

计算 MOS 器件应力的简单方法

黄庆安 童勤义

(东南大学微电子中心, 南京 210018)

摘要 本文根据 SiO_2 薄膜的边缘力集中近似模型, 求出了硅 MOS 器件中的应力场。计算结果与 K. Kobayashi (1990) 进行的 Raman 谱测量结果吻合较好。

关键词 MOS 器件; 机械应力; Raman 谱法

一、引言

MOS 器件按比例缩小是提高集成电路集成度和性能的主要途径之一^[1]。但较小的器件尺寸会使 MOS 有源区的应力增大。这种应力对器件的影响有两种不同的形式: (1) 器件制作过程中的应力会产生缺陷^[2,3]; (2) 器件制成后残余的应力会导致 n -MOSFET 的迁移率降低^[4,5]。因此, 近年来, MOS 器件中应力场的计算及工艺控制措施得到了人们的普遍重视^[6-8]。由于 MOS 器件中应力的相对复杂性, 这些计算均是以数值模型为基础的, 且这些模型强调了硅氧化工艺过程中的应力产生, 很少涉及氧化物中的残余应力在衬底中诱致的应力场。本文根据 SiO_2 薄膜的边缘力集中近似模型, 求出了由于 SiO_2 中的残余机械应力在硅衬底中产生的应力场。本文的计算结果与 K. Kobayashi 等人^[9]进行的 Raman 谱应力测量的结果吻合较好。

二、应力场的计算

1. SiO_2 薄膜中的应力分布

在 MOS 集成电路中, SiO_2 常作为栅介质(氧化工艺)和隔离介质(硅的局部氧化(LOCOS)工艺)。为使问题处理方便, 我们把这两种介质结构简化为图 1 所示的情况。图中 L 表示 SiO_2 膜相对两边缘间的距离, d_f 表示 SiO_2 的厚度。

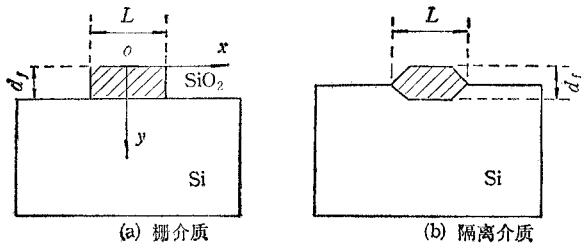


图 1 SiO_2 薄膜与硅衬底的作用

热氧化 SiO_2 栅介质中的应力来源于 SiO_2 与硅的热膨胀失配。LOCOS SiO_2 中的应力来源于 SiO_2

与硅的热膨胀失配及硅氧化成 SiO_2 的体积膨胀^[6-8]。在远离 SiO_2 边缘时, SiO_2 薄膜中的应力几乎是均匀的, 并用 σ_f 来表示,

$$\sigma_f = E_f \Delta \alpha \Delta T \quad (1)$$

式中 E_f 是 SiO_2 的杨氏模量, $\Delta \alpha$ 是硅与 SiO_2 的热膨胀系数差, ΔT 是 SiO_2 生长时的温度与环境温度差。但在集成电路中, 有源器件往往处于 SiO_2 薄膜的边缘。根据弹性力学知道, 在薄膜的不连续处应力强烈地集中^[10]。这种应力的集中会在衬底中诱致较强的应力场, 使器件性能受到影响。

Aleck 和 Zeyfang 等人^[11,12]已计算了无限大衬底上薄膜的应力分布。图 2(a), 2(b) 和 2(c) 分别画出了薄膜和衬底界面处, 薄膜中平行于界面的应力 σ_x , 垂直于界面的应力 σ_y 和剪切应力 σ_{xy} 的分布(所用数据 $L/2d_f = 5$, 泊松比 $\nu = 0.25$)^[11]。从图 2 中可以看

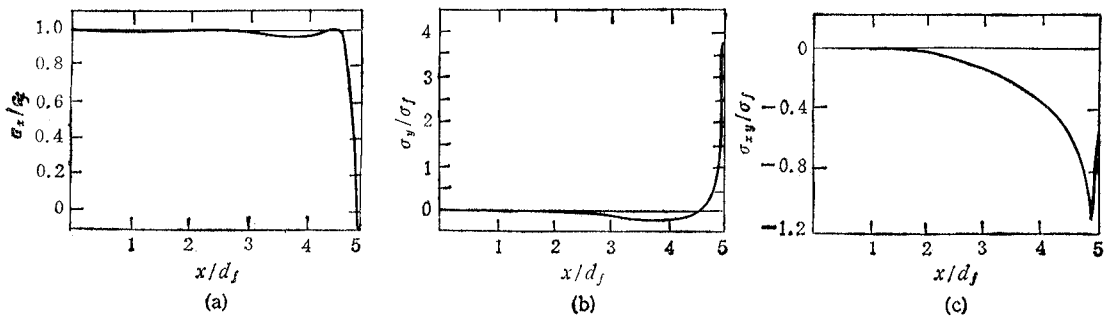


图 2 薄膜中各应力分量的分布

出, 在边缘附近, 垂直于界面的应力 σ_y 大约是薄膜应力的 4 倍, 剪应力 σ_{xy} 大约是薄膜应力的 1.2 倍, 这两种应力在远离边缘以后, 都衰减为零; 而平行于界面的应力 σ_x 在远离边缘后, 等于薄膜的应力 σ_f 。

根据弹性力学可知^[10], 只有界面处 SiO_2 中的剪应力 σ_{xy} 及垂直于界面的应力 σ_y 才对衬底产生影响。通常 SiO_2 薄膜的厚度相对于衬底是较薄的; 同时 σ_y 及 σ_{xy} 又主要集中在薄膜的边缘附近, 所以, 可把薄膜中的应力近似为集中在边缘。为了得到这种边缘集中力, 将 σ_{xy} 沿界面方向从边缘向中心积分。积分的结果表明, 单位薄膜宽度的总集中力 P 平行于界面, 且精度在 10% 内时, 可表达为^[13]

$$P = \sigma_f d_f \quad (2)$$

而在相同精度内, 垂直于界面的应力 σ_y 积分结果为零。这种处理方法称为边缘力集中近似, 在 $L/2d_f \geq 5$ 时, 精度较好^[13]。

2. 硅衬底中的应力场

图 3 给出了计算硅衬底中应力场的参考坐标系。通常 MOSFET 栅的宽度(z 方向)远大于栅的长度(y 方向), 因此, 可归结为二维问题。若假定硅是弹性各向同性的, 则衬底中各应力分量满足的基本方程为^[10]

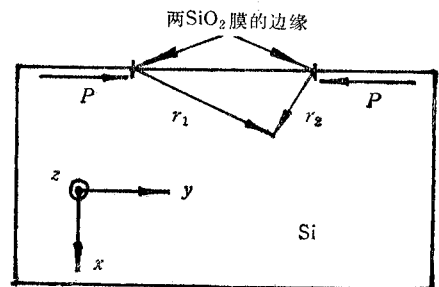


图 3 计算硅衬底中应力场的参考坐标系

$$\left. \begin{aligned} \partial\sigma_{xx}/\partial x + \partial\sigma_{yx}/\partial y &= 0 \\ \partial\sigma_{xy}/\partial x + \partial\sigma_{yy}/\partial y &= 0 \\ \nabla^2(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) &= 0 \\ \sigma_{xx} &= \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 ν 是硅的泊松比。硅的 3 个独立的弹性常数是 $C_{11} = 1.657 \times 10^7$, $C_{12} = 0.639 \times 10^7$ 和 $C_{44} = 0.796 \times 10^7 \text{N/cm}^2$ 。Voigt 平均剪切模量 μ 及 Lamé 常数 λ 可由下式求出:

$$\begin{aligned} H &= 2C_{44} + C_{12} - C_{11} \\ \mu &= C_{44} - H/5 \\ \lambda &= C_{12} - H/5 \end{aligned}$$

而泊松比

$$\nu = \lambda/[2(\mu + \lambda)] = 0.23$$

若用上节的边缘力集中近似,容易求出应力的各分量为^[10]

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx} &= -(2d_f\sigma_f/\pi)(y_1x^2/r_1^4 - y_2x^2/r_2^4) \\ \sigma_{yy} &= -(2\sigma_f d_f/\pi)(y_1^3/r_1^4 - y_2^3/r_2^4) \\ \sigma_{xy} &= -(2\sigma_f d_f/\pi)(y_1^2x/r_1^4 - y_2^2x/r_2^4) \\ \sigma_{xz} &= -(2\nu\sigma_f d_f/\pi)(y_1/r_1^2 - y_2/r_2^2) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其余的应力分量 $\sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0$ 。式中 $r_1^2 = x^2 + y_1^2$, $r_2^2 = x^2 + y_2^2$, $y_1 + y_2 = L$ 。

图 4(a), 4(b), 4(c) 和 4(d) 分别给出了硅衬底中各应力分量在 $x = 0.1 \mu\text{m}$ 处的分布(计算所用数据为 $L = 10 \mu\text{m}$, $d_f = 0.2 \mu\text{m}$, $\sigma_f = 5 \times 10^4 \text{N/cm}^2$)。由此可以看出,

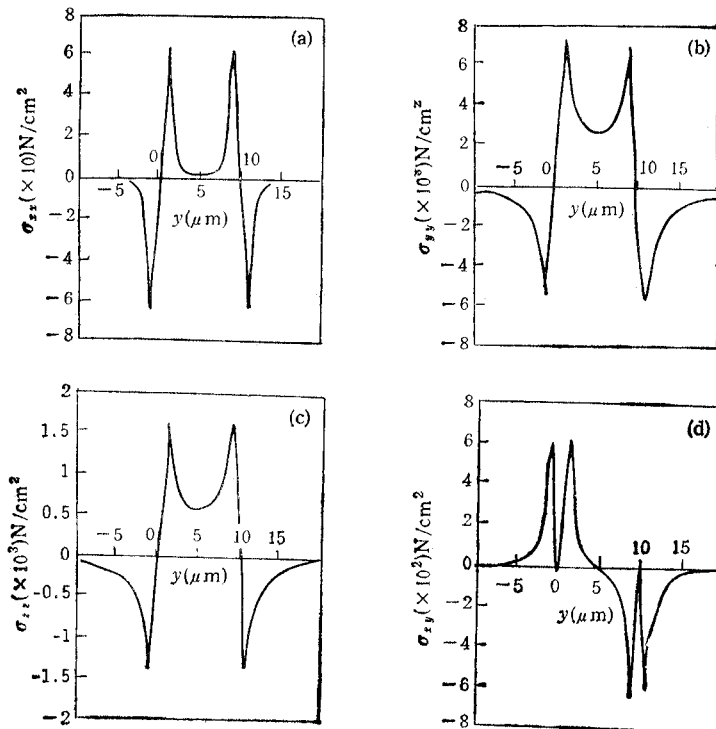


图 4 硅衬底中各应力分量的分布 ($x = 0.1 \mu\text{m}$)

剪切应力 σ_{xy} 在 L 区内的大部分区域接近于零, 仅在边缘附近较大. 这一点已经有实验证实^[14]. 垂直于界面的应力 σ_{xx} 在 L 区内的绝大部分也接近于零, 而平行于界面的应力 σ_{yy} 和 σ_{zz} 在 L 区内较大. 若 L 很小, 如 $1\mu\text{m}$, 则 L 区内的应力几乎达到了 SiO_2 中应力的值; 同时因为在 L 区内的大部分区域, σ_{xy} 和 σ_{xx} 较小, 而 σ_{yy} 和 σ_{zz} 较大, 且二者比较接近; 所以, 可以近似认为 L 区内的应力——应变在平行于界面的方向发生.

三、与 Raman 谱测量结果的比较

硅无应变时, 波矢 $\mathbf{K} = 0$ 的光学声子是三重简并的. 当存在无轴或二维应变时, 若应力平行于 (001) 方向, $\mathbf{K} = 0$ 光学声子的三重简并分裂成 \mathbf{K} 平行于应力的单线及 \mathbf{K} 垂直于应力的双线^[15]. 若入射光及散射光沿 (110) 轴偏振, 则按 Raman 选择定则, 仅能观察到单线, 且 Raman 频率偏移 $\Delta\omega$ 与应力 T 呈线性关系^[15]

$$T \approx 2.49 \times 10^4 \Delta\omega \quad (\text{N/cm}^2) \quad (5)$$

若由于应力作用使 Raman 频率向低偏移, $\Delta\omega < 0$, 则为张应力; Raman 频率向高偏移, $\Delta\omega > 0$ 则为压应力.

由于 Raman 测量的结果反映的是某一深度内的平均应力, 如 488nm 线, 在硅中穿透深度大约是 $0.7\mu\text{m}$. 而(4)式表述了某一深度处的应力, 为了便于比较, 下面给出了 σ_{yy} 沿深度方向的平均值 $\bar{\sigma}_{yy}$,

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{yy} &= \frac{1}{x} \int_0^x \sigma_{yy} dx \\ &= -\frac{2\sigma_1 d_f}{\pi} \left[\frac{y_1}{x^2 + y_1^2} + \frac{1}{2x} \frac{y_1}{|y_1|} \arctg\left(\frac{x}{|y_1|}\right) \right. \\ &\quad \left. - \frac{y_2}{x^2 + y_2^2} - \frac{1}{2x} \frac{y_2}{|y_2|} \arctg\left(\frac{x}{|y_2|}\right) \right] \quad (6) \end{aligned}$$

图 5(a), 5(b) 和 5(c) 分别给出了 LOCOS 工艺生长的 SiO_2 , $d_f = 0.68\mu\text{m}$, 不同 L 下 ($L = 1.2\mu\text{m}$, $2.2\mu\text{m}$, $9.2\mu\text{m}$) Raman 谱测出的应力分布^[9]. 同时也给出了按

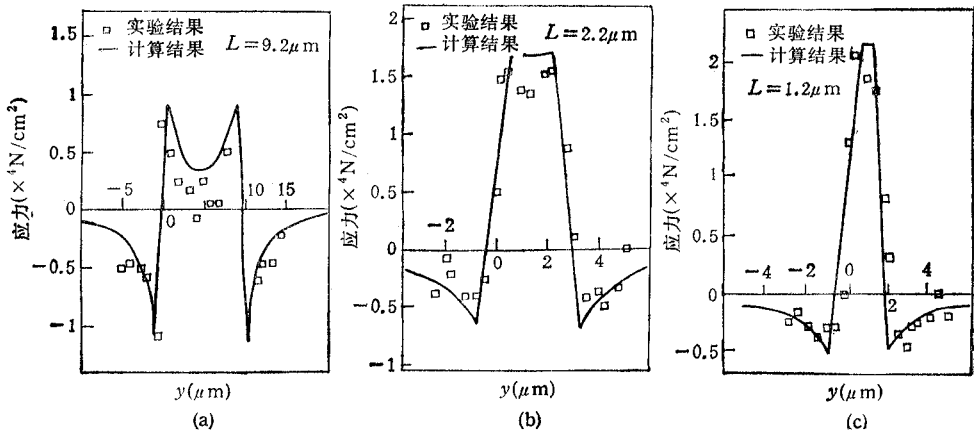


图 5 不同 L 下, 硅衬底中应力分布 Raman 测量结果^[9]与本文计算结果的比较

(6)式计算的应力分布 ($\sigma_f = 5 \times 10^4 \text{N/cm}^2$)。从图中可以看出, 计算与实验吻合较好。

四、讨论和结论

SiO_2 中的残余机械应力会引起 MOS 迁移率降低, 因此, 研究这种结构中的应力对器件设计具有重要意义。本文根据边缘力集中近似模型, 给出了硅衬底中应力分布的简单表达式。

随着 L 的缩短, 有源区应力明显增大, 本文这一推论与已有实验结果吻合较好。由于缩短栅的长度是 MOS 集成电路的主要发展方向, 因此, 根据本文计算的结果认为, 若要减小器件中的应力, 应优化 SiO_2 的生长工艺, 使之应力减小; 减薄 SiO_2 厚度, 也可明显减小有源区中的应力^[6]。

由于本文采用了边缘力集中近似, 即把薄膜中的应力集中在边缘, 使问题大为简化。但由此计算的结果稍大于实测的值。考虑到 SiO_2 薄膜中应力分布的情况, 计算硅衬底中的应力分布尚需进一步研究。

本文给出的 MOS 器件的应力模型简单、可靠, 可望在进一步研究与应力有关的问题时得到应用。

参 考 文 献

- [1] 童勤义, 超大规模集成物理学导论, 电子工业出版社, 北京, 1988年。
- [2] A. Bohg et al., *Appl. Phys. Lett.*, **33**(1978)6, 895—897.
- [3] Y. Tamaki et al., *J. Electrochem. Soc.*, **130**(1983)10, 2266—2270.
- [4] H. Mikoshiba, *Solid State Electron.*, **24**(1981)3, 221—225.
- [5] J. Mitsuhashi, Mechanical stress and hydrogen effects on hot carrier injection, *Proc. IEDM, USA*, (1986), pp. 386—389.
- [6] D. J. Chin et al., *IEEE Trans. on ED*, **ED-30**(1983)7, 744—749.
- [7] H. Matsumoto et al., *IEEE Trans. on ED*, **ED-32**(1985)2, 132—140.
- [8] D. B. Kao et al., *IEEE Trans. on ED*, **ED-35**(1988)1, 25—37.
- [9] K. Kobayashi et al., *J. Electrochem. Soc.*, **137**(1990)6, 1987—1989.
- [10] 钱伟长, 叶开源, 弹性力学, 科学出版社, 北京, 1956年, 第五章。
- [11] R. Zeyfang, *Solid State Electron.*, **14**(1979)9, 1035—1039.
- [12] I. A. Blech et al., *ASME J. Appl. Mech.*, **48**(1981)6, 442—445.
- [13] H. Booyens et al., *J. Appl. Phys.*, **54**(1983)10, 5779—5784.
- [14] E. P. EerNisse, *Appl. Phys. Lett.*, **35**(1979)8, 8—10.
- [15] E. Anastassaki et al., *Solid State Communication*, **8**(1970)2, 133—135.
- [16] 黄庆安, 童勤义, MOSFET 的机械应力模型, 第七届全国半导体集成技术与硅材料学术年会, 成都, 1991年, 第97—98页。

A SIMPLE APPROACH TO THE CALCULATION OF THE MECHANICAL STRESS IN SILICON DEVICES

Huang Qinan Tong Qinyi

(Microelectronics Center, Southeast University, Nanjing 210018)

Abstract The residual mechanical stress in SiO_2 films results in the degradation of mobilities in MOSFETs. Based on the edge force approximation in SiO_2 films, the stress field in MOS device is obtained. The results here are in agreement with those measured by the Raman spectrum method.

Key words MOS device; Mechanical stress; Raman spectrum method