

聚焦离子束辅助淀积的淀积速率模型

常 旭 宗祥福

(复旦大学国家微分析中心, 上海 200433)

摘要: 在 U. G. Meyer 离子与表面吸附气体相互作用模型的基础上, 提出了聚焦离子束辅助淀积的淀积速率模型。该模型包含了淀积过程中淀积作用和溅射作用的共同影响, 指出在一定的离子束电流和反应气体流量下, 影响淀积速率的主要因素是离子束的照射时间和扫描周期。模型的计算结果与实验结果比较取得了较好的吻合, 说明该模型比较精确地反映了聚焦离子束辅助淀积的物理过程。

关键词: 淀积速率; 模型; 聚焦离子束

EEACC: 2570; 2560B

中图分类号: TN 405. 98 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2000)04-0404-05

Rate Model of Focused Ion Beam Induced Deposition

CHANG Xu and ZONG Xiang-fu

(National Microanalysis Center, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Received 16 December 1998, revised manuscript received 18 March 1999

Abstract: Focused ion beam induced deposition is a novel method of thin film growth in which adsorbed, precursor gas molecules are decomposed by incident energetic ions thus leaving a deposit. A time-dependent model for deposition rate is presented which includes two parameters of the process: the ion beam's dwell time and its loop time. The model has been fitted to the experiment and is found to describe the various dependences very well. By using of the model, we can predict optimum deposition conditions.

Key words: deposition rate; model; focused ion beam

EEACC: 2570; 2560B

Article ID: 0253-4177(2000)04-0404-05

常 旭 男, 1970 年出生, 博士生, 讲师, 主要从事 FIB 应用技术研究和超大规模集成电路设计。

宗祥福 男, 博士生导师, 教授, 主要从事材料科学和微分析技术研究。

1998-12-16 收到, 1999-03-18 定稿

1 引言

随着超大规模集成电路工艺向亚微米、深亚微米领域迈进, 集成电路产品的特征尺寸越来越小, 器件结构越来越复杂, 相应的电路设计、工艺诊断、失效分析工作也就变得更加复杂和更加困难。聚焦离子束(Focused Ion Beam, 简写为 FIB)设备是对亚微米及深亚微米器件、工艺和所需材料进行微分析研究的十分强有力的工具, 它能在微米和亚微米的线度上对器件和材料进行微细加工(高速率地刻蚀和细线条的沉积), 它还能高分辨地成像, 并结合场发射扫描电镜和透射电镜作微区结构和组分分析, 因而在集成电路设计排错、工艺检查、失效分析及透射电镜辅助制样等方面都有着十分重要的应用^[1-4]。

FIB 设备的一个重要功能是它能在亚微米的线度上沉积金属和二氧化硅。沉积过程首先是在待沉积的样品表面导入反应气体, 当用聚焦离子束扫描这一区域时, 离子束将能量传递给吸附在样品表面的气体分子, 使这些不稳定的气体分子发生分解, 留下金属原子或 SiO₂ 分子, 其余部分则变为挥发性物质被真空抽走。在沉积作用的同时, 由于离子束流的溅射, 样品表面的沉积物质又有损失, FIB 辅助沉积是这样两种效应共同作用的结果。目前这一方面的研究工作主要集中在反应气体的选择和沉积介质膜的物理、电学特性研究^[5,6]。为了充分利用 FIB 辅助沉积功能, 本文在 U.G.Meyer 离子与表面吸附气体相互作用模型^[7]的基础上, 深入研究 FIB 辅助沉积的物理过程, 考虑到沉积过程中离子束的照射时间和扫描周期对沉积速率的影响, 建立了 FIB 辅助沉积的沉积速率模型。模型的计算结果与实验结果比较取得了较好的吻合, 说明该模型比较精确地反映了 FIB 辅助沉积的物理过程。

2 沉积速率模型

在 FIB 辅助沉积过程中, 离子束以电流密度 j 在待沉积的区域中扫描, 在每个象素位置上停留一个照射时间 t_d , 经过一个扫描周期 t_l 后再回到原来的位置。对于一个特定的象素, 在其照射时间 t_d 里, 曝光束流为 i ($i = j/e$), 而在其余的时间 ($t_l - t_d$) 里, 曝光束流为 0, 如图 1(a) 所示。

对于沉积作用, 沉积的原子或分子数取决于离子束引起的气体分子的分解。经过一次扫描, 每个象素位置上沉积的原子或分子数可以表示为:

$$n_{dp} = \int_0^t \eta n^{on}(t) \sigma dt \quad (1)$$

式中 $n^{on}(t)$ 是当离子束曝光时, 这一位置所吸附的气体分子的数密度; η 是沉积的原子或分子附着在样品表面的几率(一般假定为 1); σ 则是曝光离子束引起气体分子分解的反应截面。

同时, 在每个象素位置上, 曝光时由于离子束溅射作用引起的沉积原子或分子数的损失为:

$$n_{sp} = Y_s i t_d \quad (2)$$

Y_s 是离子对沉积物质的溅射产额。

沉积速率 R 是沉积和溅射作用共同影响的结果, 可以表示为:

$$R = \frac{n_{dp} - n_{sp}}{t_l \delta} \quad (3a)$$

即

$$R = \frac{i}{t_l \delta} (\eta \sigma \int_0^t n^{on}(t) dt - Y_s t_d) \quad (3b)$$

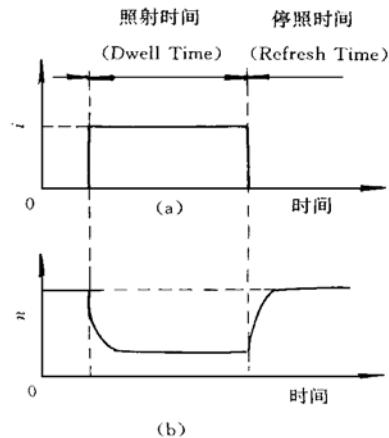


图 1 离子束流与表面吸附在一个扫描周期里的变化

FIG. 1 Time Dependences of (a) Ion Flux, and (b) Gas Adsorption Density.

其中 δ 是淀积物质的原子或分子数密度.

根据 U.G.Meyer 离子与表面吸附气体相互作用模型^[1], $n^{on}(t)$ 可以由下面的方程解得:

$$\frac{dn}{dt} = g\Phi \left[1 - \frac{n}{n_0} \right] - \frac{n}{\tau_m} - \sigma n i \quad (4)$$

方程右边第一项描述了样品表面对反应气体的吸附作用, 其中 g 是气体分子在样品表面的附着系数; Φ 是样品表面的气体流量; n_0 是表面吸附的气体薄层中气体分子的数密度. 第二项代表了吸附气体的自发脱附; τ_m 是表面吸附气体的平均寿命. 第三项则是离子束引起的表面吸附气体分子的分解.

当离子束曝光(“beam on”, $i > 0$)时, 方程(4)的解:

$$n^{on}(t) = n_{eq}^{on} + c^{on} g \Phi \exp(-\Gamma_{on} t) \quad (5a)$$

其中

$$n_{eq}^{on} = g\Phi/\Gamma_{on} \quad (5b)$$

$$\Gamma_{on} = \frac{g\Phi}{n_0} + \frac{1}{\tau_m} + \sigma i \quad (5c)$$

这里的系数 c^{on} 可以通过在非曝光条件(“beam off”, $i = 0$)下解方程(4)求得. 当 $i = 0$,

$$n^{off}(t) = n_{eq}^{off} + c^{off} g \Phi \exp(-\Gamma_{off} t) \quad (6a)$$

其中

$$n_{eq}^{off} = g\Phi/\Gamma_{off} \quad (6b)$$

$$\Gamma_{off} = \frac{g\Phi}{n_0} + \frac{1}{\tau_m} \quad (6c)$$

对方程(5a)、(6a)应用边界条件(图 1(b)), 有

$$n^{off}(0) = n^{on}(t_d) \quad (7a)$$

$$n^{off}(t_l) = n^{on}(0) \quad (7b)$$

方程(7a)、(7b)描述了样品表面吸附的气体分子的数密度随时间变化的连续性. 将求得的 c^{on} 表达式代入方程(5a), 可以得到:

$$n^{on}(t) = n_{eq}^{on} + \frac{(n_{eq}^{off} - n_{eq}^{on})[1 - \exp(-\Gamma_{off} t_l)]}{1 - \exp[-(\Gamma_{on} t_d + \Gamma_{off} t_l)]} \exp(-\Gamma_{on} t) \quad (8)$$

对(8)式在 $[0, t_d]$ 内积分, 并代入方程(3b), 可以得到:

$$R(t_d, t_l) = \frac{i}{\delta t_l} \left[\eta \sigma \left[n_{eq}^{on} t_d + \frac{(n_{eq}^{off} - n_{eq}^{on})[1 - \exp(-\Gamma_{off} t_l)][1 - \exp(-\Gamma_{on} t_d)]}{\{1 - \exp[-(\Gamma_{on} t_d + \Gamma_{off} t_l)]\}(g\Phi/n_0 + \sigma i)} \right] - Y_{std} \right] \quad (9)$$

从方程(9)可以看出, 在一定的离子束工作电流和气体流量下, 影响 FIB 辅助淀积速率的因素主要是离子束照射时间 t_d 和扫描周期 t_l .

3 实验结果比较与讨论

3.1 实验

文中采用的实验设备是 FEI 公司 FIB200xP 型聚焦离子束. 该系统采用 Ga 液态金属离子源, 加速电压 30keV, 离子束电流可以在 1~6600pA 的范围内变化, 相应的离子束斑大约在 0.015~0.3μm. 由于淀积二氧化硅和金属膜的反应气体分别是四乙氧基硅烷($(C_2H_5O)_4Si$)和铂的有机化合物($(CH_3C_6H_4)_3Pt$). 实验中离子束扫描的是一长方形区域, 其淀积速率由单位时间里生长的薄膜厚度给出.

3.2 模型模拟结果与实验结果的对比

对于 SiO_2 淀积和 Pt 淀积, 方程(9)中各项系数的取值见表 1, 其中 n_0 的取值参照了文献[8]的结果. 图 2 给出了在两种淀积过程中, 淀积速率 R_d 随照射时间 t_d 变化的计算结果, 这里选择扫描周期为 2ms, 离子束电流为 350pA, 相应的电流密度为 $14.7A/cm^2$.

表 1 方程(9)中各项系数所采用的参数值

Table 1 Values of Some Coefficients in Equation (9)

	η	g	$\Phi/(cm^{-2} \cdot s^{-1})$	$n_0/cm^{-2}[8]$	τ_m/s	σ/cm^2	δ/cm^{-3}	Y_s
SiO ₂ 沉积	1	1	1.9×10^{17}	7×10^{14}	0.5	2×10^{-13}	4.82×10^{22}	5
Pt 沉积	1	1	4.0×10^{17}	9.2×10^{14}	0.09	1.01×10^{-13}	8.28×10^{22}	4.7

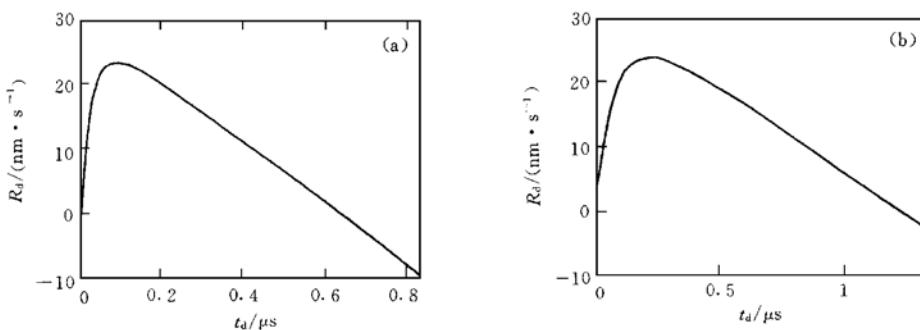


图 2 扫描周期 2ms 时沉积速率随照射时间变化的模拟结果

(a) SiO₂ 沉积, (b) Pt 沉积.

FIG. 2 Calculated Deposition Rate as a Function of Dwell Time When the Loop Time is 2ms

(a) SiO₂ Deposition, (b) Pt Deposition.

图中可以看出,对于 SiO₂ 和 Pt 沉积,虽然各自所用的气体流量不同,反应气体在样品表面的附着情况和沉积物质单位体积内的数密度也不一样,但是两种情况下沉积速率随照射时间变化的趋势一致,只是后者的变化比前者更缓.当照射时间增大到一定的数值,沉积速率开始出现负值,这说明随着这一象素位置反应气体的消耗,溅射作用逐渐超过了沉积作用,沉积物质开始出现负增长.因此照射时间 t_d 的取值对于 FIB 辅助沉积非常重要,如果 t_d 过小,样品表面吸附的反应气体得不到充分反应;如果 t_d 过大,这一象素位置上的反应气体被完全消耗,沉积过程就会转化到溅射这程.这两种情况都会影响到 FIB 辅助沉积的使用效率. t_d 的取值适中,可以使沉积速率 R 达到其峰值.

根据图 2 的计算结果,对于 SiO₂ 和 Pt 沉积,分别选择照射时间 t_d 为 $0.2\mu s$ 、 $0.4\mu s$ 进行实验,结果如图 3 所示.图中的平滑曲线是相同条件下的模型计算结果.图中可以看出,对于两种介质沉积,模型计算与实验结果都取得了较好的吻合,说明该模型比较精确地反映了 FIB 辅助沉积的物理过程.图 3 中,沉积速率随扫描周期的增大而减小,说明在一定的离子束电流情况下,沉积时间不是随沉积图样的增大成比例地增加,而是增加得更多.为了节约沉积时间,充分利用反应气体源,在沉积面积较大的图样时,应当考虑选用更大的离子束电流.

4 结论

本文在 U.G.Meyer 离子与表面吸附气体相互作用模型^[1]的基础上,深入研究了 FIB 辅助沉积的物理过程.建立了 FIB 辅助沉积的沉积速率模型.该模型指出在一定的离子束电流和反应气体流量下,影响 FIB 辅助沉积沉积速率的因素主要是离子束照射时间 t_d 和扫描周期 t_l .如果 t_d 的取值过小,样品表面吸附的反应气体得不到充分反应;如果 t_d 取值过大,这一象素位置上的反应气体被完全消耗,就会由沉积过程转化到溅射过程; t_d 的取值适中,可以使沉积速率 R 达到峰值.在 t_d 一定的情况下,沉积速率随扫描周期的增大

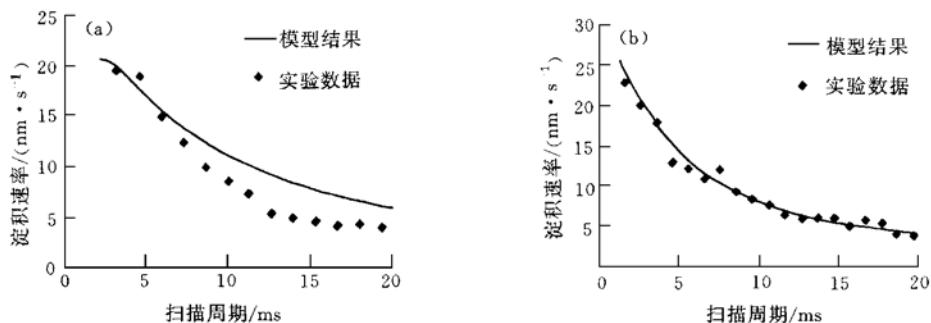


图 3 沉积速率随扫描周期变化的模拟结果与实验结果的比较

(a) SiO₂ 沉积, 照射时间 0.2μs; (b) Pt 沉积, 照射时间 0.4μs.

FIG. 3 Comparison of Experiment and Calculated Results of Deposition Rate as a Function of Loop Time

(a) SiO₂ Deposition, Dwell Time 0.2μs (b) Pt Deposition, Dwell Time 0.4μs

而减小。模型的计算结果与实验结果比较取得了较好的吻合,说明该模型比较精确地反应了 FIB 辅助沉积的物理过程。该模型的建立,对于 FIB 辅助沉积技术的应用,特别是提高 FIB 辅助沉积的效率,具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1] W. B. Thompson and R. G. Lee, Micrion Corporation, Focused Ion Beam Process Monitoring, 1995.
- [2] M. Abramo and R. Wasilewski, Semicond. Int., 1997, 133.
- [3] 毕建华, 等, 微细加工技术, 1996, 2: 26[BI Jianhua *et al.*, Microfabrication Technology, 1996, 2: 26(in Chinese)].
- [4] 张韧恕, 等, 电子学报, 1998, 26: 69[ZHANG Renshu *et al.*, Acta Electrica Sinica, 1998, 26: 69(in Chinese)].
- [5] P. J. Heard and P. D. Prewett, Microelectron. Eng., 1990, 11: 421.
- [6] J. L. Lee and D. H. Yao, 21st International Symposium for Testing and Failure Analysis, 1995, 241.
- [7] U. G. Meyer, Surf. Sci., 1981, 103: 524.
- [8] FEI Company, FIB Workstation Reference Guide, 1997.