

蒸汽压力和超疏水纳米复合涂层对微电子器件可靠性的影响

樊学军^{1,2*}, 陈良彪¹, 汪正平³, Hsing-Wei Chu¹, 张国旗^{4,5}

摘要: 由于高蒸汽压力可能导致微电子器件在高温和高湿度环境中失效, 蒸汽压力的描述和模拟对研究微电子器件的湿度可靠性至关重要。为了最大程度地减小湿度的影响, 可以在器件外表面涂抹一层超疏水涂层, 以防止水分渗入。但是, 超疏水涂层提高微电子器件可靠性的具体机制目前仍没有完全被理解。本文首先介绍了微电子高分子材料蒸汽压力的现有的一些理论。笔者还根据实验结果论述了超疏水涂层在防止水蒸气进入器件方面的机制和有效性。本文重点讨论了两个理论模型: 基于微观力学的全场蒸汽压力模型和对流扩散模型。这两种方法都已成功用于说明无涂层样本的实验结果。但是, 当器件上涂有超疏水纳米复合涂层时, 笔者仍发现器件质量增加, 其原因很可能是水蒸气可以透过超疏水涂层渗入。这种现象导致人们对超疏水涂层的有效性产生怀疑。根据理论和实验结果, 笔者认为需要提出一种新的理论来理解水蒸气如何渗透超疏水涂层。

关键词: 蒸汽压力, 湿度, 半导体可靠性, 微机电系统 (MEMS), 超疏水, 纳米复合涂层

1 引言

由于微电子器件的各种部件在世界各地生产和制造, 微电子材料(如聚合密封剂和芯片粘结薄膜)在运输和贮存过程中必然会一定程度地从周围潮湿环境中吸收水分,

由此可能降低器件的可靠性, 并最终导致器件被破坏, 如材料老化[1]、吸湿膨胀、界面弱化和分层[2-4], 以及材料强度降低[5-7]。并且, 在回流焊过程中, 整个封装器件必然暴露在220~270 °C的极高温中。因此, 器件中的聚合物材料所吸收的水分将经历一个相变过程, 并产生极高的内部蒸汽压力。这样, 由蒸汽压力和热应力形成的组合应力会作用在聚合物材料上。一旦材料裂纹到达外表面, 蒸汽突然释放, 就会引起类似于爆米花的损坏[3]。

为了减少水分吸收和高蒸汽压力可能导致的损坏, 可以在封装器件表面涂抹诸如采用纳米复合涂层技术的超疏水(SH)涂层[8-12]。设计超疏水表面的一般规则是:

最大程度地减小表面能, 增大表面粗糙度。涂有超疏水材料的表面通常拥有极好的疏水性能, 其水接触角大于150°, 滞后角小于10°[8, 9, 13]。人们在很多天然材料(如荷叶)上都发现了类似表面[14]。这些表面通常具有结合了微纳米粗糙度和低表面自由能的涂层[15]。虽然超疏水涂层可能是一种低成本且高可靠的微电子器件封装涂层, 但是仍有资料表明超疏水涂层也具有吸湿性[16]。这种吸湿性的具体机制不能用目前的理论解释。

本文描述了预测聚合物内蒸汽压力的两种现有方法, 以便将蒸汽压力与超疏水涂层的有效性联系起来。笔者还论述了超疏水表面的形成方法, 然后论述了在各种环

¹ Department of Mechanical Engineering, Lamar University, Beaumont, TX 77710, USA; ² State Key Laboratory of Solid State Lighting, Beijing 100083, China; ³ School of Materials Science and Engineering, Georgia Tech, Atlanta, GA 30332-0245, USA; ⁴ Delft University of Technology, Delft 2600 AA, the Netherlands; ⁵ Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

* Correspondence author. E-mail: xuejun.fan@lamar.edu

Received 23 June 2015; received in revised form 4 July 2015; accepted 16 September 2015

© The Author(s) 2015. Published by Engineering Sciences Press. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

英文原文: Engineering 2015, 1(3): 384-390

引用本文: Xuejun Fan, Liangbiao Chen, C. P. Wong, Hsing-Wei Chu, G. Q. Zhang. Effects of Vapor Pressure and Super-Hydrophobic Nanocomposite Coating on Microelectronics Reliability. *Engineering*, DOI 10.15302/J-ENG-2015034

境条件下超疏水涂层的吸湿和吸水行为。

2 蒸汽压力模拟

高蒸汽压力被视为导致器件故障的主要原因(芯片粘结薄膜破坏如图1所示)。笔者采用模拟蒸汽压力和蒸汽流动来理解涂有超疏水纳米复合涂层的水分输送原理。对此,人们已提出很多理论模型来解决蒸汽压力和相关可靠性问题[17–20]。在以下论述中,笔者介绍了两种不同的方法。这两种方法都已成功用于说明实验数据的合理性。由于蒸汽压力总是与水分性状相关,所以蒸汽压力与水分浓度之间的关系是区分各种蒸汽压力模型的关键特性。

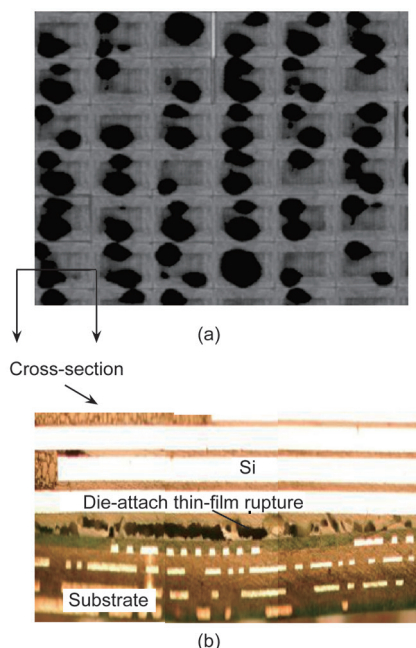


图1. (a) 6×6 阵列式芯片尺寸封装(CSP)组的扫描声学显微镜图像(黑色区域表示芯片粘结薄膜的损坏部位);(b)和基底连接的芯片粘结薄膜开裂和成洞示意图。

2.1 基于微观力学的全场蒸汽压力模型

全场蒸汽压力模型已被成功应用于解决许多微电子器件的破坏问题[19]。由于大多数微电子材料通常都是聚合物复合材料,所以该模型假设材料吸收的大多数水分通常聚

集在材料内的空隙或聚合物与微小填料的界面[16]。由于空隙内的水分密度远高于环境水分密度,所以材料内存在液态水[19]。因此,聚合物中存在两种状态截然不同的水,即纯气相水以及液相水与气相水的混合物,如图2所示。

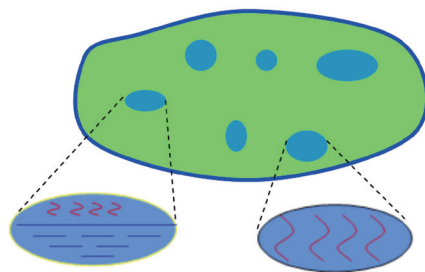


图2. 气孔中存在两种不同性状的水分的聚合物材料示意图[5]。

通过引入孔隙率 ϕ ,可以计算材料中吸收的水分密度(ρ):

$$\rho = C/\phi \quad (1)$$

式(1)中, C 为水分浓度(湿度)。水分浓度(湿度)可以通过基于菲克定律的瞬时湿度扩散方程获得。该方程为

$$\dot{C} = -\nabla \cdot (-D\nabla C) \quad (2)$$

式(2)中, D 为湿度扩散率。孔隙率通常是一种固有的材料特性,典型聚合物的孔隙率范围为1%~10%。

在计算蒸汽压力时,首先应确定孔隙中的水分性状。如果孔隙中仅含有蒸汽且蒸汽压力达到了饱和值,则可以根据理想气体定律计算饱和湿密度(ρ_g):

$$\rho_g(T) = \frac{p_g(T)}{RM(H_2O)T} \quad (3)$$

式(3)中, $p_g(T)$ 为规定温度下的饱和蒸汽压;气体常数 $R=8.314\text{J}\cdot(\text{mol}\cdot\text{K})^{-1}$;水的摩尔质量为 $M(H_2O)=18\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。通过比较 ρ 和 ρ_g 可以估算蒸汽压力:

$$p(T) = \begin{cases} \frac{RT}{M(H_2O)\phi} \cdot C, & \rho < \rho_g \\ p_g(T), & \rho \geq \rho_g \end{cases} \quad (4)$$

如果考虑由于温度变化而发生热

膨胀,那么水分浓度也会随着材料体积的变化而变化。可以通过以下关系式来计算材料体积变化:

$$dV/dV_0 \approx 1 + 3\alpha\Delta T \quad (5)$$

式(5)中, ΔT 为温差; α 为热膨胀系数。因此,膨胀后的水分浓度为

$$C = dm/dV = \frac{dm}{dV_0} \frac{dV_0}{dV} = C_0(1 - 3\alpha\Delta T) \quad (6)$$

式(6)中, dm 为水分质量; dV 为微单元体积。

上述全场蒸汽压力模型包括一个新的场变量 ϕ 。场变量 ϕ 代表孔隙体积率。很明显,能否准确推算出蒸汽压力取决于孔隙变形,且需要将蒸汽压力模型与固态变形联系起来。人们普遍认为,封装材料内微孔隙的增长和汇合将导致微电子器件内发生机械故障(如界面分层和“爆米花式”开裂)。

图3给出了使用全场蒸汽压力模型的例子。研究人员根据建模结果[6]鉴别出两个主要因素:回流焊温度曲线和基底厚度。研究表明,应合理设计回流焊温度曲线,以使其符合美国联合电子设备工程委员会(JEDEC)标准的要求并降低故障率。如图3(a)所示,回流焊温度曲线a(升温速率较慢)上存在水分由液/气二元混合态向单一蒸汽态转变的转折点,且由于温度升高导致水分损失,蒸汽压降进一步增大。相比之下,回流焊温度曲线b(升温速率较快)显示该条件下的水分一直维持着液/气二元混合态,如图3(b)所示。因此,回流焊温度曲线b条件下的蒸汽压力总是与饱和蒸汽压保持一致。该蒸汽压力随着温度的升高呈指数增长,当其最终增长达到材料的临界应力时,材料就会发生开裂。研究还发现,略微增加基底厚度可以加快水分逸散,从而降低材料破坏的可能性。这些发现已经被应用到增强材料可靠性的实践中[6]。

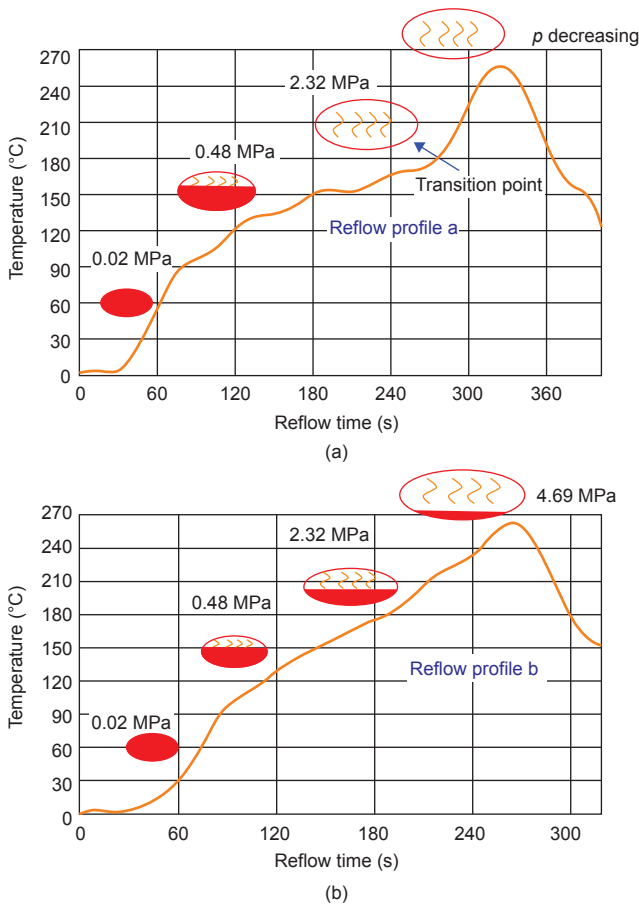


图3. 不同回流焊过程中蒸汽压力的变化 [6]。(a) 初始“低”温度变化率 的回流焊温度曲线 a; (b) 初始“高”温度变化率 的回流焊温度曲线 b。

2.2 对流 / 扩散蒸汽压力模型

在传统湿度扩散模型中，蒸汽压力对湿度输送的影响通常会被忽视。近来，为了同时考虑湿度扩散和蒸汽的流动，笔者提出了一个对流/扩散(CD)模型[18, 20]，并通过实验对其进行了验证。

在CD模型中，聚合物被视为一种由固体基质和孔隙组成的多孔介质。如图4所示，在固体基质内液态水溶解的同时，微孔隙中存在蒸汽流动。因此，湿度的扩散包括传统的在固体基质内的水分扩散和蒸汽在孔隙网络的流动。

根据图4，总水密度 ρ_m 可以描述为

$$\rho_m = \phi \rho_v + (1 - \phi) \rho_w \quad (7)$$

式(7)中， ρ_v 为蒸汽密度； ρ_w 为固体基质内的溶解水浓度。根据质量守恒定律，笔者得到包含蒸汽通量和扩散通量的方程：

$$\phi \frac{\partial \rho_v}{\partial t} + (1 - \phi) \frac{\partial \rho_w}{\partial t} = -\nabla \cdot [J(\rho_v) + J(\rho_w)] \quad (8)$$

式(8)中，蒸汽通量以 $J(\rho_v)$ 表示，且可以用达西定律

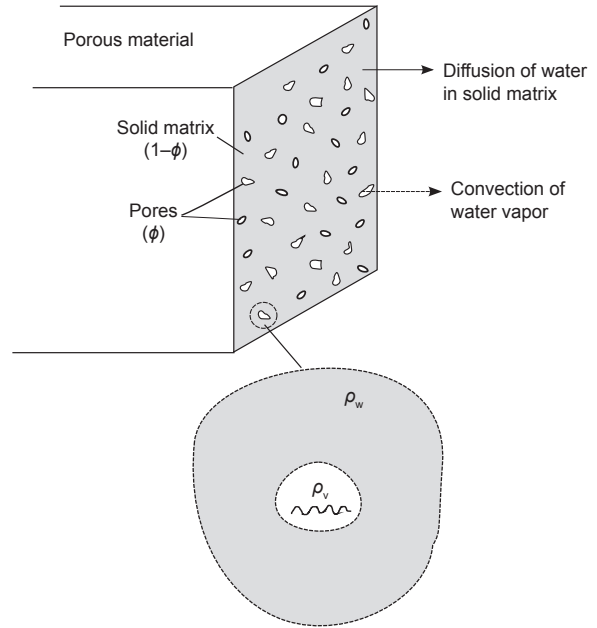


图4. 对流 / 扩散 (CD) 模型示意图 [18]。

描述：

$$J(\rho_v) = -\frac{\rho_v k}{\mu(T)} \nabla p = -\frac{pk}{R_w T \mu(T)} \nabla p \quad (9)$$

式(9)中， R_w 为水的气体常数($461.89 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$)； k 为蒸汽渗透率； μ 为取决于温度的蒸汽黏度。通常，渗透率 k 与孔隙率相关[21]，但与温度关系不大[22]。给定温度下的水蒸气的黏度可从手册中得到(如《CRC化学与物理手册》)。

对于固体基质内的湿度扩散，使用菲克定律，式(8)中的扩散通量 $J(\rho_w)$ 表示为

$$J(\rho_w) = -D(T) \nabla \rho_w \quad (10)$$

式(10)中，固体基质中的溶解水浓度 ρ_w 可以用亨利定律的液体和蒸汽之间的化学平衡说明[23, 24]：

$$\rho_w = Bp / p_g(T) \quad (11)$$

式(11)中， B 为材料特性。最后，将式(9)、(10)和(11)带入式(8)中，可以得到蒸汽压力模型：

$$\frac{\phi}{R_w} \frac{\partial (p/T)}{\partial t} + (1 - \phi) \frac{\partial (Bp/p_g)}{\partial t} = \frac{k}{\mu RT} \nabla \cdot (p \nabla p) + \frac{BD}{p_g} \nabla^2 p \quad (12)$$

本模型包含一个对流项和一个扩散项，因此该模型被称为CD模型。与全场蒸汽压力模型不同，CD模型可直接求解蒸汽压力。得到蒸汽压力后，可以用式(7)换算成水分浓度。在评估蒸汽压力(如在电子封装的回流焊过程中)时，直接求解出蒸汽压力可以更方便地设计聚合物

或聚合物成分。另外，由于蒸汽压力在不同介质或界面上是连续的，所以在处理多介质问题时无需正则化。与传统扩散模型相比，这是CD模型的方便之处。

图5给出了使用CD模型分析不同温度下的放湿数据的例子。如图5所示，在高温下，蒸汽流动效应增大(多达30%的水分损失来自蒸汽对流)；温度较低时，水分的运输主要以扩散为主。

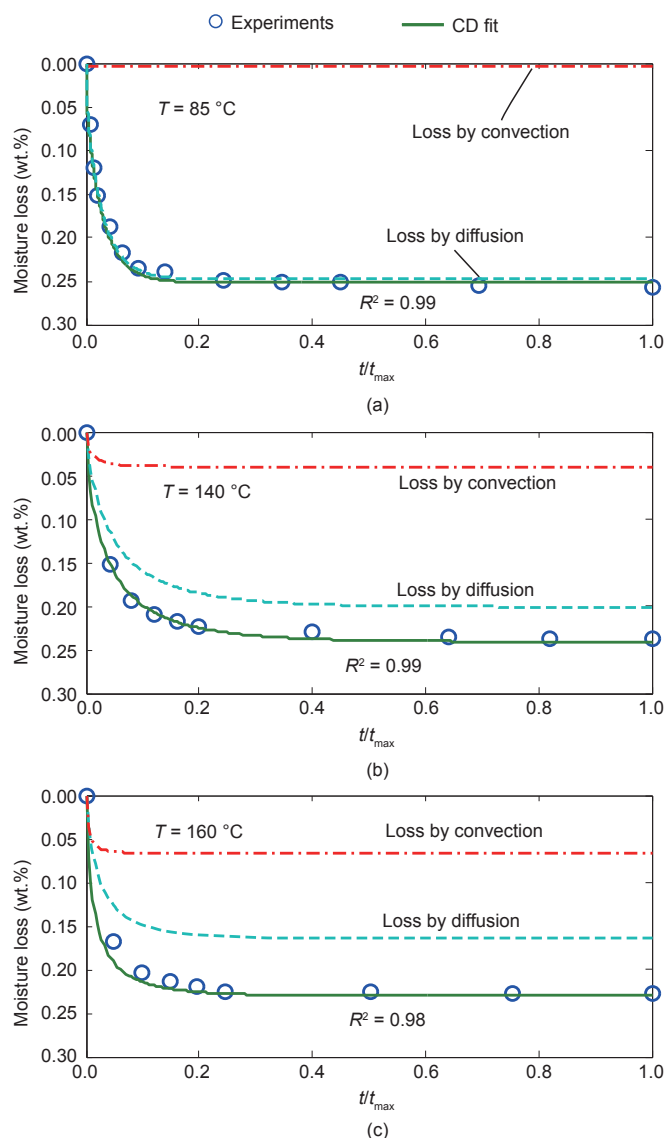


图5. 放湿实验中的蒸汽流量随温度升高的变化 [18]。

2.3 作为外部载荷的蒸汽压力

一旦形成肉眼可见的分层且蒸汽在分层区域内聚集时，蒸汽压力可被视为外部载荷。为方便起见，尽管各个位置的水分浓度可能不同，但是笔者默认界面脱落区内的蒸汽压力相同。因此，我们可以采用一个简单的方程来计算界面分层处的平均水分浓度[19]：

$$C^{\text{ave}} = \int_A C dA / A \quad (13)$$

式(13)中， A 为分层面积。利用式(13)计算分层后的蒸汽压力时，应以平均浓度 C^{ave} 替代浓度 C 。这种方法适用于全场蒸汽压力模型和CD模型。另一种方法是明确计算水和固体之间的相互作用。这种方法必然会涉及液-固相互作用问题。微量的液体与固体之间的相互作用可以使用先进的物质点法[25, 26]解决。用这种方法可以研究水的表面张力和接触角的效应。

2.4 蒸汽压力引起的膨胀

聚合物材料的杨氏模量在高温下显著降低，因此需要考虑蒸汽压力引起的膨胀。蒸汽压力引起的体积变化可以使用以下方程来描述：

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{3(1-2\nu)}{E} p \quad (14)$$

式(14)中， E 为杨氏模量； ν 为泊松比。对于典型的芯片粘结材料，将 $E = 500 \text{ MPa}$ 、 $\nu = 0.3$ 和 $p = 2.32 \text{ MPa}$ ($220 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的饱和蒸汽压)代入式(14)中，得到 5.558×10^{-3} [19]。当温度从 $175 \text{ }^\circ\text{C}$ 升至 $220 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，蒸汽压力引起的有效热膨胀系数约为 $41 \text{ ppm}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ 。很明显，如果考虑到杨氏模量进一步减少，则蒸汽压力引起的膨胀会更大。这个简单的案例显示了蒸汽压力引起的膨胀与固体变形之间的重要联系。

3 超疏水表面涂层的作用

全场蒸汽压力模型和CD模型都推断，可以通过防止水分吸收的方式(即当 C 或 ρ_w 逐渐变为零时)来避免出现高蒸汽压力的情况。为了实现这个目的，可以在器件上涂抹一层疏水涂层，这样可以防止水分传输。

人们已使用了多种密封剂来防水，包括聚酰亚胺树脂和聚对二甲苯[27]。报告指出，使用密封剂可以使电子元件在实际应用时免受高温湿度偏压、热冲击和温度循环的影响。此外，密封剂涂层也可以防止流动离子污染和水分扩散，从而提高非密闭封装的长期可靠性[28, 29]。研究还发现，使用超疏水表面可以更好地防止微机电系统(MEMS)受潮损坏。

设计超疏水涂层应遵循两个一般规则：第一是尽量减少自由能，第二是增大表面粗糙度。表面形态或表面粗糙度对确定超疏水性能至关重要。表面粗糙度与接触角之间的关系可以用Wenzel方程说明[30]：

$$\cos\theta_A = r \cos\theta_Y \quad (15)$$

式(15)中， θ_A 为表观接触角； r 为粗糙度指数； θ_Y 为当 $r = 1.0$ 时(相当于平整表面)的接触角。很明显，设计超疏水

表面的目的是增大粗糙度(r)和接触角。但是,在Wenzel状态下通常难以获得足够大的接触角(如 $> 150^\circ$)。纳米复合涂层产生的表观接触角与固体表面比值(f)密切相关。固体表面比值可以通过Cassie方程[31]说明:

$$\cos\theta_A = -1 + f(\cos\theta_Y + 1) \quad (16)$$

图6显示了使用二氧化硅或环氧纳米复合涂层的超疏水表面保护微电子部件所需的程序[11]。在微电子样品上旋涂一层混合物后,环氧树脂混合物内的大多数纳米二氧化硅微粒(100 nm,质量分数为10%)都位于环氧树脂顶层之下。为了使纳米二氧化硅从环氧树脂中露出以增加表面粗糙度,可以使用活性氧反应离子蚀刻(RIE)法经过不同的蚀刻持续时间将环氧树脂分子蚀刻出来,如图6(a)所示。然后,在暴露有纳米二氧化硅的顶部上涂抹碳氟硅烷,以便进一步减小表面能。如图6(b)所示,硅烷分子的初始锚定位点位于纳米二氧化硅表面的羟基上。图7显示了由于蚀刻持续时间不同而产生的不同的表面粗糙度。暴露二氧化硅微粒顶部并形成一密集填充层,这样可以大大增加表面粗糙度和固体表面比值。水和复合材料界面会聚集更多空气,从而形成一个高度疏水的系统。该系统的 $\theta_A \approx 161^\circ$,且滞后角小于 2° 。接触角的测量在涂层完全凝固后进行(可以用溶剂擦拭测试法来粗略测量固化程度)。笔者测量了涂有超疏水环氧/二氧化硅涂层的三相电阻器在 85°C 、相对湿度(RH)为85%且恒定直流(DC)偏压为13.4 V时的电阻和泄漏电流[11]。实验结果显示,与未涂保护层或涂有不具备超疏水性能的普通密封剂的样品相比,涂有超疏水保护涂层的样

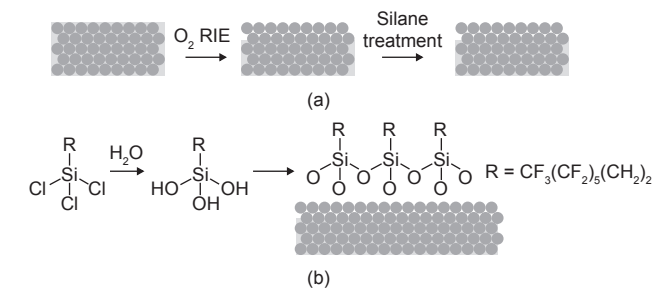


图 6. 图解超疏水表面合成过程。(a) 氧气等离子蚀刻和硅烷化处理; (b) 采用全氟辛烷磺酸对一个纳米复合涂层表面进行疏水处理 [11]。

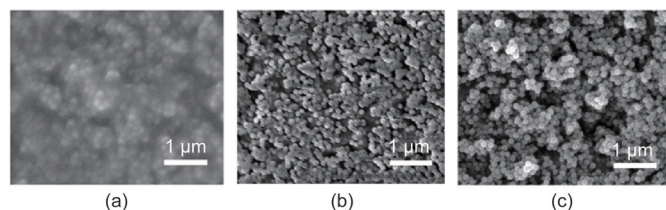


图 7. 随蚀刻时间变化的表面粗糙度 [11]。

品的电阻和泄漏电流更小。但是,这个研究未报告随时间延长而发生的增重现象,且未明确说明超疏水涂层的长期有效性。

4 涂布超疏水涂层后的吸湿情况

为了进一步验证不同条件下超疏水涂层的有效性,笔者测量了在回流焊实验过程中涂装材料吸湿后的故障率[16]。为了进行比较,笔者测试了原始样品和涂有超疏水薄膜涂层的样品。第一种情况将样品浸入 60°C 的水中。另一种情况将样品置于一个 60°C 、相对湿度为85%的湿度箱内。笔者将两种情况的测试时间均设定为192 h。测试结果显示,在第一种湿度情况(浸入水中)下,涂有超疏水薄膜涂层的样品得到了很好的保护,吸湿量非常小。但是,在第二种湿度情况下,超疏水涂层似乎不起作用。在这种情况下,实验中测量到的、涂有超疏水薄膜涂层的样品和未涂超疏水薄膜涂层的样品的吸湿量几乎相同。通过在吸湿后进行的回流焊实验可以确定,只有在都浸入水中时,涂有超疏水薄膜涂层的封装器件才比未涂超疏水薄膜涂层的封装器件拥有更高的完好率。在 60°C 、相对湿度为85%的条件下,涂有超疏水薄膜涂层的样品与未涂超疏水薄膜涂层的样品的故障率相同。这些观察结果意味着,涂层材料能够有效地阻隔液态水,却无法阻止水蒸气的吸收。图8以图示方式简略说明了这个结论。为了解释图8所示的现象,笔者认为涂有超疏水薄膜涂层的材料内存在两种扩散机制:透过超疏水表面的传湿和通过体积进行的传湿。通常,我们可以用菲克动力学很好地理解通过体积进行的传湿。但是,透过表面(尤其是超疏水表面)发生的水分扩散机制可

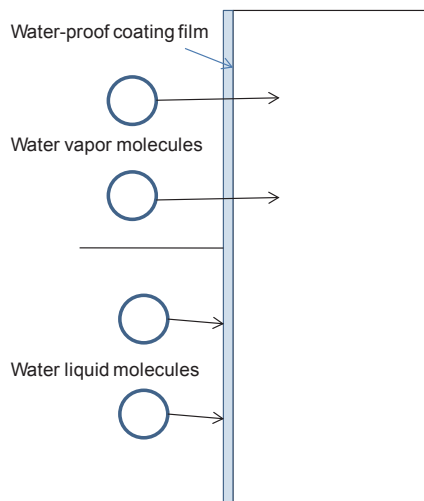


图 8. 不能防止水蒸气渗透的疏水薄膜涂层示意图 [16]。

能更加复杂，且可能在更大程度上取决于蒸汽压力和材料的化学性质。笔者相信，超疏水表面处的蒸汽压力对完全理解实验中观察到的表面扩散机制非常关键。

5 探讨和结论

本文介绍了用于预测电子材料内蒸汽压力的两种不同的理论模型：全场蒸汽压力模型和CD模型。全场蒸汽压力模型将菲克扩散原理与微孔隙内的水蒸气微观力学相结合，以预测蒸汽压力；而CD模型包括菲克扩散、蒸汽对流和液体-蒸汽混合物的化学平衡原理，以形成一个统一的蒸汽压力模型。尽管这两个模型之间存在上述差异，但是这两种方法都可以通过考虑蒸汽压力引起的变形进行多物理场分析。可以看出，预测蒸汽压力对研究材料在高温和高湿度环境中的总机械响应至关重要。对于CD模型来说，可以看出，在高温下，蒸汽流动影响增大(例如，在160 °C时，蒸汽流动引起的水分传输占29%)。CD模型能够通过将扩散机制与对流机制相结合的方式准确匹配不同温度下的实验数据。对于在高温下快速受热的聚合物复合材料，数值研究显示，高加热速率可能产生很高的蒸汽压力(约6.5 MPa)，这可能导致材料内部出现的可靠性问题。

为了提高器件在潮湿环境中的可靠性，笔者提出了超疏水纳米复合涂层，并在各种水分条件下对其进行了测试。笔者注意到，超疏水涂层具有疏水性，但是却不能防止水蒸气渗入超疏水涂层。虽然传统扩散模型几十年前就被提出，但是其仍不足以充分了解湿气透过超疏水涂层的具体扩散机制。由于可以通过微调表面粗糙度的方式来改变蒸汽压力，所以准确预计超疏水表面上的蒸汽压力对确定超疏水涂层是否能够防止蒸汽进入极为重要。因此，开发一个多尺度蒸汽压力模型来研究超疏水涂层的纳米结构是必要的。

致谢

笔者感谢中国国家高技术研究发展计划(863计划)(2015AA03A101)的部分支持。

Compliance with ethics guidelines

Xuejun Fan, Liangbiao Chen, C. P. Wong, Hsing-Wei Chu, and G. Q. Zhang declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

1. X. Q. Shi, Y. L. Zhang, W. Zhou, X. J. Fan. Effect of hygrothermal aging on interfacial reliability of silicon/underfill/FR-4 assembly. *IEEE T. Compon. Pack. T.*, 2008, 31(1): 94–103
2. X. J. Fan, E. Suhir. *Moisture Sensitivity of Plastic Packages of IC Devices*. New York: Springer, 2010
3. X. J. Fan, G. Q. Zhang, W. D. van Driel, L. J. Ernst. Interfacial delamination mechanisms during soldering reflow with moisture preconditioning. *IEEE T. Compon. Pack. T.*, 2008, 31(2): 252–259
4. W. D. van Driel, M. A. J. van Gils, X. J. Fan, G. Q. Zhang, L. J. Ernst. Driving mechanisms of delamination related reliability problems in exposed pad packages. *IEEE T. Compon. Pack. T.*, 2008, 31(2): 260–268
5. B. Xie, X. J. Fan, X. Q. Shi, H. Ding. Direct concentration approach of moisture diffusion and whole-field vapor pressure modeling for reflow process-Part I: Theory and numerical implementation. *J. Electron. Packag.*, 2009, 131(3): 031010.1–031010.7
6. B. Xie, X. J. Fan, X. Q. Shi, H. Ding. Direct concentration approach of moisture diffusion and whole-field vapor pressure modeling for reflow process-Part II: Application to 3D ultrathin stacked-die chip scale packages. *J. Electron. Packag.*, 2009, 131(3): 031011.1–031011.6
7. L. S. Zhu, J. Zhou, X. J. Fan. Rupture and instability of soft films due to moisture vaporization in microelectronic devices. *Computers, Materials & Continua*, 2014, 39(2): 113–134
8. Y. H. Xiu, L. B. Zhu, D. W. Hess, C. P. Wong. Superhydrophobic durable silica thin films from sol-gel processing for the application in antistiction of MEMS devices. *Abstracts of Papers of the American Chemical Society*, 2006: 231
9. Y. Liu, W. Lin, Z. Lin, Y. Xiu, C. P. Wong. A combined etching process toward robust superhydrophobic SiC surfaces. *Nanotechnology*, 2012, 23(25): 255703
10. Y. Liu, Z. Lin, W. Lin, K. S. Moon, C. P. Wong. Reversible superhydrophobic-superhydrophilic transition of ZnO nanorod/epoxy composite films. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2012, 4(8): 3959–3964
11. Y. Liu, Z. Lin, K. S. Moon, C. P. Wong. Superhydrophobic nanocomposite coating for reliability improvement of microelectronics. *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Tech.*, 2013, 3(7): 1079–1083
12. Y. H. Xiu, Y. Liu, B. Balu, D. W. Hess, C. P. Wong. Robust superhydrophobic surfaces prepared with epoxy resin and silica nanoparticles. *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Tech.*, 2012, 2(3): 395–401
13. Y. Liu, Y. Xiu, D. W. Hess, C. P. Wong. Silicon surface structure-controlled oleophobicity. *Langmuir*, 2010, 26(11): 8908–8913
14. X. J. Feng, L. Jiang. Design and creation of superwetting/antiwetting surfaces. *Adv. Mater.*, 2006, 18(23): 3063–3078
15. L. Gao, T. J. McCarthy. The “lotus effect” explained: Two reasons why two length scales of topography are important. *Langmuir*, 2006, 22(7): 2966–2967
16. X. J. Fan, S. W. R. Lee, Q. Han. Experimental investigations and model study of moisture behaviors in polymeric materials. *Microelectron. Reliab.*, 2009, 49(8): 861–871
17. E. H. Wong, S. W. Koh, K. H. Lee, K.-M. Lim, T. B. Lim, Y.-W. Mai. Advances in vapor pressure modeling for electronic packaging. *IEEE Trans. Adv. Packag.*, 2006, 29(4): 751–759
18. L. Chen, H. W. Chu, X. J. Fan. A convection-diffusion porous media model for moisture transport in polymer composites: Model development and validation. *J. Polym. Sci. Pol. Phys.*, 2015, 53(20): 1440–1449
19. X. J. Fan, J. Zhou, G. Q. Zhang, L. J. Ernst. A micromechanics-based vapor pressure model in electronic packages. *J. Electron. Packag.*, 2005, 127(3): 262–267

20. J. Adams, L. Chen, X. J. Fan. Vapor pressure prediction for stacked-chip packages in reflow by convection-diffusion model. In: *Proceedings of the 16th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE)*. Budapest, Hungary, 2015
21. Y. Wu, N. Katsube. A thermomechanical model for chemically decomposing composites—I. Theory. *Int. J. Eng. Sci.*, 1997, 35(2): 113–128
22. R. M. Sullivan. The effect of water on thermal stresses in polymer composites. *J. Appl. Mech.*, 1996, 63(1): 173–179
23. G. K. van der Wel, O. C. G. Adan. Moisture in organic coatings—A review. *Prog. Org. Coat.*, 1999, 37(1–2): 1–14
24. H. B. Hopfenberg, H. L. Frisch. Transport of organic micromolecules in amorphous polymers. *J. Polym. Sci., Part B. Polym. Lett.*, 1969, 7(6): 405–409
25. L. Chen, J. H. Lee, C. F. Chen. On the modeling of surface tension and its applications by the Generalized Interpolation Material Point Method. *CMES-Comp. Model. Eng.*, 2012, 86(3): 199–224
26. L. Chen. Using the generalized interpolation material point method for fluid-solid interactions induced by surface tension (Doctoral dissertation). Fairbanks, AK: University of Alaska Fairbanks, 2013
27. C. P. Wong. High-performance silicone gel as IC device chip protection-cure study and electrical reliability. *Abstracts of Papers of the American Chemical Society*, 1988: 102
28. R. G. Mancke. A moisture protection screening test for hybrid circuit encapsulants. *IEEE Trans. Compon. Hybrids Manuf. Technol.*, 1981, 4(4): 492–498
29. J. L. Wu, R. T. Pike, C. P. Wong, N. P. Kim, M. H. Tanielian. Evaluation and characterization of reliable non-hermetic conformal coatings for microelectromechanical system (MEMS) device encapsulation. *IEEE Trans. Adv. Packag.*, 2000, 23(4): 721–728
30. R. N. Wenzel. Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Ind. Eng. Chem.*, 1936, 28(8): 988–994
31. A. B. D. Cassie, S. Baxter. Wettability of porous surfaces. *Trans. Faraday Soc.*, 1944, 40: 546–551