

准自由支撑铝薄膜中有序表面结构的自组织生长^{*}

张永炬^{1)†} 余森江^{2)‡}

¹⁾台州学院物理系, 浙江 临海 317000)

²⁾中国计量学院物理系, 杭州 310018)

³⁾浙江大学物理系, 杭州 310027)

(2005 年 2 月 2 日收到, 2005 年 2 月 28 日收到修改稿)

利用真空热蒸发方法在液体基底表面成功制备出具有自由支撑边界条件的金属铝薄膜系统, 研究了薄膜中自发形成的自边界向内部区域逐渐生长而呈带状分布的有序表面结构. 该有序结构的形成与薄膜厚度、沉积速率和真空环境中的生长时间等实验参数密切相关, 其形成过程可用一个三阶段生长模型来描述. 实验证明此类有序结构是在薄膜内应力作用下, 铝原子及原子团簇在液体表面自由扩散凝聚所致. 进一步的理论研究表明: 基于特征的边界条件和固液相互作用, 该自由支撑铝薄膜系统中包含了丰富的正弦形内应力分布, 各种具有不同振幅和频率的正弦形内应力的合成可形成矩形状畴块和带状有序结构.

关键词: 液体基底, 铝薄膜, 自组织生长, 有序结构

PACC: 7360D, 6855

1. 引 言

很早以前, 人们就发现相对简单的系统可以自发产生非常复杂而规则的结构. 由于此类结构蕴含着丰富的物理机理, 并可广泛应用于实际的生产生活, 所以简单系统中形成的复杂结构引起了人们极大的关注, 并逐渐成为当今科学研究的热点之一^[1-10]. 此类所谓的自组织现象大量存在于具有不同尺度的自然体系中, 如宇宙星际物质和星云, 宏观的地表形貌^[1]和颗粒物质^[2], 纳米尺度的有机晶体^[3]和多孔材料^[4], 半导体中的纳米晶粒(包括纳米团簇、纳米线、纳米管等)^[5], 晶体表面上规则排列的纳米阵列^[6], 由分子和超分子组织而成的复杂生物及非生物结构^[7], 等等. 已有的研究表明: 自组织现象的产生与体系内的相互作用密切相关^[8]; 沉积在固体基底和聚合物软基底上的薄膜物质能在内应力作用下发生自发迁移和凝聚现象, 并最终形成特征的表面形貌^[9, 10].

最近, 浙江大学的一个实验小组研究了生长在液体(扩散泵硅油)基底表面的铁薄膜系统, 发现在一定的实验条件下, 其中可自发形成一种新型的规

则图案: 由许多相互平行的矩形状畴块紧密排列而成的带状有序结构^[11]. 实验证实此类有序结构与铁原子(或原子团簇)之间的磁相互作用无关, 而是由薄膜中存在的内应力引起的. 随后的实验发现, 沉积在硅油基底表面的铝和金薄膜中也存在类似的带状有序结构^[12], 说明此类有序结构的形成不是由具体的薄膜材料决定, 而与金属薄膜生长在液体表面这一特殊的物理体系有关. 然而到目前为止, 此类结构的形成机理, 特别是薄膜物质在内应力作用下如何运动、如何凝聚而产生规则的结构, 尚不清楚. 本文报道了生长在液体表面的铝薄膜中带状有序结构的主要形貌特征和形成机理. 实验结果表明: 此类有序结构一般自薄膜边缘向其内部区域生长, 整体外形为宽度不断衰减的带状结构; 有序结构在真空环境中生长, 一旦将样品暴露在大气中, 有序结构的生长过程立即停止; 有序结构的尺度一般为几十微米到上百微米, 因此实验中可非常方便地采用光学显微镜观察其形貌并研究其生长规律. 带状有序结构的自组织生长说明液体基底表面的金属薄膜系统具有独特的微观结构和内应力分布, 因而也具有特殊的物理性能. 我们相信, 此类准自由支撑的薄膜系统为人们提供了一个极好的研究固液相互作用

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10174063)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: xdzj@tzc.edu.cn

的物理平台,并且随着制备和研究手段的进一步发展,其必将呈现出广阔的应用前景。

2. 实验方法

铝薄膜样品用真空热蒸发方法在室温下制备而成。加热丝、纯铝片、样品基底均放置在真空室内。先将一小滴纯净的硅油(DOW CORNING 705,室温下其蒸汽压小于 10^{-8} Pa)均匀涂抹在磨毛的载玻片表面上,其面积为 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$,硅油的厚度约为 0.5mm ,以此作为样品的液体基底;再将液体基底放入真空室内的蒸发源下方,相距约 120mm ,将纯铝片剪成细带状弯曲后挂在加热钨丝上,待真空室气压降为 6×10^{-4} Pa后,调节钨丝加热电源电压,钨丝通电加热升温使铝熔化蒸发,蒸发的铝原子沉积在样品基底的硅油表面形成铝薄膜。蒸发材料铝的纯度为 99.999% 。沉积速率 f 和薄膜名义厚度 d 由石英晶振测厚仪(OLVAC CRTM-8000)监测,通过调节钨丝的加热源输出电压来控制铝的蒸发速率。薄膜厚度由轮廓仪(α -step200 轮廓仪, TENCOR)校正。沉积结束后,让样品在真空室中保留时间间隔 Δt ,然后向真空室中缓慢充入空气,打开真空室取出样品,用光学显微镜(Leica DMLM)对薄膜的表面进行观察,并拍摄表面形貌照片以分析其形貌特征。

3. 实验结果与讨论

3.1. 带状有序结构的形成

图 1(a)所示为生长在硅油基底表面铝薄膜的典型表面形貌,其中较亮部分为连续致密的铝薄膜,较暗部分为薄膜的边界。我们发现带状有序结构在薄膜的边界凝聚产生,随后不断往薄膜中间区域延伸,最后逐渐消失。在某些情况下,一条带状结构从薄膜的一个边界开始生长而在薄膜的另一个边界终止,其总的长度可达 10mm 。实验证明从同一个薄膜边界生长的带状有序结构基本上朝同一个方向延伸,见图 1(a),说明此类结构的生长具有各向异性。图 1(b)所示为用较高分辨率的显微镜观测的此类带状结构的细致形貌。我们发现带状结构实际上是由一条黑色折线组成的,通过光学显微镜照片仔细研究表明,黑色折线是薄膜的裂纹。尽管有一边是开口的,但由三边裂缝围成的畴块非常明显地呈现

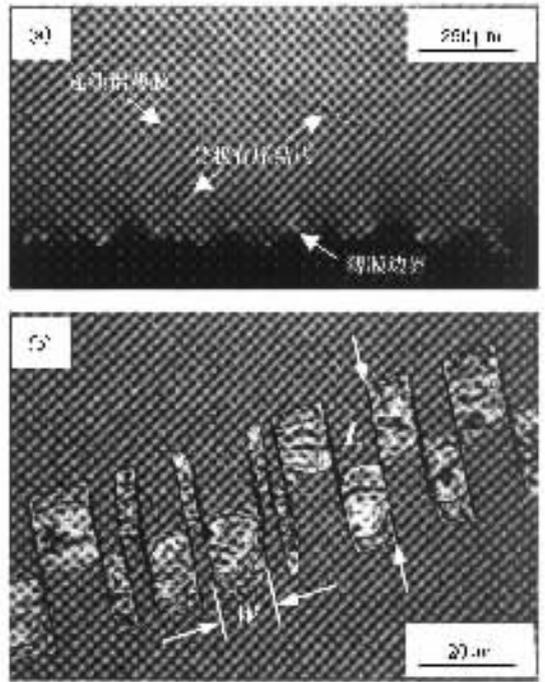


图 1 沉积在硅油基底表面铝薄膜中形成的典型带状有序结构形貌 (a) $f = 0.10\text{nm/s}$, $d = 30\text{nm}$, $\Delta t = 0.5\text{h}$, (b) $f = 0.10\text{nm/s}$, $d = 25\text{nm}$, $\Delta t = 0.5\text{h}$

出矩形结构。因而,我们认为此类带状有序结构是由许多相互平行的矩形畴块紧密排列而成的。在同一条带状有序结构中,相邻畴块的长度 L 几乎相同,但它们的宽度 w 却往往相差很大,见图 1(b)。在我们的实验中,畴块的最大长度约为 $120\mu\text{m}$,最大宽度约为 $250\mu\text{m}$ 。

图 2(a)所示为带状有序结构在延伸过程中逐渐趋于消失的典型形貌。我们发现随着带状有序结构从薄膜边缘向薄膜中间区域延伸,畴块的长度 L 不断衰减并最终趋于零,而且尽管相邻畴块的宽度 w 相差很大,但总体上看 w 也呈不断减小的趋势。为了定量地描述带状有序结构的这种衰减行为,我们系统地测量了畴块长度和宽度与带状有序结构延伸距离 ξ 的关系。因为相邻畴块的宽度往往相差很大,为此我们考察畴块宽度的衰减规律时采用畴块的平均宽度 \bar{w} 。图 2(b)所示为畴块长度 L 及平均宽度 \bar{w} 与 ξ 的定量关系。我们看到 L 及 \bar{w} 基本上都随 ξ 的增加而线性衰减。这个规律可以表示成

$$L = L_0 - \gamma\xi, \quad (1)$$

和

$$\bar{w} = \bar{w}_0 - \beta\xi, \quad (2)$$

其中 L_0 和 \bar{w}_0 分别表示畴块长度和平均宽度的最

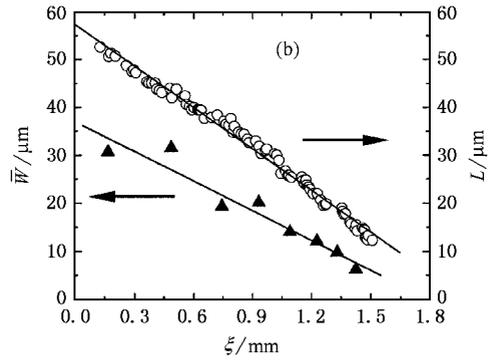
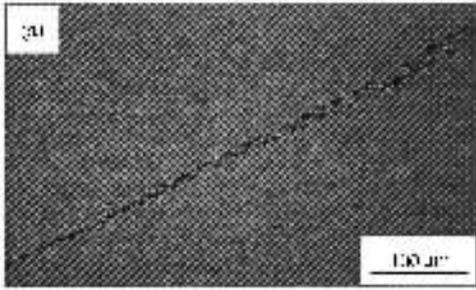


图 2 (a) 带状有序结构在延伸过程中逐渐趋于消失的典型照片, $f = 0.02 \text{ nm/s}$, $d = 20 \text{ nm}$, $\Delta t = 0.5 \text{ h}$, (b) 畴块的长度 L 及平均宽度 \bar{w} 与带状有序结构延伸距离 ξ 的关系, 黑实线表示对实验数据点(圆圈和上三角)的线性拟合. $f = 0.10 \text{ nm/s}$, $d = 50 \text{ nm}$, $\Delta t = 0.5 \text{ h}$

大值. 图中线性拟合的斜率, 即 γ 和 β 的值, 分别代表了畴块长度和宽度随距离 ξ 的衰减速率. 在我们

的实验中, γ 和 β 的值均为 10^{-2} 的数量级, 表明带状有序结构的外形是十分细长的.

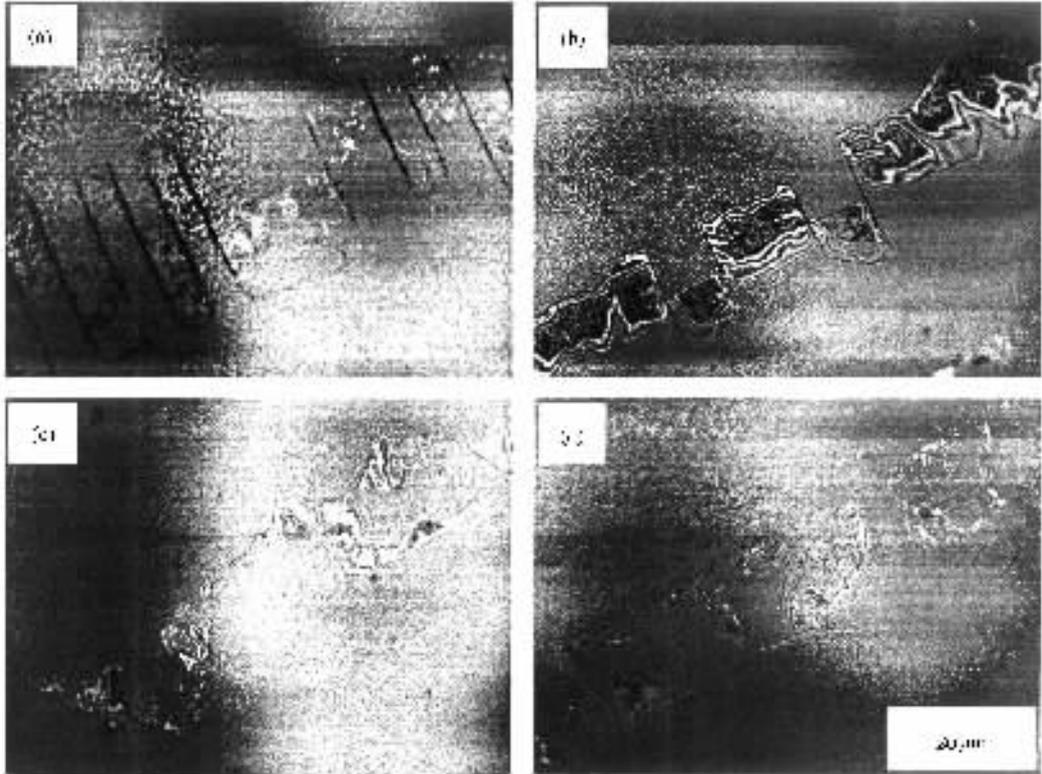


图 3 带状有序结构形貌随薄膜厚度 d 的演化规律. (a) $d = 20 \text{ nm}$, (b) $d = 10 \text{ nm}$, (c) $d = 7 \text{ nm}$, (d) $d = 5 \text{ nm}$, $\Delta t = 0.5 \text{ h}$, $f = 0.10 \text{ nm/s}$. 所有照片面积均为 $(80 \times 60) \mu\text{m}^2$

实验中我们发现: 带状有序结构的形貌与薄膜厚度 d 、沉积速率 f 和样品在真空中放置的时间 Δt 等实验参数密切相关. 在固定的沉积速率和真空放置时间条件下, 我们发现在薄膜厚度较大时, 薄膜中形成如图 1 2 所示的规则带状有序结构; 而当薄膜厚度较小时, 薄膜中开始出现三角形畴块和

无序斑纹形貌. 图 3 给出了在 $f = 0.10 \text{ nm/s}$ 和 $\Delta t = 0.5 \text{ h}$ 的实验条件下, 带状有序结构的形貌随薄膜厚度的演变过程. 当 $d > 10 \text{ nm}$ 带状有序结构中的所有畴块均呈较好的矩形结构, 见图 3 (a), 当 $d \approx 10 \text{ nm}$ 畴块开始变得不太规则, 但整体上仍呈现出矩形特征. 见图 3 (b), 随着薄膜厚度的进一步减小,

畴块逐渐由矩形结构演化成三角形结构,见图 3(c)并最终退化为具有特征斑纹形貌的带状混沌区域,见图 3(d),并且畴块长度基本上随着薄膜厚度的减小而减小.为了进一步探索畴块长度随薄膜厚度的变化规律,我们选定 $f = 0.10 \text{ nm/s}$, $\Delta t = 0.5 \text{ h}$ 为固定的实验参数进行了系统的实验研究.图 4(a)所示为畴块的最大长度 L_0 与薄膜厚度 d 的定量关系.我们发现随着薄膜厚度 d 的增大, L_0 先是较快地增加,随后逐渐减小;当 $d \approx 70\text{--}80 \text{ nm}$ 时, L_0 达到最大值,约为 $120 \mu\text{m}$.

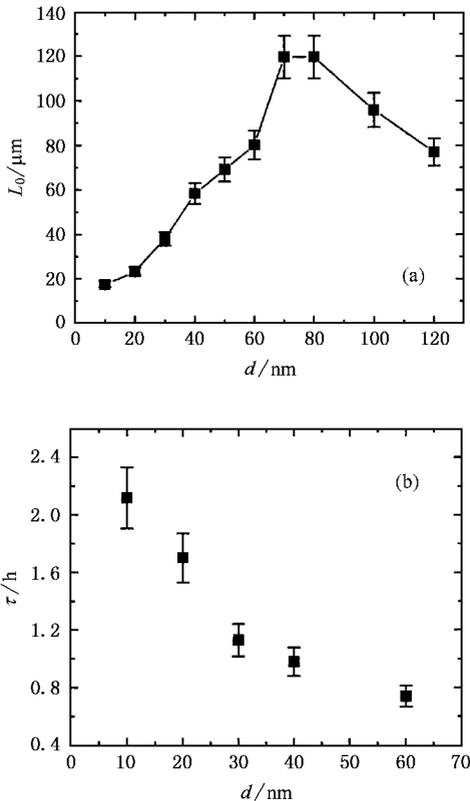


图 4 (a)畴块最大长度 L_0 与薄膜厚度 d 的关系, $f = 0.10 \text{ nm/s}$, $\Delta t = 0.5 \text{ h}$ (b)有序结构生长时间常数 τ 与薄膜厚度 d 的关系, $f = 0.10 \text{ nm/s}$, $\Delta t = 0.5 \text{ h}$

已有的研究表明,沉积在液体基底表面的金属薄膜中通常存在很强的残余内应力,促使薄膜表面呈现独特的表面形貌^[13,14].我们认为:铝薄膜中出现的带状有序结构形貌,是由铝原子及原子团簇在薄膜内应力作用下的自组织生长而产生.这一假设基于以下三个实验事实:1)固体薄膜和液体基底的结合能几乎为零,而由内应力引发的特征表面结构更易于在膜基结合能小的薄膜中出现^[10];2)由于液体表面薄膜的特殊成膜机理^[15-18],此类近似自

由支撑的金属薄膜的微结构较为疏松,金属原子及团簇有较大的运动空间;3)固体薄膜与液体基底之间的切向相互作用非常微弱^[15-18],金属原子及团簇能在液体表面自由扩散和凝聚,并最终导致薄膜物质在某些区域的自发迁移和重组.图 4(a)所示的现象说明:带状有序结构的形成与薄膜厚度(即薄膜材料的沉积量)密切相关.随着薄膜沉积量的增加,参与扩散和凝聚的铝原子及团簇逐渐增加,从而促使具有较大尺寸的有序结构的形成;而另一方面,薄膜材料的增加将导致铝原子及团簇的扩散凝聚特性受到抑制,而且薄膜厚度的增加将极大削弱液体基底的自由特性,使铝原子及团簇的运动变得更加困难.这一对矛盾最终导致了有序结构的尺寸随着薄膜厚度先快速增加而后稳定下降的变化规律.

实验证明所有带状有序结构均是在真空中形成的,一旦将样品取出并暴露在大气气氛中,带状有序结构的生长立刻停止.我们系统研究了真空环境中带状有序结构的特征生长时间常数 τ 与薄膜名义厚度 d 的定量关系,如图 4(b)所示.由图可知 τ 一般在 $10^{-1}\text{--}10^0 \text{ h}$ 的数量级,证明生长在硅油基底表面的铝薄膜中,铝原子团簇(或晶粒)有一个很长的弛豫时间.这一结论与沉积在液体基底表面的其它金属薄膜类似^[15-18],而与沉积在固体基底表面的薄膜则相差很大(其弛豫时间一般只有几秒钟,相比要小好几个数量级)^[19].随着薄膜厚度 d 的增加,弛豫时间稳定下降.这一现象说明:在薄膜很薄时,铝原子及原子团簇因受液体基底的强烈影响而具有很大的活性,因而具有较长的弛豫时间;当 d 逐渐增大时,随后沉积的铝原子相当于沉积到固体铝薄膜表面上,其受液体基底的影响相对就小,弛豫时间也相应变小.可以预测当薄膜厚度增大到某一值后,液体基底对薄膜的影响将可以忽略,此时的薄膜与沉积在固体基底表面的薄膜类似而具有很小的弛豫时间.

基于以上实验事实,我们认为在铝原子及原子团簇的弛豫过程中,薄膜中将出现物质自发迁移和凝聚现象,这种现象在薄膜形成的初期表现为一种较为无序的过程,但随着 Δt 的不断增长,物质的凝聚和重组逐渐导致薄膜中形成较为规则的畴块和有序结构.也就是说,规则的矩形畴块是由三角形畴块演化而来,而三角形畴块自无序斑纹形貌中凝聚产生.实验中,我们在沉积速率和薄膜厚度相同的条件下,通过改变真空中放置时间进行了一系列的

实验研究,充分证明了上述假设. 带状有序结构的形成过程可遵从一个三阶段生长模型. 首先,在沉积过程中和沉积结束之后,铝薄膜中开始凝聚产生具有特征斑块形貌的带状混沌区域,该混沌区从薄膜边界向内部区域伸展,这一状态过程一般可持续数十分钟到十几小时,且薄膜厚度越厚,这一状态过程时间越短. 随着样品在真空中放置时间的增加,带状混沌区域的某一边界处开始向两侧生长出三角形结构(均近似为等腰三角形,底边落在混沌区域的边界上),随后三角形畴块逐渐长大长多,底边相互连接. 接着,因底边生长受到限制,三角形畴块开始垂直带状混沌区而纵向生长,于是矩形轮廓开始形成,并且随着时间的进一步增加而最终形成规则的矩形畴块和带状有序结构.

实验中我们还发现,在相当大的沉积速率范围内,最终形成的带状有序结构均由规则矩形畴块组成,如图 1 2 所示. 这一沉积速率范围与薄膜厚度 d 有关,例如膜厚为 20nm 时,该范围约为 $f = 0.05 \sim 0.35 \text{ nm/s}$. 该沉积速率范围的上限和下限均随薄膜厚度的增加而相应增大. 如果沉积速率逐渐减小并越过其下限,矩形畴块将逐渐演化成三角形畴块,并且形成的角非常尖锐,如图 5 (a) 所示. 随着沉积速率的进一步减小,三角形畴块逐渐消失并最终形成很多树枝状结构的图案. 而如果沉积速率逐渐增大,矩形畴块的角将逐渐变圆而形成比较无序的波浪形结构,并且带状有序结构的数密度随沉积速率的增加而急剧下降并最终完全消失. 这一现象说明,在薄膜的沉积速率较大时,同一时间有大量原子沉积到液体表面上,铝原子在扩散过程中与其他原子及原子团簇相遇并结合的几率就很大. 在这种情况下,薄膜物质的迁移扩散特性将受到极大限制,因而形成的带状结构较为无序,并且在更高的沉积速率条件下带状结构完全消失. 而如果薄膜的沉积速率很小,同一时间沉积的原子数量变少,薄膜物质有很大的扩散迁移率,但新沉积的物质得不到很好补充,因而不能形成规则有序结构. 实验证明只有当沉积速率适中,薄膜物质的扩散和凝聚特性都得到加强,薄膜中才能形成非常规则的带状有序结构.

3.2. 理论解释

基于一般应力理论,由内应力引发的特征表面结构(即内应力释放图案),其延伸方向通常与薄膜中局域的最大内应力方向垂直,以便最大限度地释

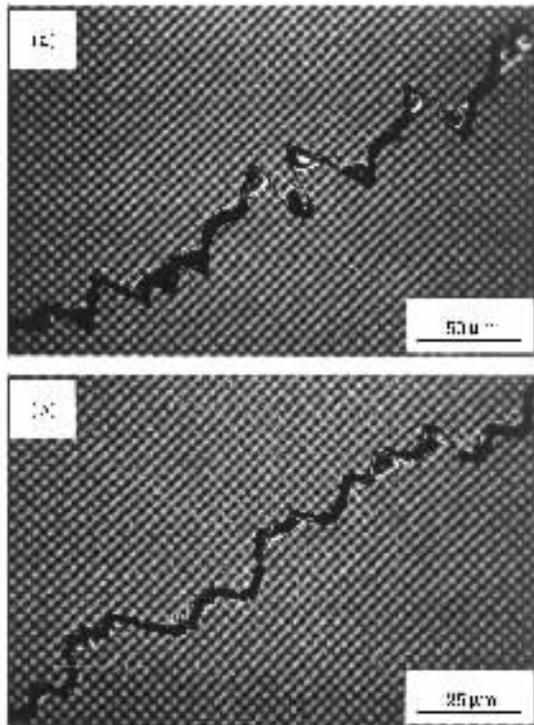


图 5 带状有序结构形貌随沉积速率 f 的演化规律 (a) $f = 0.01 \text{ nm/s}$, (b) $f = 0.5 \text{ nm/s}$, $\Delta t = 0.5 \text{ h}$, $d = 20 \text{ nm}$

放薄膜系统的应力能^[9, 10, 20]. 因而,此类结构往往反映了薄膜中内应力的分布情况,同时也说明人们可以通过计算薄膜的内应力,从理论上解释特征的薄膜表面结构. 人们一般采用广义薄板弯曲理论来分析内应力释放图案^[10, 20, 21],该理论的薄板弯曲方程如下式所示^[10]:

$$D \left(\frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^2 W}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} \right) + \sigma_x d \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \sigma_y d \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + 2\tau_{xy} d \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} + F = 0, \quad (3)$$

其中 D 是薄膜的惯性动量, d 是薄膜厚度, x 和 y 是相对于基底的坐标, W 是在弹性理论中定义的薄膜坐标, σ_x 和 σ_y 分别为薄膜内应力, τ_{xy} 是切应力, F 是系统所加的外力. 该方程其中一个有物理意义的特解为^[10]

$$W = 1 + \cos(kx + qy), \quad (4)$$

这一特解说明了与最大内应力垂直的内应力释放图案是沿着如下直线族

$$kx + qy = 2n\pi, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (5)$$

的方向延伸的^[10]. 如果将方程 (4) 代入方程 (3) 中,我们发现对于任一个 k 值都有两个相应的 q 值

与之对应. 也就是说, 方程(5)包含了两组斜率分别为 $\pm |k/q|$ 的直线族, 组内的直线相互平行, 不同斜率的两组直线族相互交叉. 许多内应力释放图案可以用该模型进行很好地解释. 比如, 一条裂缝或皱褶开始沿某一直线延伸, 当其到达两条直线的交点时, 其可跳到另一条相邻的具有不同斜率的直线并继续延伸, 这一过程不断进行下去便形成正弦形图案^[10, 20, 21].

从以上的理论分析我们看到, 一组 k 和 q 的值对应了薄膜内应力的一种分布. 而事实上 k 和 q 的值并不是唯一的, 很多组具有不同实数值的 k 和 q 都满足方程(3), 这意味着在同一块薄膜中可以存在各种正弦形的内应力分布^[10, 20, 21]. 对沉积在硅油基底表面的铝薄膜的研究表明, 此类近似自由支撑的薄膜系统中存在非常丰富的正弦形内应力振荡频率谱. 各种具有不同周期、相位和振幅的正弦形内应力分布相互叠加, 最终形成矩形畴块和带状有序结构.

实验证明矩形畴块是在真空环境中由三角形畴块逐渐生长演化而成, 说明了正弦形内应力的振荡频率强烈地依赖于带状有序结构的生长时间, 即样品在真空中的放置时间 Δt . 在薄膜沉积过程中和刚沉积结束时, 薄膜中出现较为无序的内应力分布, 促使薄膜物质作无序的迁移和重组(对应于薄膜中形成的无序斑纹形貌); 随着 Δt 的逐渐增加, 各种具有不同周期、相位和振幅的正弦形内应力开始产生, 其相互叠加形成三角形的内应力分布(对应于薄膜中形成的三角形畴块); 随后, 正弦形内应力的振荡频率逐渐演化, 正弦形内应力的相互叠加最终形成了矩形结构的内应力分布(对应于薄膜中形成的矩形畴块). 在带状有序结构的生长过程中, 正弦形内应力的振荡频率谱(即畴块的宽度 w) 始终保持不

变, 而其振荡幅度(即畴块长度 L) 随 Δt 的增加而不断增加, 直至内应力完全释放使系统自由能趋于极小. 图2所示的畴块长度 L 和平均宽度 \bar{w} 都随 ξ 作线性衰减的规律说明, 正弦形内应力的振荡频谱与其在薄膜中的位置密切相关, 其振荡频率随着距离 ξ 逐渐增加, 而振荡幅度随 ξ 逐渐衰减. 图5所示的现象说明, 正弦形内应力的振荡频谱随着薄膜沉积速率的变化而发生变化. 在适当的沉积速率条件下, 其振荡频谱最为丰富, 可叠加形成规则的矩形畴块, 而当沉积速率较大或较小时, 振荡频谱都将衰变, 最终形成尖角结构和波纹形貌.

4. 结 论

本文报道了沉积在硅油基底表面的铝薄膜中特征带状有序结构的生长特征及其形成机理, 所得的主要结论如下:

1. 沉积在硅油基底表面的连续铝薄膜系统中, 可生长出由矩形畴块组成的准周期排列的带状有序结构. 它们首先在薄膜边缘凝聚产生, 然后逐渐延伸至薄膜中间区域, 畴块的长度和平均宽度也随之线性衰减.
2. 带状有序结构的形貌与薄膜的沉积速率、厚度和真空中放置时间等实验参数密切相关, 其形成过程可用一个三阶段生长模型来描述.
3. 铝原子及原子团簇在内应力作用下可自由扩散和凝聚, 导致薄膜物质自发而有规律地迁移和重组, 并最终形成特征结构的表面形貌.
4. 基于薄板弯曲理论, 液体基底上金属薄膜特殊的微结构和薄膜与基底之间的特征相互作用可导致薄膜中产生丰富的正弦形内应力分布, 进而理论解释了此类有序结构的形成.

[1] Kessler M A and Werner B T 2003 *Science* **299** 380
 [2] Makse H A, Havlin S, King P R *et al* 1997 *Nature* (London) **386** 379
 [3] Wickman H H and Korley J N 1998 *Nature* (London) **393** 445
 [4] Lewis D W, Willock D J, Catlow C R A *et al.* 1996 *Nature* (London) **382** 604
 [5] Tang Z, Kotov N A and Giersig M 2002 *Science* **297** 237
 [6] Roder H, Hahn E, Brune H *et al* 1993 *Nature* (London) **366** 141
 [7] Whitesides G M, Mthias J P and Seto C T 1991 *Science* **254** 1312
 [8] Grzybowski B A, Stone H A and Whitesides G M 2000 *Nature* (London) **405** 1033

[9] Bowden N, Brittain S, Evans A G *et al* 1998 *Nature* (London) **393** 146
 [10] Nir D. 1984 *Thin Solid Films* **112** 41
 [11] Ye Q L, Xu X J, Cai P G *et al* 2003 *Phys. Lett. A* **318** 457
 [12] Yu S J, Zhang Y J, Ye Q L *et al* 2003 *Phys. Rev. B* **68** 193403
 [13] Ye G X, Zhang Q R, Feng C M *et al* 1996 *Phys. Rev. B* **54** 14754
 [14] Tao X M, Zeng Y W, Feng C M *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 2235 [Chinese] 陶向明、曾跃武、冯春木等 2000 *物理学报* **49** 2235]
 [15] Ye G X, Michely Th, Weidenhof V *et al* 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 622

- [16] Ye G X , Yang B , Xia A G *et al* 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 1900 (in Chinese) [叶高翔、杨波、夏阿根等 1998 物理学报 **47** 1900]
- [17] Yang B , Luo M B , Tao X M *et al* 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 1523 (in Chinese) [杨波、罗孟波、陶向明等 1999 物理学报 **48** 1523]
- [18] Jing J S , Ye G X , Qian C J *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1991 (in Chinese) [金进生、叶高翔、钱昌吉等 2001 物理学报 **50** 1991]
- [19] Bardotti L , Jensen P , Hoareau A *et al* 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 4694
- [20] Iyer S B , Harshavardhan K S , Kumar V 1995 *Thin Solid Films* **256** 94
- [21] Cai P G , Yu S J , Ye Q L *et al* 2003 *Phys. Lett. A* **312** 119

Self-organization of ordered surface patterns in nearly free sustained Al films^{*}

Zhang Yong-Ju^{1,3,†} Yu Sen-Jiang^{2,3}

¹(Department of Physics , Taizhou University , Linhai 317000 , China)

²(Department of Physics , Jiliang University , Hangzhou 310018 , China)

³(Department of Physics , Zhejiang University , Hangzhou 310027 , China)

(Received 2 February 2005 ; revised manuscript received 28 February 2005)

Abstract

A nearly free sustained aluminum film system has been successfully fabricated on liquid substrates by thermal evaporation method. The ordered surface patterns with band-shaped structure , propagating from the film edges to the central regions , are systematically studied. The formation of these patterns is strongly dependent on the experimental conditions (such as the nominal film thickness , deposition rate , growth period in vacuum etc.) and the growth mechanism can be traced to a three-stage process. The experiment proves that the ordered patterns result from the free diffusion and aggregation of the Al atoms and atomic clusters on the liquid surfaces driven by the internal stress. Further theoretical analysis shows that due to the characteristic boundary condition and interactions between the metallic films and the liquid substrates , the nearly free sustained Al films may contain a series of sinusoidal stress distributions with different amplitudes and frequencies , and their composition results in the formation of the ordered surface patterns.

Keywords : liquid substrate , Al film , self-organization , ordered pattern

PACC : 7360D , 6855

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10174063) .

[†] Corresponding author. E-mail : xdzyj@tzc.edu.cn