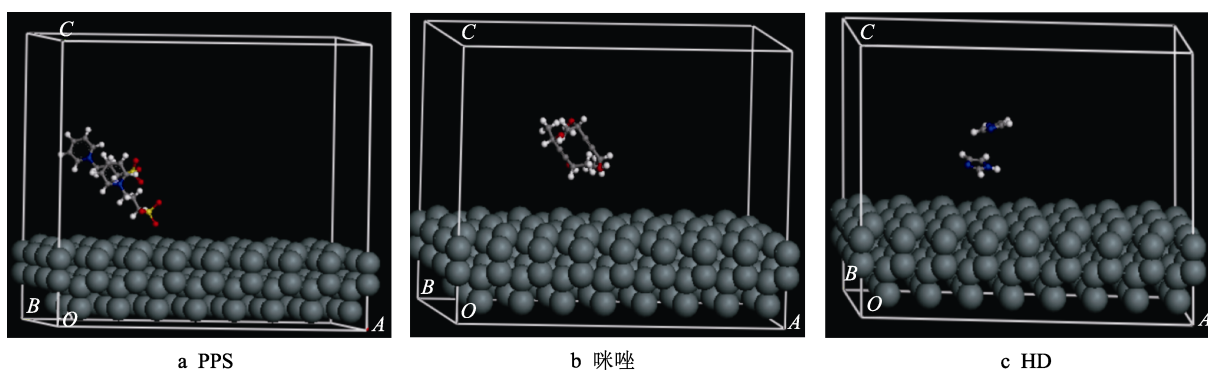


图 3 Sn(111)面超晶胞与光亮剂无定形盒子叠加后的几何构型

Fig.3 Geometric configuration of Sn(111) surface supercell superimposed with amorphous boxes of brightener (fig.b imidazole)

采用 Forcite 模块中的 dynamic 对建立好的模型进行动力学计算,设置模拟温度为 348 K,时间为 200 ps,步长为 1 fs,系综为 NVT,力场为 COMPASS。文中吸附能的定义为<sup>[22]</sup>:

$$E_{\text{interaction}}=E_{\text{total}}-E_{\text{surface}}-E_{\text{brightener}}$$

(2)

式中:  $E_{\text{total}}$  为解除固定原子后体系的总势能;  $E_{\text{surface}}$  为删除整平剂分子、解除 Sn 原子固定后的单独 Sn 表面的总能量;  $E_{\text{brightener}}$  为删除 Sn 原子后光亮剂分子的总能量;  $E_{\text{interaction}}$  为单个分子在表面上的作用能,即吸附能 (kcal/mol),其数值越低,表明越容易吸附在金属表面。一般情况下晶面被固定后,  $E_{\text{surface}}$  的能量值为零,因此  $E_{\text{surface}}$  可以忽略,则吸附能计算公式可简写为:

$$E_{\text{interaction}}=E_{\text{total}}-E_{\text{brightener}}$$

(3)

对吸附模型利用 Forcitetools|Analysis|Energy,可

计算出吸附模型的总能量  $E_{\text{total}}$ ,利用 Dmol3|optimization 对光亮剂分子进行结构优化,可得到  $E_{\text{brightener}}$ 。最后结合吸附能计算公式,可得到光亮剂分子在 Sn 层表面的吸附能。

## 2 结果与讨论

### 2.1 光亮剂对镀层金属厚度、外观、结合力的影响

1 g/L 的光亮剂 PPS、HD、咪唑对镀锡层厚度、外观、结合力的影响结果如表 1 所示。当加入光亮剂 PPS、HD、咪唑后,镀锡层表面质量明显提高,镀层厚度略有下降,在 0.9~1.05  $\mu\text{m}$  左右,对结合力基本没有影响,没有出现掉锡现象。

表 1 各种光亮剂对镀层的影响  
Tab.1 Effect of various brighteners on the coating

Additive	Concentration/(g·L <sup>-1</sup> )	Thickness/ $\mu\text{m}$	Appearance of tin surface	Adhesion strength
	0	1.27	Dark, black spot	Grade 4
PPS	1	0.92	Bright, uniform	Grade 4
HD	1	0.96	Bright, uniform	Grade 4
Imidazole	1	1.01	Slightly dark, uniform	Grade 4

总体来说,光亮剂的加入明显改善了镀层表面质量,且对厚度有略微的影响,但是仍然能满足工业上对镀锡层厚度的要求 (0.8~1.2  $\mu\text{m}$ )。图 4 表示镀速随时间的变化曲线。从图 4 可以看出,0~300 s 时,反应速率很快,随后逐渐降低。主要原因是沉锡反应在初始阶段为置换反应,而后为自催化还原沉锡。从图 4 中可知,光亮剂的加入会在一定程度上起到抑制 Sn 沉积速率的作用,且 PPS 对 Sn 沉积速率的影响最明显。

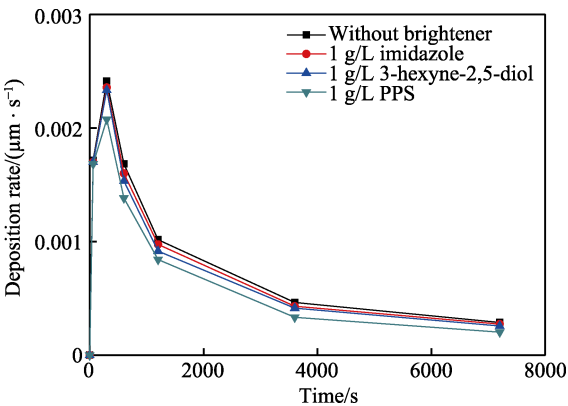


图 4 不同光亮剂作用下沉锡速率随时间的变化曲线  
Fig.4 Change curve of tin rate over time under different brighteners

### 2.2 光亮剂对镀层表面微观形貌的影响

光亮剂咪唑、HD、PPS 对镀锡层表面形貌的影响如图 5 所示,三种光亮剂都明显起到了整平作用,

其中 PPS 对表层金属的整平作用更明显。文献[23-24]认为,光亮剂在镀层金属凸面的吸附量较大,而在镀层金属凹面的吸附量较小,因而起到了平整作用。

### 2.3 电化学阴极极化分析

光亮剂咪唑、HD、PPS 的阴极极化曲线如图 6 所示,阴极极化扫描速度为 0.01 V/s。图 6b 为图 6a 中沉锡峰电位的扩展图。从图 6 可以观察到,基础液的沉锡峰电位为-0.633 V,而基础液加 PPS、HD、咪唑的沉锡峰电位分别为-0.660、-0.647、-0.645 V,分别负移了 0.027、0.014、0.012 V。可知三种光亮剂分子都能吸附在锡表面,但吸附程度并不大,根据晶核生长速度与过电位之间的关系,晶核的水平生长速度与过电位成正比,而晶核的垂直生长速度与过电位的平方成正比<sup>[16]</sup>。可以看出尽管过电位的增加加快了水平和垂直生长速度,但是水平生长速度比垂直生长速度增加更快,进而起到慢慢整平的作用。另外,三种光亮剂分子的加入明显提高了沉锡的电流密度范围,促进了锡的阴极还原作用。

### 2.4 光亮剂分子在 Sn(111)面的分子动力学计算

动力学计算结果如图 7 所示。由图 3、图 7 可以看出,光亮剂分子在该条件下有自发吸附到金属表面的趋势,即会吸附在锡层表面,对锡层的生长造成一定的抑制作用。



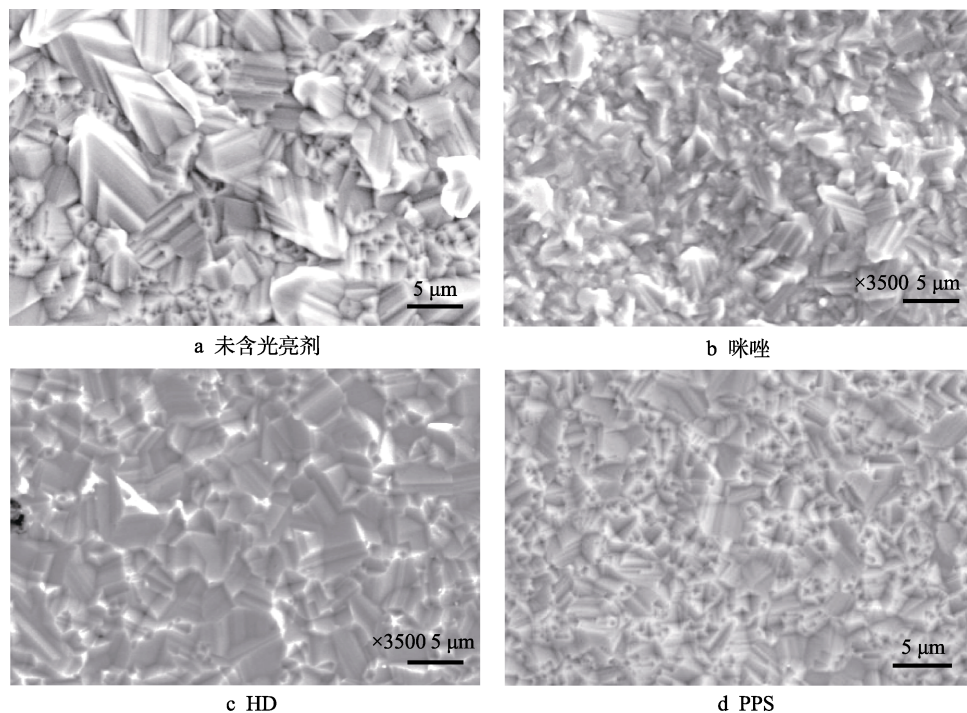


图5 不同光亮剂对镀锡层表面的影响 (3500×)

Fig.5 Effect of different brighteners on the surface of tin plating (3500×): a) without brightener, b) imidazole

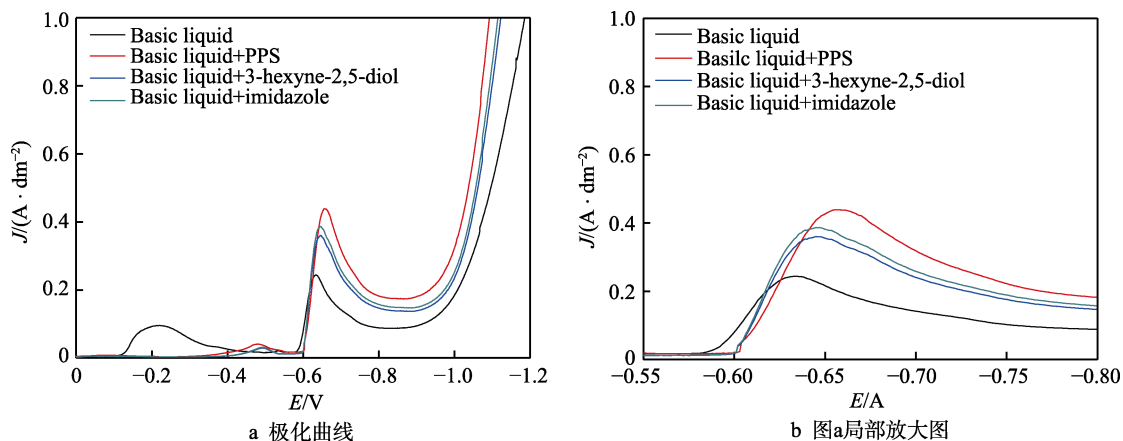


图6 三种光亮剂分子对镀液阴极极化曲线的影响

Fig.6 Effect of three kinds of brighteners on the cathodic polarization curve (a) and enlarge image of fig.a (b)

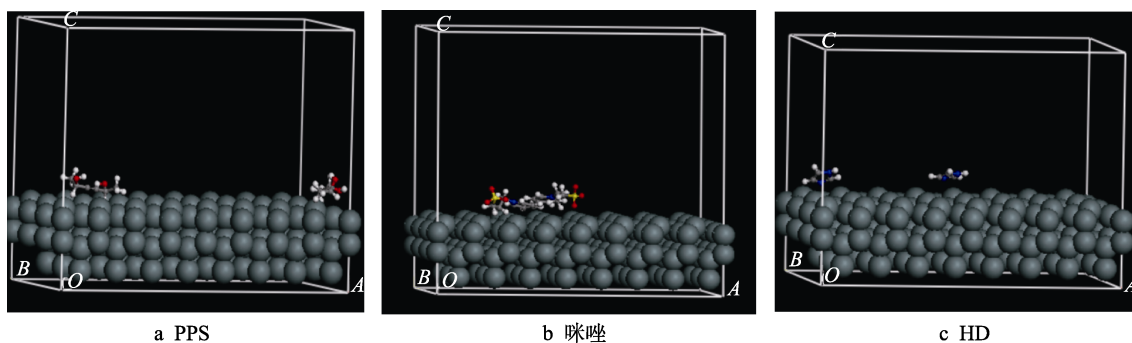


图7 PPS、咪唑、HD在Sn(111)面的吸附模型

Fig.7 Adsorption models of PPS (a), imidazole (b) and HD (c) on the surface of Sn(111) respectively

上述三种光亮剂分子在动力学模拟过程中的能量变化如图8—10所示。由图8—10可以看出,体系光亮剂分子由远离Sn层表面的能量较高的亚稳态转

变为吸附在锡层表面的能量最低的稳态,可以得出体系中光亮剂分子有自发吸附到Sn层表面的趋势,这符合热力学规律。

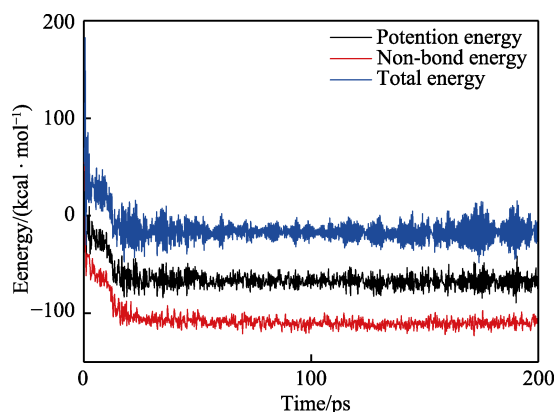


图 8 PPS 在 Sn(111)面的吸附模型的能量波动曲线  
Fig.8 Energy fluctuation curve of PPS in the adsorption model of Sn(111)

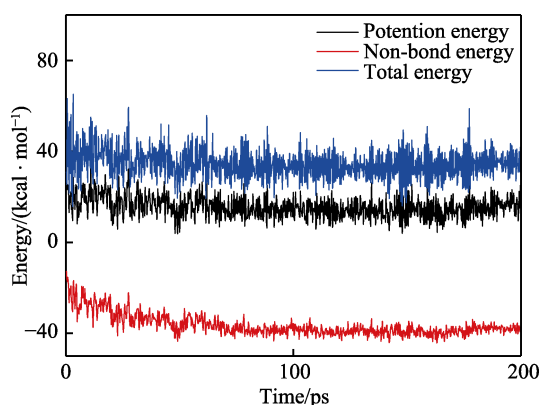


图 9 咪唑在 Sn(111)面的吸附模型的能量波动曲线  
Fig.9 Energy fluctuation curve of imidazole in the adsorption model of Sn(111)

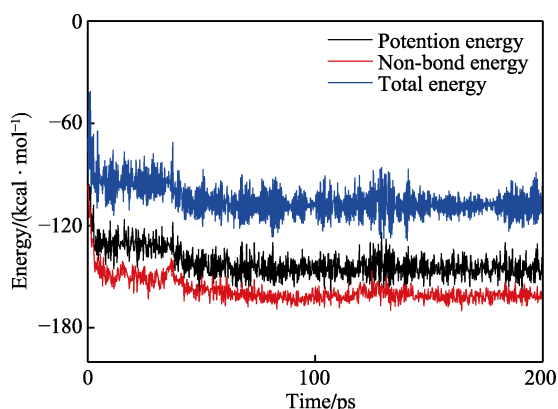


图 10 HD 在 Sn(111)面的吸附模型的能量波动曲线  
Fig.10 Energy fluctuation curve of HD in the adsorption model of Sn(111)

利用 Forcite tools|Analysis|Energy 计算出, PPS、咪唑、HD 在 Sn 表面吸附的总能量  $E_{\text{total}}$  分别为 426.551、43.528、-96.587 kcal/mol。利用 Dmol3|optimization 对 PPS、咪唑、HD 进行结构优化, 得到分子总能量  $E_{\text{brightener}}$  分别为 -18.787、33.418、-119.238 kcal/mol。然后利用公式计算出 PPS、咪唑、HD 的吸附能数据分别为 -445.338、-9.84、-22.651 kcal/mol,

即 PPS、咪唑、HD 吸附能分别为 445.338、9.84、22.651 kcal/mol。

从吸附能数据来看, PPS 吸附到 Sn(111)面释放的能量最多, 表明 PPS 更易吸附在锡层表面, 这就解释了 PPS 更能够抑制锡层厚度的增长, 使锡层厚度的增长更缓慢, 计算结果与前文的实验结果相符合。从达到平衡后的分子结构来看, 三种光亮剂分子的给电子基团均与锡表面近距离作用, 以“平躺”的方式吸附在锡表面, PPS 磺酸根、吡啶环中的 N 原子均参与吸附, 可能都给出电子与 Sn 原子中的空 d 轨道进行成键, HD 与咪唑则分别依靠碳碳三键上的电子、氧原子与氮原子上的孤对电子, 来与 Sn 原子的空轨道进行配位, 相关成键的详细信息有待进一步计算。

### 3 结论

1) 本文研究了以 PPS、咪唑、HD 为代表的三大类光亮剂在化学镀锡过程中对镀锡层的影响, 发现光亮剂的加入会对镀层厚度有一定的抑制作用, 同时能明显改善镀层的表面状况。

2) 通过分子动力学计算研究三种光亮剂分子在 Sn(111)面的吸附情况, 发现三种光亮剂分子都自发地以“平躺”的方式吸附于 Sn(111)面, 对锡层的增长起到一定的阻碍作用, 从而会适当降低镀锡层的厚度, 吸附能的大小与化学镀锡表面形貌的整平效果正相关。

3) 光亮剂分子的加入会使沉锡电位负移, 但是移动的幅度不大, 根据晶核的增长速率与过电位之间的关系, 该电位负移导致晶核水平增长速率的幅度比垂直增长速率的幅度大, 因此起到整平作用, 并在一定程度上抑制晶须的形成。

### 参考文献:

- [1] RAY U, ARTAKI I, VIANCO P T. Influence of temperature and humidity on the wettability of immersion tin coated printed wiring boards[J]. Components packaging & manufacturing technology, 1995, 18(1): 153-162.
- [2] 王军丽, 徐瑞东, 郭忠诚, 等. 化学镀锡工艺条件的优化[J]. 电镀与环保, 2002, 22(5): 13-16.  
WANG Jun-li, XU Rui-dong, GUO Zhong-cheng, et al. Optimization of the process conditions of electroless tin plating[J]. Electroplating & pollution control, 2002, 22(5): 13-16.
- [3] 孙武, 李宁, 苏晓霞, 等. 化学镀锡液中添加剂的影响研究[J]. 材料保护, 2007, 40(1): 35-38.  
SUN Wu, LI Ning, SU Xiao-xia, et al. Study on the influence of additelectroless tin plating solution [J]. Materials protection, 2007, 40(1): 35-38.
- [4] 徐瑞东. 酸性化学镀锡工艺及应用研究[D]. 昆明: 昆

- 明理工大学, 2002.
- XU Rui-dong. Study on process and application of acid electroless tin plating [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2002.
- [5] 张丽, 张彦. 化学镀的研究进展及发展趋势[J]. 表面技术, 2017, 46(12): 104-109.
- ZHANG Li, ZHANG Yan. Research progress and development trend of chemical plating[J]. Surface technology, 2017, 46(12): 104-109.
- [6] 王帅, 郭忠诚, 陈步明, 等. 镀锡的研究进展[J]. 材料保护, 2014, 47(5): 37-42.
- WANG Shuai, GUO Zhong-cheng, CHEN Bu-ming, et al. Research progress of tin plating[J]. Material protection, 2014, 47(5): 37-42.
- [7] 赵国鹏, 樊江莉, 温青. 化学镀可焊性锡基合金的研究进展[J]. 电镀与涂饰, 2001, 20(1): 46-49.
- ZHAO Guo-peng, FAN Jiang-li, WEN Qing. Progress of research on electroless plating of solderable tin alloy[J]. Electroplating & finishing, 2001, 20(1): 46-49.
- [8] 王钰蓉, 曹小云, 陈靓, 等. 温度对浸镀锡镀层的影响[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2015, 27(1): 32-36.
- WANG Yu-rong, CAO Xiao-yun, CHEN Liang, et al. Effect of plating temperature on immersion tin coating[J]. Journal of Changzhou University(natural science edition), 2015, 27(1): 32-36.
- [9] ZHAO J, LI N, CUI G, et al. Study on immersion tin process by electrochemical methods and molecular orbital theory[J]. Journal of the electrochemical society, 2006, 153(12): 499-502.
- [10] 段富良, 王梅. 铜基上化学镀锡工艺分析[J]. 云南化工, 2017, 44(6): 76-78.
- DUAN Fu-liang, WANG Mei. Process analysis of electroless tin plating on copper substrate[J]. Yunnan chemical technology, 2017, 44(6): 76-78.
- [11] 周栋, 王瑀, 丁毅, 等. 黄铜化学镀锡层性能的研究[J]. 电镀与环保, 2016, 36(2): 25-27.
- ZHOU Dong, WANG Yu, DING Yi, et al. Study on properties of electroless tin coating on brass[J]. Electroplating & pollution control, 2016, 36(2): 25-27.
- [12] 李振城. 硫酸亚锡在铜基上化学镀锡方法研究[J]. 当代化工研究, 2015(5): 70-71.
- LI Zhen-cheng. Tin sulfate in electroless tin plating on copper substrate method research[J]. Chemical intermediate, 2015(5): 70-71.
- [13] LOW C T J, WALSH F C. Electrode position of tin, copper and tin-copper alloys from a methane sulfonic acid electrolyte containing a perfluorinated cationic surfactant[J]. Surface & coatings technology, 2008, 202(8): 1339-1349.
- [14] FENG Q, FENG S, YANG W B, et al. Study on process and application of electrodeposited non-bright tin coatings[C]//Proceedings of the 7th national conference on functional material and applications. Xi'an: Science Research Publishing, 2010: 2171-2178.
- [15] LONG J M, ZHANG Z, GUO Z C, et al. Electrochemical study of the additive-effect on Sn electrodeposition in a methansulfonate acid electrolyte[J]. Advanced materials research, 2012, 460: 7-10.
- [16] 孙武. PCB 上化学镀锡工艺的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- SUN Wu. The research of electroless tin plating on PCB[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [17] 程骄. PCB 上镀锡工艺研究及其电化学过程探讨[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2010.
- CHENG Jiao. Study on tin-plating of PCB process and electrochemical behavior[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2010.
- [18] 苏传港, 苏燕旋, 苏传猛, 等. 铜及铜合金的化学镀锡液: 中国, CN101403112[P]. 2009-03-16.
- SU Chuan-gang, SU Yan-xuan, SU Chuan-meng, et al. Chemical plating of copper and copper alloys: China, CN101403112[P]. 2009-03-16.
- [19] 周泽翔, 程海斌, 薛理辉, 等. 改善化学镀层结合力的方法及其检测手段[J]. 材料导报, 2006, 20(2): 79-81.
- ZHOU Ze-xiang, CHENG Hai-bin, XUE Li-hui, et al. The method of improving and checking adhesion of coating electroless-plated[J]. Materials review, 2006, 20(2): 79-81.
- [20] 张景双. 电镀溶液与镀层性能测试[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- ZHANG Jing-shuang. Electroplating solution and coating performance[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
- [21] 廉兵杰, 石泽民, 徐慧, 等. 唑类缓蚀剂在铜表面的吸附机理[J]. 表面技术, 2015, 44(12): 19-26.
- LIAO Bing-jie, SHI Ze-min, XU Hui, et al. Adsorption mechanism of azole corrosion inhibitors on Cu surface[J]. Surface technology, 2015, 44(12): 19-26.
- [22] 黄晓华, 张相育, 吉青, 等. 应用分子力学研究表面吸附能的可行性[J]. 计算机与应用化学, 2007, 24(3): 375-379.
- HUANG Xiao-hua, ZHANG Xiang-yu, JI Qing, et al. Molecular mechanics (MM) study on the surface adsorption energy[J]. Com applied chemistry, 2007, 24(3): 375-379.
- [23] 丁运虎, 周玉福, 毛祖国, 等. 甲基磺酸亚光纯锡电镀添加剂的研究[J]. 材料保护, 2006, 39(3): 4-7.
- DING Yun-hu, ZHOU Yu-fu, MAO Zu-Guo, et al. The study on the additive of the pure tin electroplating methyl sulfonate[J]. Materials protection, 2006, 39(3): 4-7.
- [24] 封勇. 光亮酸性镀锡工艺综述[J]. 机电元件, 2005, 25(2): 32-36.
- FENG Yong. An overview of bright acid tin plating process[J]. Electromechanical components, 2005, 25(2): 32-36.