第4卷 第1期 2010年3月 Vol. 4, No. 1 Mar. 2010

文章编号:1673-9981(2010)01-0044-04

能量法表征硅基底上韧性薄膜的塑性性能*

廖艳果1, 胡和平1,2, 周益春2

(1. 南华大学数理学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 湘潭大学低维材料及其应用教育部重点实验室, 湖南 湘潭 411105)

摘 要:用三维弹塑性大应变有限元方法分析了沉积在硅基底上各种不同金属薄膜材料的 Berkovich 压 人响应.通过能量量纲化结合有限元方法建立了一种表征金属薄膜塑性性能的方法.基于本文建立的能 量法推导出了硅基底上铝薄膜的塑性性能,并与单轴拉伸实验结果及文献中方法得出的结果进行了比 较,发现由本文中模型得出的结果与单轴拉伸的结果更为吻合.用本文提出的能量法来表征金属薄膜的 塑形性能是完全可行的.

关键词:有限元方法;金属薄膜;屈服强度;能量量纲化 中图分类号:TB121 文献标识码;A

金属 Al, Cu 及其合金是集成电路内薄膜导线 的主要材料. Blech 和 Arzt 等的研究结果表明,金属 薄膜的力学性能对集成电路内薄膜导线的失效起着 重要作用^[1].因此,如何获得薄膜的基本力学性能具 有特别重要的意义.目前,测量薄膜力学性能的方法 有很多,如拉伸法^[2]、热应力法、纳米压痕法和薄膜 弯曲试验等.本文运用有限元法并结合量纲分析的 方法,得出了由压痕载荷一位移曲线确定硅基底上 金属薄膜屈服强度的经验公式,并且与马德军^[3]模 型及单轴拉伸实验的结果进行了比较.

1 量纲分析

假设被压的薄膜/基底材料本构关系如(1)式:

$$\sigma = \begin{cases} E \epsilon & \epsilon \leqslant \epsilon_y \\ \sigma_y (E \epsilon / \epsilon_y)^n & \epsilon \geqslant \epsilon_y \end{cases}$$
(1)

式(1)中 E 为材料的弹性模量, σ 为屈服强度, ϵ 为应 变, σ ,为初始屈服强度, ϵ ,为初始屈服应变,n 为应 变硬化指数.薄膜的基本力学参数分别为: E_f , σ_{yf} , $n_f 和 v_f$;基底的力学参数分别为: E_f , σ_y ,n, 和 v,.薄 膜和基底材料都遵循密斯屈服准则. 图 1 是一个典 型的锥形压痕的加卸载曲线,图 1 中 F_m 为压入的 最大载荷, h_m 为压入的最大深度, h_i 为卸载后的残 余深度.可用如下幂指数函数来拟合加载部分,即 $F_m = F_m (h/h_m)$.



图 1 典型弹塑形材料的压痕加卸载曲线

Fig. 1 A typical loading-unloading curve of an elastic-plastic material to instrumented sharp indentation

通过对加载部分进行积分得到总功 W₁₀,再对 卸载部分进行积分可得到弹性功 W₂,其中在加载和 卸载之间的那部分面积为不可恢复的塑性功 W_p.总 功 W₁₀应是薄膜和基底的力学参数(E₁,σ₁,π₁,υ₁,

收稿日期:2009-10-09

^{*} 基金项目: 期南省衡阳市科技局项目(KJ01); 国家自然科学基金重点资助项目(50531060); 国家自然科学基金杰出青年资助项目 (10525211)

作者简介:廖艳果(1981--),男,湖南娄底人,硕士.

 $E_{1}, \sigma_{y_{n}}, n_{n}, v_{n}, \sigma_{y_{f}}$)以及薄膜厚度 t_{f} 、材料的泊松比 v_{h} 最大压痕深度 h_{m} 、压痕深度 h和压头半角 θ 的函数.因此, W_{tot} 和指数 x应该是以上这些参数的函数,即

$$W_{wt} = f_1(E_f, \sigma_{yf}, n_f, v_f, E_s, \sigma_{ys}, n_s, v_s, h_m, h, t_f, \theta),$$
(2)

$$x = f_2(E_f, \sigma_{yf}, n_f, v_f, E_s, \sigma_{ys}, n_s, v_s, h_m, h, t_f, \theta) \quad (3)$$

因为 $E_{1}, \sigma_{y_{s}}, n_{f}, v_{t}$ 和 h_{m} 都是已知的,所以式 (2)和(3)得到简化.取 E_{t} 和 h_{m} 作为基本参量,并应 用 Π 定量可得:

$$\frac{W_{\text{tot}}}{E_{J}h_{m}^{3}} = \Phi\left(\frac{E_{f}}{E_{J}}, \frac{\sigma_{yf}}{E_{J}}, n_{f}, \frac{h_{m}}{t_{f}}\right), \qquad (4)$$

$$x = \Psi\left(\frac{E_f}{E_s}, \frac{\sigma_{yf}}{E_s}, n_f, \frac{h_m}{t_f}\right).$$
(5)

在这里,固定 h_m/t_f 为 0.5,方程(4)和(5)进一步简化为:

$$\frac{W_{\text{tot}}}{E_{s}h_{m}^{s}} = \Phi\left(\frac{E_{f}}{E_{s}}, \frac{\sigma_{yf}}{E_{s}}, n_{f}\right), \qquad (6)$$

$$x = \Psi\left(\frac{E_f}{E_i}, \frac{\sigma_{yf}}{E_i}, n_f\right). \tag{7}$$

2 有限元数值模拟

使用有限元软件 ABAQUS 对压痕过程进行数 值模拟.根据投影面积与压入深度的比值,将 Berkovich 压头等效成 70.3°的圆锥形压头^[4],因为试样 和压入过程具有轴对称性,可将三维的问题简化成 二维的轴对称问题.其压入过程的有限元网格划分 如图 2 所示.被压材料靠近压头部位的网格较密,靠 边缘部位的网格比较稀,在模拟过程中用了 8055 个 CAX4R 的网格单元.



图 2 有限元分析中网格划分

(a) 整个膜/基体系的网格划分;(b) 与 Berkovich 压头接触部分网格划分

Fig. 2 Mesh design for finite element analysis

(a) overall mesh design for the Berkovich indentation calculations;

(b) illustration in detail of the area that directly contacts the indenter tip

3 结果和讨论

$$\frac{W_{\text{tot}}}{E_s h_m^3} = a \left(\frac{\sigma_{yf}}{E_s}\right)^{\beta},\tag{8}$$

式(8)中系数 α 和 β 分别是 E_f/E_i 和 n_f 的函数. 其具体函数关系见(9)~(15)式:

$$\alpha\left(\frac{E_f}{E_j}, n_f\right) = \alpha_1(n_f) / \left(\frac{E_f}{E_j}\right) + \alpha_2(n_f) \left(\frac{E_f}{E_j}\right)^{\alpha_3(n_f)}, \quad (9)$$

经过大量的有限元计算并对计算结果进行拟 合,可以得出无量纲方程(8):

$$\beta\left(\frac{E_f}{E_i}, n_f\right) = \beta_1(n_f) / (\frac{E_f}{E_i}) + \beta_2(n_f) \left(\frac{E_f}{E_i}\right)^{\beta_1(n_f)},$$
(10)

$$a_1(n_f) = -1.32878 + 6.21174n_f - 8.61525n_f^2,$$
(11)

$$a_2(n_f) = 19.88237 - 70.41647n_f - 78.13025n_f^2,$$
(12)

$$a_3(n_f) = 0.23979 + 0.37719n_f,$$
(13)

$$\beta_1(n_f) = -0.02802 + 0.05232n_f,$$
(14)

$$\beta_2(n_f) = 0.93151 - 1.17921n_f,$$
(15)

$$\exists \mathbb{(BT)} = -1.3170n_f.$$
(16)

根据本文的模型可得出 1.0,2.0,4.0 μm 三种 厚度铝膜的屈服强度和应变硬化指数,将此结果和 马德军模型得出的结果进行对比列于表 1. 从表 1 可看出,本模型得出的屈服强度与单轴拉伸得出的 结果比较吻合,与马德军模型得出结果也比较相符, 但有一些较小的差别,其原因可能是:本模型考虑了 库仑摩擦,而在马德军的模型中没有考虑摩擦.为了 进一步验证本文提出的模型,对厚 4 µm 铝膜分别 采用能量量纲法、马德军法和分离拉伸法三种方法 获得的应力-应变关系进行比较,如图3所示.由图3 可知,能量量纲法得出的结果与分离拉伸法得出的 结果更为吻合.

2010

Table 1	Indexes of	yield strength	and tensile	stress for	different	Al films	in thickness
---------	------------	----------------	-------------	------------	-----------	----------	--------------

$t_f/\mu m$	x	P_{m}/mN	$W_{\omega}/(nN \cdot m)$	n _f	σ _{yi} /MPa		
					马德军法	能量法	分离拉伸法
1.0	1.800	8.58	1,1106	0.0826	183.7	199.0	
2.0	1.955	26.77	7.6969	0.0925	158.8	159.2	/
4,0	2.070	89.56	53. 381	0. 1030	133.6	126.4	95.45



图 3 铝的单轴应力-应变关系



4 论 结

本文使用有限元方法模拟了沉积在硅基底上各 种不同金属薄膜材料的 Berkovich 压痕过程,建立 了一种能量法表征金属薄膜塑性性能的方法.运用

本文提出的模型结合纳米压痕实验推导出了硅基底 上铝薄膜的塑性性能,该结果与单轴拉伸实验的结 果吻合.用本文提出的能量法来表征硅基底上金属 薄膜的塑形性能是完全可行的.

参考文献:

- [1] ARZT E. NIX W D. A model for the effect of line width and mechanical strength on electromigration failure of intercomnects with "near-bamboo" grain structures[J]. Journal of Materials Research, 1991, 6(4); 731-736.
- [2] HARDWICH D A. The mechanical properties of thin films: A Reviwer[J]. Thin Solid Films. 1987. 154(1-2); 109-124.
- [3] MA D.XU K. HE Let al. Evaluation of the mechanical properties of thin metal films[J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 116-119(1); 128-132.
- [4] DAO M, CHOLLACOOP N, SURESH S, et al. Computational modeling of the forward and reverse problems in instrumented sharp indentation [J]. Acta Materialia. 2004, 49(19); 3899-3918.

LIAO Yan-guo¹, HU He-ping^{1, 2}, ZHOU Yi-chun²

(1. School of Mathematics and Physics. University of South China, Hengyang 421001, China; 2. Key Laboratory of Low Dimensional Materials and Application Technology of Ministry of Education. Xiangtan University. Xiangtan 411105, China)

Abstract: The finite element method (FEM) for elastic-plastic large strain was employed to study the indentation of the different kinds of metal films deposited on Si substrate using a rigid Berkovich indenter. In this paper, a new methodology to extract the plastic properties of metal films was proposed using energy dimensional analysis and finite element computation. The calculated plastic properties are consistent with the results measured by a uniaxial tensile test on an Al film deposited on Si substrate, confirming that the energy method to extract the plastic properties of thin films is feasible.

Key words: finite element method (FEM); metal films; yield strength; energy dimensional analysis