

本征氧化层对 Si 纳米板弹性模量的影响*

王 静 黄庆安[†] 于 虹

(东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 南京 210096)

摘要: 采用能量法计算了表面不带氧化层的 Si 纳米板和表面带不同厚度氧化层的 Si 纳米板的杨氏模量. 结果表明, 表面带氧化层的 Si 纳米板杨氏模量随着板厚度的减小而增加, 不带氧化层的则随之降低, 但当板厚度增加时, 它们都趋于一个定值 123GPa. 板的杨氏模量随表面氧化层层数的增加而上升, 随着板厚度的减小, 氧化层的影响起到了决定性的作用. 当表面带氧化层的纳米板厚度为 50nm 时, 板的杨氏模量随着氧化层层数的增加从 120GPa 上升到近 200GPa. 计算结果解释了目前报道的 Si 纳米板杨氏模量尺度效应不一致的原因.

关键词: 本征氧化; 纳米板; 弹性模量

EEACC: 2520

中图分类号: O484.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)07-1048-05

1 引言

Si 微机械加工的梁、桥和板是微纳器件的基本结构. 杨氏模量是描述力学性能的基本参数. 对于体 Si 材料或微米尺度的 Si 梁, 弹性模量是一常数. 但是当板的厚度薄到纳米量级时, 杨氏模量则与体 Si 不同. 最近几年, 人们对这种行为进行了实验和理论研究, 但结果并不一致. 在纳米尺度, 有的研究表明杨氏模量比体 Si 大^[1], 有的则随尺度的减小而减小^[2]. 结果不一致的原因, 推测可能是表面应力、表面重构等的影响. 本文认为在 Si 纳米结构的制造过程中, 它们的加工工艺都将导致表面本征氧化层的存在, 因此本征氧化层的存在将对 Si 纳米结构的弹性模量有影响. 由于从实验研究本征氧化层的影响非常困难, 因此, 本文着重从理论上进行研究, 其结果对理解本征氧化层的作用有一定参考价值.

2 表面氧化的 Si 纳米板

2.1 三维 Si 纳米板应变能计算模型

首先, 考虑一个如图 1 所示 x, y 方向为无限大, z 方向上厚度均匀且为有限值 h 的三维 Si 板, 其上、下表面存在相同厚度的氧化层, 且 Si-SiO₂ 的界面及 SiO₂ 表面都在 (100) 面上. 将一个典型的 Si 或 SiO₂ 晶胞单元长度设定为一层, 则在厚度方向上 Si 为 $2N$ 层, 上、下表面的 SiO₂ 均为 n 层. 由晶格的周期性边界条件和几何对称性, 可以从板中选择一

个 Si 晶胞并沿厚度方向进行计算. 设 Si 晶格常数为 a , 则计算单元的体积为 $a \times a \times h$. 这种在厚度方向上分离的计算方法也就为考虑表面氧化问题提供了可行性.

在 Si 的晶胞中, 每个 Si 原子有 4 个共价键连接 4 个 Si 原子, 考虑典型晶胞单元中所有的两两有键相连的原子间的相互作用, 则可看成对角线上的 4 个原子分别和 4 个 Si 原子相连, 如图 2 所示. 我们选择 Si 的氧化层结构为 β -方石英的 SiO₂ 结构^[3]. 为使 SiO₂ 和 Si 的晶胞相匹配, 将 SiO₂ 晶胞在 x 方向和 y 方向上的长和宽设定为与 Si 的晶格常数 a 相同, 在 z 方向上的高度设定为 0.768nm 且与 Si 晶格常数之比为 α , 并且在 SiO₂ 的表面, 考虑了表面原子的重构, 即 (2×1) 重构^[4], 如图 3 所示. 在 SiO₂ 晶胞中, 每个 Si 原子和 4 个氧原子相连. 与 Si

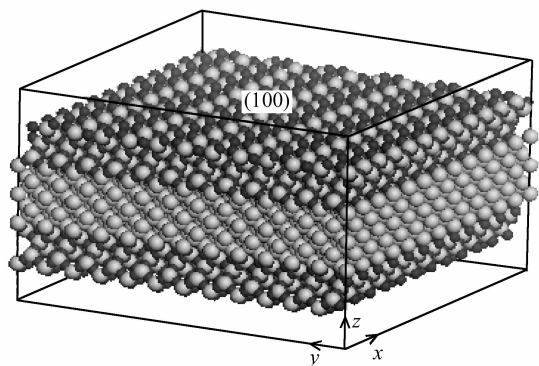


图 1 (100) 表面带氧化层的 Si 板模型
Fig. 1 3D model of a (100) silicon nano-plate with surface native oxide and surface reconstructions

* 国家重点基础研究发展规划资助项目(批准号:2006CB300404)

[†] 通信作者. Email: hqa@seu.edu.cn

2007-01-04 收到, 2007-02-17 定稿

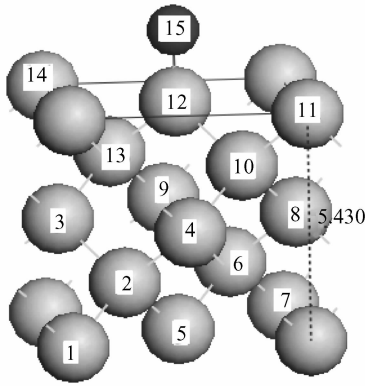


图 2 Si 晶胞单元及界面的一个氧原子

Fig. 2 Schematic of a Si lattice cell with an interface oxygen atom

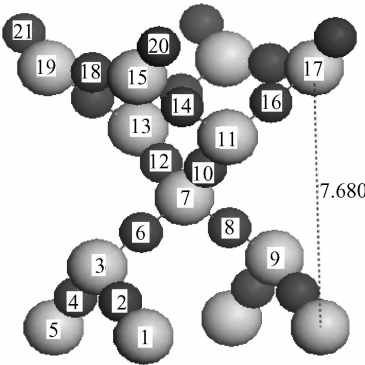


图 3 表面重构的 SiO₂ 晶胞单元

Fig. 3 Schematic of a SiO₂ lattice cell with surface reconstructions

晶格的计算方法相同, 仍是计算两两有键相连的 Si 原子和 O 原子的相互作用. 先计算一个晶胞中近邻原子间的相互作用, 再计算一层层晶胞, 就可以得到 Si—Si 与 SiO₂ 界面—SiO₂—SiO₂ 重构表面的变形能. 由于晶格的周期性, 计算时只考虑晶胞内、晶胞左表面和晶胞上表面原子间的相互作用.

将每个原子和近邻原子间的相互作用(键)看作是弹性相连, 即弹簧连接, 弹性常数为 k , 则变形能可表示为

$$U_{2-1} = \frac{1}{2} k_1 \left[\sqrt{\left(\frac{1}{4}a + u_{i+1/4, j+1/4, l+1/4} - u_{i, j, l}\right)^2 + \left(\frac{1}{4}a + v_{i+1/4, j+1/4, l+1/4} - v_{i, j, l}\right)^2 + \left(\frac{1}{4}a + w_{i+1/4, j+1/4, l+1/4} - w_{i, j, l}\right)^2} - \sqrt{\left(\frac{1}{4}a\right)^2 + \left(\frac{1}{4}a\right)^2 + \left(\frac{1}{4}a\right)^2} \right]^2$$

$$\approx \frac{1}{6} k_1 \left[(u_{i+1/4, j+1/4, l+1/4} - u_{i, j, l}) + (v_{i+1/4, j+1/4, l+1/4} - v_{i, j, l}) + (w_{i+1/4, j+1/4, l+1/4} - w_{i, j, l}) \right]^2$$

$$= \frac{1}{6} k_1 \left[\left[u_{i, j, l} + \frac{1}{4} a \frac{\partial u_{i, j, l}}{\partial x} \Big|_{(i, j, l)} + \frac{1}{4} a \frac{\partial u_{i, j, l}}{\partial y} \Big|_{(i, j, l)} + \frac{1}{4} a \frac{\partial u_{i, j, l}}{\partial z} \Big|_{(i, j, l)} - u_{i, j, l} \right] + \right.$$

$$U = \frac{1}{2} \sum_i k (b_i - b_0)^2 \quad (1)$$

其中 b_i 为变形后的第 i 个键的键长; b_0 为变形前的键长. b_i 和 b_0 可由原子间的距离确定. Si 的弹性常数 $k_1 = 198.4032 \text{N/m}$, SiO₂ 的弹性常数 $k_2 = 576.756 \text{N/m}$ ^[5,6]. 将晶胞中的一个原子的位置设为 (x_i, y_j, z_l) , 简略为 (i, j, l) , 其在 x, y, z 方向上的位移分别为 $u(i, j, l), v(i, j, l), w(i, j, l)$, 简略为 $u_{i, j, l}, v_{i, j, l}, w_{i, j, l}$. 则可将板的总变形能写为

$$U_{\text{tot}} = \sum_i \sum_j \sum_l^{2N} U_{ijl}^A + \sum_i \sum_j \sum_l^{2n} U_{ijl}^B + \sum_i \sum_j \sum_l^2 U_{ijl}^C + \sum_i \sum_j \sum_l^2 U_{ijl}^D \quad (2)$$

其中 A, B, C 分别代表 Si, SiO₂, SiO₂ 重构表面; D 代表 Si-SiO₂ 界面上与 Si 晶胞相连的单个 Si—O 键, 如图 2 所示. 则 Si 晶胞的变形能可以按图 2 表示为如下形式:

$$U_{ijl}^A = U_{1-2} + U_{3-2} + U_{4-2} + U_{5-2} + U_{5-6} + U_{7-6} + U_{8-6} + U_{9-6} + U_{4-10} + U_{8-10} + U_{11-10} + U_{12-10} + U_{3-13} + U_{9-13} + U_{12-13} + U_{14-13} \quad (3)$$

其中 U_{1-2}, U_{3-2} 等分别代表原子 1 和 2 之间、3 和 2 之间等原子之间键的变形能. 同样, 由图 3 SiO₂ 晶胞的变形能可表示为

$$U_{ijl}^B = U_{2-1} + U_{2-3} + U_{4-3} + U_{4-5} + U_{6-3} + U_{6-7} + U_{8-7} + U_{8-9} + U_{10-7} + U_{10-11} + U_{12-7} + U_{12-13} + U_{14-11} + U_{14-15} + U_{16-11} + U_{16-17} \quad (4)$$

由图 3 SiO₂ 表面重构原子的变形能可表示为

$$U_{ijl}^C = U_{18-15} + U_{20-15} + U_{18-19} + U_{21-19} \quad (5)$$

由图 2 Si-SiO₂ 界面存在的单个 Si—O 键变形能可表示为

$$U_{ijl}^D = U_{12-15} \quad (6)$$

为了得到上述变形能, 可将坐标为 $(i+1, j, l)$ 的原子沿 x 方向的位移在坐标 (i, j, l) 处做泰勒展开并保留前两项^[7]:

$$u_{i+1, j, l} = u_{i, j, l} + \frac{\partial u(x, y)}{\partial x} \Big|_{(x_i, y_j, z_l)} (x_{i+1} - x_i) \quad (7)$$

同样, 可以写出沿 y 方向和 z 方向位移的泰勒展开式. 则 Si 晶胞中原子 2 与 1 之间的键的变形能为

$$\begin{aligned}
& \left[v_{i,j,l} + \frac{1}{4} a \frac{\partial v_{i,j,l}}{\partial x} \Big|_{(i,j,l)} + \frac{1}{4} a \frac{\partial v_{i,j,l}}{\partial y} \Big|_{(i,j,l)} + \frac{1}{4} a \frac{\partial v_{i,j,l}}{\partial z} \Big|_{(i,j,l)} - v_{i,j,l} \right] + \\
& \left[w_{i,j,l} + \frac{1}{4} a \frac{\partial w_{i,j,l}}{\partial x} \Big|_{(i,j,l)} + \frac{1}{4} a \frac{\partial w_{i,j,l}}{\partial y} \Big|_{(i,j,l)} + \frac{1}{4} a \frac{\partial w_{i,j,l}}{\partial z} \Big|_{(i,j,l)} - w_{i,j,l} \right]^2 \\
& = \frac{1}{96} k_1 a^2 \left[\frac{\partial u_{i,j,l}}{\partial x} \Big|_{(i,j,l)} + \frac{\partial u_{i,j,l}}{\partial y} \Big|_{(i,j,l)} + \frac{\partial u_{i,j,l}}{\partial z} \Big|_{(i,j,l)} + \frac{\partial v_{i,j,l}}{\partial x} \Big|_{(i,j,l)} + \right. \\
& \quad \left. \frac{\partial v_{i,j,l}}{\partial y} \Big|_{(i,j,l)} + \frac{\partial v_{i,j,l}}{\partial z} \Big|_{(i,j,l)} + \frac{\partial w_{i,j,l}}{\partial x} \Big|_{(i,j,l)} + \frac{\partial w_{i,j,l}}{\partial y} \Big|_{(i,j,l)} + \frac{\partial w_{i,j,l}}{\partial z} \Big|_{(i,j,l)} \right]^2 \quad (8)
\end{aligned}$$

为了简化(8)式,由应变与位移的关系

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z},$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}, \gamma_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}, \gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}$$

可将(8)式表示为

$$U_{2-1} = \frac{k_1 a^2}{96} (\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z + \gamma_{xy} + \gamma_{zx} + \gamma_{yz})^2 \quad (9)$$

且 $U_{1-2} = U_{2-1}$. 同样,

$$\begin{aligned}
U_{1-2} &= U_{5-6} = U_{4-10} = U_{3-13} \\
&= \frac{k_1 a^2}{96} (\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z + \gamma_{xy} + \gamma_{zx} + \gamma_{yz})^2 \\
U_{3-2} &= U_{9-6} = U_{12-10} = U_{14-13} \\
&= \frac{k_1 a^2}{96} (\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z - \gamma_{xy} - \gamma_{zx} + \gamma_{yz})^2 \\
U_{4-2} &= U_{8-6} = U_{11-10} = U_{12-13} \\
&= \frac{k_1 a^2}{96} (\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z - \gamma_{xy} + \gamma_{zx} - \gamma_{yz})^2 \\
U_{5-2} &= U_{7-6} = U_{8-10} = U_{9-13} \\
&= \frac{k_1 a^2}{96} (\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z + \gamma_{xy} - \gamma_{zx} - \gamma_{yz})^2
\end{aligned} \quad (10)$$

则

$$\begin{aligned}
U_{ijl}^A &= \frac{k_1 a^2}{24} [(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z + \gamma_{xy} + \gamma_{zx} + \gamma_{yz})^2 + \\
& (\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z - \gamma_{xy} - \gamma_{zx} + \gamma_{yz})^2 + \\
& (\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z - \gamma_{xy} + \gamma_{zx} - \gamma_{yz})^2 + \\
& (\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z + \gamma_{xy} - \gamma_{zx} - \gamma_{yz})^2] \quad (11)
\end{aligned}$$

SiO_2 晶胞、 SiO_2 重构表面及 Si-SiO_2 界面的单个 Si-O 键的变形能的计算与 Si 晶胞的方法相同,得到

$$\begin{aligned}
U_{ijl}^B &= \frac{k_2 a^2}{2(4 + \alpha^2)} \left[\left(\epsilon_y + \frac{\alpha^2}{4} \epsilon_z + \frac{\alpha}{2} \gamma_{yz} \right)^2 + \right. \\
& \left(\epsilon_y + \frac{\alpha^2}{4} \epsilon_z - \frac{\alpha}{2} \gamma_{yz} \right)^2 + \left(\epsilon_x + \frac{\alpha^2}{4} \epsilon_z + \frac{\alpha}{2} \gamma_{zx} \right)^2 + \\
& \left. \left(\epsilon_x + \frac{\alpha^2}{4} \epsilon_z - \frac{\alpha}{2} \gamma_{zx} \right)^2 \right] \quad (12)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U_{ijl}^C &= \frac{k_2 a^2}{16} \left[\frac{3}{(4 + \alpha^2)} \left(\epsilon_y + \frac{\alpha^2}{4} \epsilon_z + \frac{\alpha}{2} \gamma_{yz} \right)^2 \right. \\
& \left. + 2\epsilon_y^2 + \frac{3}{(4 + \alpha^2)} \left(\epsilon_y + \frac{\alpha^2}{4} \epsilon_z - \frac{\alpha}{2} \gamma_{yz} \right)^2 \right] \quad (13)
\end{aligned}$$

$$U_{ijl}^D = \frac{k_2 a^2}{2} \beta^2 \epsilon_z^2 \quad (14)$$

其中 β 为 Si-O 键长与 Si 晶格常数之比.

则计算单元的总变形能为

$$\begin{aligned}
U &= \sum_l^{2N} U_{ijl}^A + \sum_l^{2n} U_{ijl}^B + \sum_l^2 U_{ijl}^C + \sum_l^2 U_{ijl}^D \\
&= \frac{Nk_1 a^2}{12} [(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z + \gamma_{xy} + \gamma_{zx} + \gamma_{yz})^2 + \\
& (\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z - \gamma_{xy} - \gamma_{zx} + \gamma_{yz})^2 + \\
& (\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z - \gamma_{xy} + \gamma_{zx} - \gamma_{yz})^2 + \\
& (\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z + \gamma_{xy} - \gamma_{zx} - \gamma_{yz})^2] + \\
& \frac{nk_2 a^2}{(4 + \alpha^2)} \left[\left(\epsilon_y + \frac{\alpha^2}{4} \epsilon_z + \frac{\alpha}{2} \gamma_{yz} \right)^2 + \right. \\
& \left. \left(\epsilon_y + \frac{\alpha^2}{4} \epsilon_z - \frac{\alpha}{2} \gamma_{yz} \right)^2 + \left(\epsilon_x + \frac{\alpha^2}{4} \epsilon_z + \frac{\alpha}{2} \gamma_{zx} \right)^2 + \right. \\
& \left. \left(\epsilon_x + \frac{\alpha^2}{4} \epsilon_z - \frac{\alpha}{2} \gamma_{zx} \right)^2 \right] + \\
& \frac{k_2 a^2}{8} \left[\frac{3}{(4 + \alpha^2)} \left(\epsilon_y + \frac{\alpha^2}{4} \epsilon_z + \frac{\alpha}{2} \gamma_{yz} \right)^2 + 2\epsilon_y^2 + \right. \\
& \left. \frac{3}{(4 + \alpha^2)} \left(\epsilon_y + \frac{\alpha^2}{4} \epsilon_z - \frac{\alpha}{2} \gamma_{yz} \right)^2 \right] + k_2 a^2 \beta^2 \epsilon_z^2 \quad (15)
\end{aligned}$$

2.2 Si 纳米板杨氏模量的计算

由于纳米板由 Si 晶胞和 SiO_2 晶胞组成,所以板的厚度 $h = 2(Na + n\alpha a + \alpha a/4)$,则计算单元的应变能密度 f 可由变形能与体积之比得到,即

$$f = U/(a^2 h) \quad (16)$$

因为 $\sigma = \partial f / \partial \epsilon$,且 $\sigma_x = E \epsilon_x$,则得到杨氏模量 E_x 的值为

$$E_x = \frac{1}{(2N + 2n\alpha + \alpha/2)a} \left(\frac{2Nk_1}{3} + \frac{4nk_2}{4 + \alpha^2} \right) \quad (17)$$

上式说明,杨氏模量 E_x 只随 Si 晶胞和 SiO_2 晶胞层数变化,即 Si 及氧化层的厚度变化.这表明,氧化层的厚度也将影响到 Si 纳米板的杨氏模量.

3 杨氏模量计算结果与讨论

根据(17)式,图 4 给出了杨氏模量 E_x 随 Si 纳米板厚度的变化曲线.由图可以看出,当纳米板厚度小于 100nm 时,表面带氧化层的和表面不带氧化层

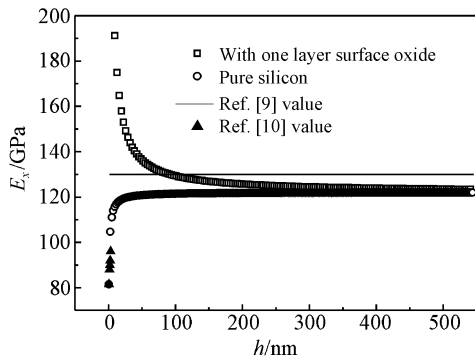


图 4 杨氏模量随 Si 纳米板厚度的变化

Fig. 4 Young's modulus of the silicon nano-plate as a function of thickness

的板的杨氏模量表现了不同的变化趋势. 表面带氧化层的板的杨氏模量随板厚度减小而增加, 而不带氧化层的板的杨氏模量随之减小. 这说明, 当板的厚度逐渐减小到几十纳米时, 本征氧化层对板的杨氏模量的影响起到了决定性的作用. 这种趋势与考虑表面收缩弛豫的变化趋势相同^[8].

当纳米板厚度逐渐增加到大于 300nm 时, 可以看到, 表面带氧化层和不带氧化层两种情况下板的杨氏模量趋于一定值 123GPa. 而这个值接近由 Wortman 等人^[9]给出的体 Si(100) 的杨氏模量值 130GPa.

同时, 我们还将表面不带氧化层的 Si 纳米板的计算结果与 Park 等人^[10]得到的结果进行了比较. 他们用分子动力学方法得到了 Si 梁的弹性模量, 由于 Park 受到计算能力的限制只给出了厚度小于 4nm 的值. 在图 4 中, 可以看出两者结果没有很大的差异, 说明了本文采用能量法的有效性.

由于加工工艺条件的不同, 也会导致本征氧化层的厚度不一致. 为此, 图 5 给出了表面氧化层厚度不同的纳米板杨氏模量随板厚度的变化. 当表面氧化

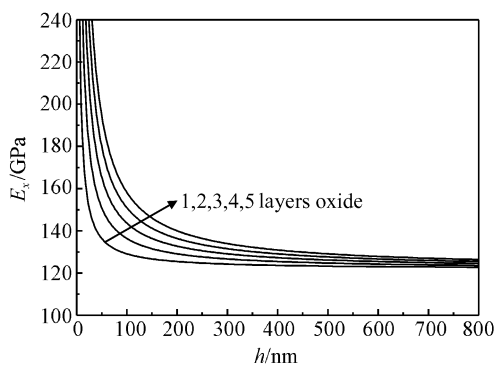


图 5 不同氧化层厚度下杨氏模量随板厚度的变化

Fig. 5 Young's modulus of the silicon nano-plate as a function of thickness for different surface native oxide-layers

层厚度增加时, 无论板厚多少, 板的杨氏模量都会增加. 只是在板的厚度大于 500nm 时, 表面氧化层对板的杨氏模量的影响并不大, 但当板的厚度小于 500nm 时, 表面氧化层厚度不同的板的杨氏模量之间的区别逐渐变得明显. 当板厚度为 50nm 时, 板的杨氏模量随氧化层厚度的增加从 120GPa 上升到接近 200GPa. 这表明表面有氧化层的板的厚度为几十纳米时, 氧化层厚度对板的杨氏模量的影响有决定性作用. 这定性解释了实验上 Si 纳米结构杨氏模量有的比体 Si 大而有的则比它小的原因.

4 结论

在 Si 纳米结构的制造过程中, 加工工艺将导致其表面本征氧化层的存在. 本文建立了表面有氧化层的 Si 纳米板力学模型, 用能量法得到了表面不带氧化层和表面氧化层厚度不同的 Si 纳米板杨氏模量并进行了分析和比较.

结果表明当纳米板厚度小于 100nm 时, 表面带氧化层和表面不带氧化层的板的杨氏模量呈现出不同的变化趋势. 表面带氧化层的杨氏模量随板的厚度减小而增加, 而不带氧化层的杨氏模量则随之减小. 该计算结果对理解 Si 纳米板弹性有一定参考价值.

参考文献

- [1] Sundararajan S, Bhushan B. Development of AFM-based techniques to measure mechanical properties of nanoscale structures. *Sensors and Actuators A*, 2002, 101: 338
- [2] Li Xinxin, Ono T, Wang Yuelin, et al. Ultrathin single-crystalline-silicon cantilever resonators; Fabrication technology and significant specimen size effect on Young's modulus. *Appl Phys Lett*, 2003, 83(15): 3081
- [3] Tang Shaoping, Wallace R M, Seabaugh A, et al. Evaluating the minimum thickness of gate oxide on silicon using first-principles method. *Appl Surf Sci*, 1998, 135: 137
- [4] Enta Y, Miyanishi Y, Irimachi H, et al. Real-time core-level spectroscopy of initial thermal oxide on Si (100). *J Vac Sci Technol A*, 1998, 16(3): 1716
- [5] Bao Fang, Yu Hong, Huang Qing'an. Elastic modulus of nanometer silicon membrane. *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Information Acquisition*, 2006: 85
- [6] Billeter S R, Curioni A, Fischer D, et al. Ab initio derived augmented Tersoff potential for silicon oxynitride compounds and their interfaces with silicon. *Phys Rev B*, 2006, 73: 155329
- [7] Sun C T, Zhang Haitao. Size-dependent elastic moduli of platelike nanomaterials. *J Appl Phys*, 2003, 93(2): 1212
- [8] Guo Jiangang, Zhao Yapu. The size-dependent elastic properties of nanofilms with surface effects. *J Appl Phys*, 2005, 98: 074306

- [9] Wortman J J, Evans R A. Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio in silicon and germanium. *J Appl Phys.* 1965,36(1):153
- [10] Park S H, Kim J S, Park J H, et al. Molecular dynamics study on size-dependent elastic properties of silicon nanocantilevers. *Thin Solid Films.* 2005,492:285

Effect of Native Oxide on Elasticity of a Silicon Nano-Plate^{*}

Wang Jing, Huang Qing'an[†], and Yu Hong

(Key Laboratory of MEMS of the Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: A three-dimensional model of a silicon nano-plate with native oxide is proposed. The energy approach is used to obtain the Young's moduli of the silicon nano-plate with and without the oxide layer. It is shown that the Young's modulus of the nano-plate with surface oxide increases with the decrease of the nano-plate thickness, while that without surface oxide exhibits the opposite behavior. The reason is that the native oxide layer dominates the plate as it scales down to several nanometers. As the plate increases to 300nm, the Young's moduli approach 123GPa. The Young's modulus increases as the oxide thickness increases. When the thickness is 50nm, the Young's moduli are in the range of 120 to 200GPa.

Key words: native oxide; nano-plate; Young' modulus

EEACC: 2520

Article ID: 0253-4177(2007)07-1048-05

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No.2006CB300404)

[†] Corresponding author. Email:hqa@seu.edu.cn

Received 4 January 2007, revised manuscript received 17 February 2007