

УДК 548:539.32, 534.222.2

Онанко¹ А.П., к. ф.-м. н., с.н.с.

Зміна дефектної наноструктури та релаксаційні процеси в $\text{SiO}_2 + \text{Si}$, GeSi

Вимірювались щільність дислокацій і глибина зруйнованого шару для $\text{SiO}_2 + \text{Si}$, Si підкладок. Розглядається кристал GeSi з орієнтацією $[111]$, до якого діє періодична механічна напруга, і який підпадає під комбінований вплив зовнішнього електричного поля і магнітного поля.

Ключові слова: механічна деформація, пружні коливання, внутрішнє тертя, модуль пружності.

¹e-mail: onanko@univ.kiev.ua

Статтю представив член-кор. НАН України, д.ф.-м.н., проф. Макара В.А.

Вступ

При механічному напруженні сумарна деформація складається з пружної та непружної компонент $\varepsilon_{\Sigma} = \varepsilon_E + \varepsilon_{IE}$. Пружна деформація ε_E відбувається "миттєво". Непружна деформація ε_{IE} зумовлена рухом дислокацій. Ультразвукова (УЗ) деформація ε_{UZ} впливає на пружні та непружні характеристики $\text{SiO}_2 + \text{Si}$, Si . Навіть малі напруження змінюють непружні та пружні характеристики кристалів [1-8]. В межах струнного дислокаційного механізму пружних коливань вплив зовнішніх полів (електричного та магнітного) на внутрішнє тертя (ВТ) в GeSi можна пояснити, моделюючи рух заряджених дислокацій у цих полях.

Експеримент

Для вимірювання модуля пружності E та ВТ використовувалися імпульсний метод на частоті $f \approx 1.67; 5$ МГц та методика чотирьохскладового п'єзоелектричного вібратора на частоті $f \approx 118$ кГц при знакозмінній механічній деформації $\varepsilon \approx 10^{-6}$ у вакуумі $P \approx 10^{-3}$ Па. Похибка вимірювань модуля пружності $\frac{\Delta E}{E_0} \approx 0,5\%$ [9-14].

Відпал структурних дефектів змінює форму температурного спектра ВТ внаслідок руху домішок, вакансій V .

Результати

Глибина порушеного шару $h = 1000 \div 3000$ нм представлена на рис. 1.

A. P. Onanko¹, PhD, Sen. Sci. Res.

Defect nanostructure changing and relaxation processes in $\text{SiO}_2 + \text{Si}$, GeSi

The dislocation density and the depth of broken layer are measured for $\text{SiO}_2 + \text{Si}$, Si wafer-plates. GeSi crystal with orientation $[111]$, which periodic mechanical tension is added to, and which is under the combined influence of external electric field and magnetic field is considered.

Key words: mechanical deformation, elastic vibrations, internal friction, elastic module.

¹e-mail: onanko@univ.kiev.ua

$\Delta Q^{-1} \cdot 10^{-5}$

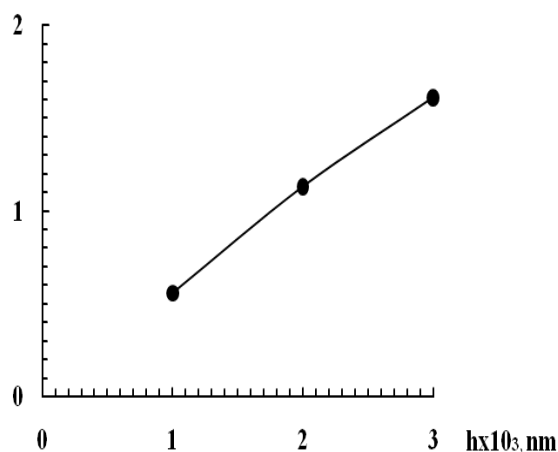


Рис. 1. Залежність різниці внутрішнього тертя ΔQ^{-1} підкладки $\text{SiO}_2 + \text{Si}$ від глибини порушеного шару h .

Зменшення величини ВТ в $\text{SiO}_2 + \text{Si}$, яке спостерігалось після тривалої УЗ деформації ε_{UZ} протягом $t \approx 4 \cdot 10^3$ с може бути також пов'язано з активацією домішок, котрі дифундують до дислокаційних сегментів, осаджуються і закріплюють їх, в результаті чого густина активних дислокаційних петель L_C зменшується, що викликає зменшення величини ВТ [4,5]. Осцилограма імпульсів поперечної поляризації в підкладці $\text{SiO}_2 + \text{Si}$ наведена на рис. 2.

A, s. u.

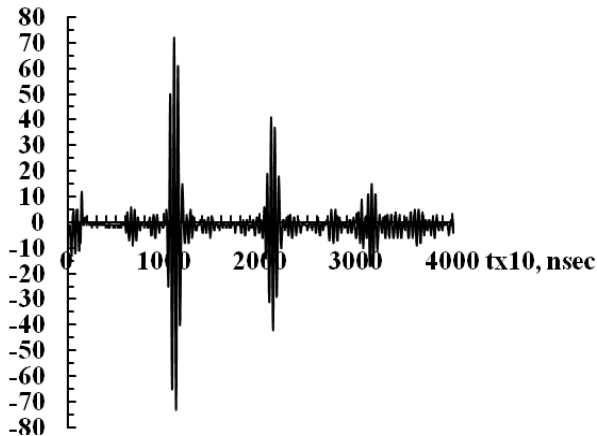


Рис. 2. Осцилограма імпульсів поперечної поляризації в підкладці SiO₂+Si.

Обговорення

Після опромінення виявлено зменшення величини швидкості УЗ повздовжніх пружних хвиль V_{\parallel} , величини швидкості УЗ поперечних пружних хвиль V_{\perp} , пружного модуля E та модуля зсуву G . Спостерігалась мала величина фону ВТ в SiO₂ $Q^{-1}_0 \approx 2 \cdot 10^{-6}$ до $T \approx 385$ К.

Урахування розсіяння енергії пружних механічних коливань підкладки Si+SiO₂ на дефектах структури призводить до виразу для частоти вільних коливань диску [1]:

$$\omega = \sqrt{\frac{D\beta^2}{\rho h R^4} - 2\pi^2 \left(\frac{Q^{-1}}{T}\right)^2}, \quad (1)$$

де Q^{-1} - ВТ, T - період коливань диску, циліндрична жорсткість диску підкладки D , яка зумовлена модулем пружності E , товщиною диска h і коефіцієнтом Пуассону μ [2,3]:

$$\mu = \frac{\left(\frac{1}{2}V_{\downarrow}^2 - V_{\leftrightarrow}^2\right)}{\left(V_{\downarrow}^2 - V_{\leftrightarrow}^2\right)}, \quad (2)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu)^2}, \quad (3)$$

де V_{\downarrow} - повздовжня швидкість пружної хвилі УЗ, V_{\leftrightarrow} - швидка поперечна швидкість УЗ, β -

безрозмірний коефіцієнт, величина якого залежить від кількості вузлових кіл, ρ - питома густина підкладки, R - радіус диску Si + SiO₂ підкладки, Q^{-1} - ВТ, T - період коливань диску. Ріст висот максимумів ВТ Q^{-1}_M відображає зростання концентрації структурних дефектів в підкладці Si + SiO₂.

Якщо дислокаційний сегмент $\xi(x,y)$, що коливається під дією напруги τ , є зарядженим, то на нього діятимуть додаткові сили $\vec{F}_E = e\rho(\xi)\vec{E}$

та $\vec{F}_M = e\rho(\xi)\left[\frac{\partial \xi}{\partial t}, \vec{B}\right]$, де $\rho(\xi)$ - це функція розподілу густини електричного заряду на дислокаційному сегменті. В рамках струнної моделі дислокації система рівнянь, що описує рух зарядженої дислокації під впливом механічного, електричного E та магнітного полів B , набуває наступного вигляду:

$$M \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = V_d \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} - Q \frac{\partial \xi}{\partial t} + b\tau - b\tau_a - N_j \frac{\partial U}{\partial \xi} + e\rho(\xi)E + e\rho(\xi)l \frac{\partial \xi}{\partial t} B, \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 \tau}{\partial y^2} - \frac{\rho}{G} \frac{\partial^2 \tau}{\partial t^2} = \rho b \frac{\partial^2}{\partial t^2} < \int \int \xi(x) dx N(l) dl >, \quad (5)$$

де $\left(M \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}\right)$ - інерційна сила, $M \approx \rho b^2$ -

ефективна маса одиниці довжини дислокації, ρ - густина кристалу, b - вектор Бюргерса, t - час,

$\left(V_d \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}\right)$ - сила, яка обумовлена ефективним

натягом зогнутої дислокаційної лінії, $V_d \approx G b^2$

для гвинтових дислокацій, $V_d \approx \frac{Gb^2}{(1-\mu)}$ для

крайових, G - модуль зсуву, $\left(Q \cdot \frac{\partial \xi}{\partial t}\right)$ - сила

в'язкого гальмування, Q - постійна демпфування, тобто коефіцієнт в'язкого гальмування, $b\tau$ - зовнішня сила, яка діє на

одиницю довжини дислокації, $b\tau_a$ - сила, яка діє на

одиницю довжини дислокації і обумовлена напругами σ , які виникають внаслідок

потенційного рельєфу кристалічної ґратки, $\left(N_j \cdot \frac{\partial U}{\partial \xi}\right)$ - сила, яка діє на одиницю довжини

дислокації з боку точкових дефектів, які взаємодіють з дислокацією і розташовані на

дислокаційної лінії з густиною $N_j(x)$, $U(\xi)$ -

потенційна енергія взаємодії, l - довжина дислокаційного сегменту, $N(l)$ - функція розподілу дислокаційних сегментів по довжинам, яка обумовлена $N_j(x)$.

Показано, що непружні Q^{-1} та пружні E характеристики суттєво залежать від морфології приповерхневого шару. За допомогою 3D атомно-силової мікроскопії (АСМ) отримано зображення мікроструктури $SiO_2 + Si$ орієнтації (100), що показано на рис. 3 та рис. 4.

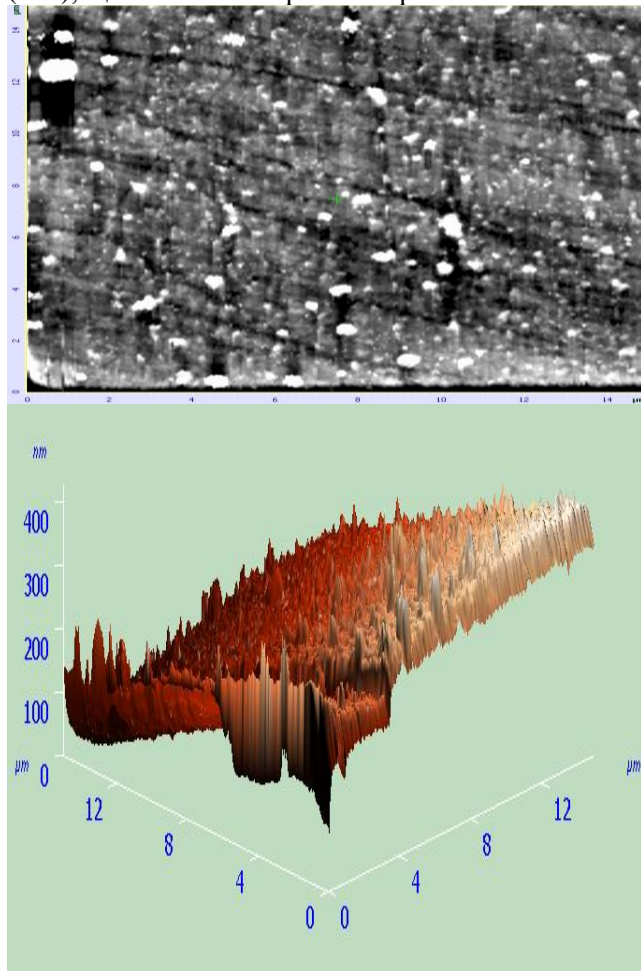


Рис.3. 3D атомно-силова мікроскопія зображення мікроструктури $Si + SiO_2$ марки КДБ-6,0 орієнтації (100) (15x15 мкм).

АСМ засвідчує присутність рельєфу підкладці. Окрім структурних дефектів, обумовлених впливом підкладки, є велика кількість дефектів, які утворюються при зростанні островків. При малої товщині плівки $h \leq 1000$ нм, структурні дефекти, які виникають на перших стадіях росту, не встигають заліковуватися.

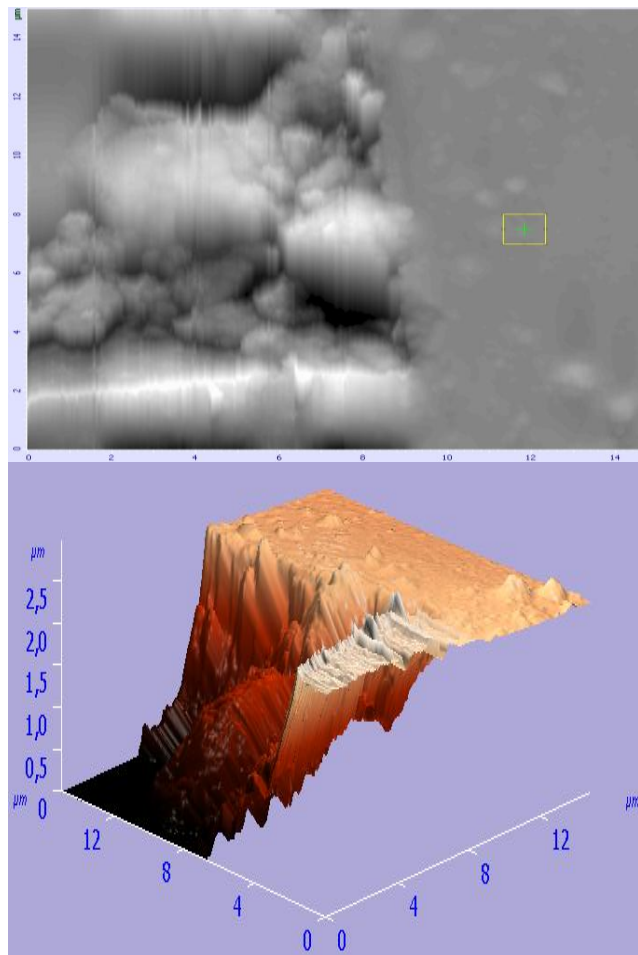


Рис. 4. 3D АСМ зображення мікроструктури Si марки КЕФ-7,5 орієнтації (100) після опромінення іонами $^{11}B_5^+$ дозою $D \approx 1 \cdot 10^{15}$ іон/см² з енергією $W \approx 130$ KeV при $T = 293$ K (15x15 мкм).

Методом АСМ виявлено збільшення шорсткості поверхні Si внаслідок його опромінення іонами $^{11}B_5^+$. Показано, що після опромінення електронами e^- спостерігається деструкція приповерхневого шару Si , зумовленого скупченням вакансійних комплексів V-V-V. Опромінення ж поверхні Si іонами $^{11}B_5^+$ дозою $D \approx 1 \cdot 10^{15}$ іон/см² з енергією $W \approx 130$ KeV, коли енерговиділення в одиниці об'єму значно більше при такій самій довжині пробігу частинок даних енергій в Si $L_{11B5^+} \square 360\ 000$ нм, призводить до утворення високої концентрації дефектів у приповерхневому шарі Si , ймовірно, між вузлового типу Si_i . 3D АСМ зображення мікроструктури $GeSi$ орієнтації (111) показано на рис. 5.

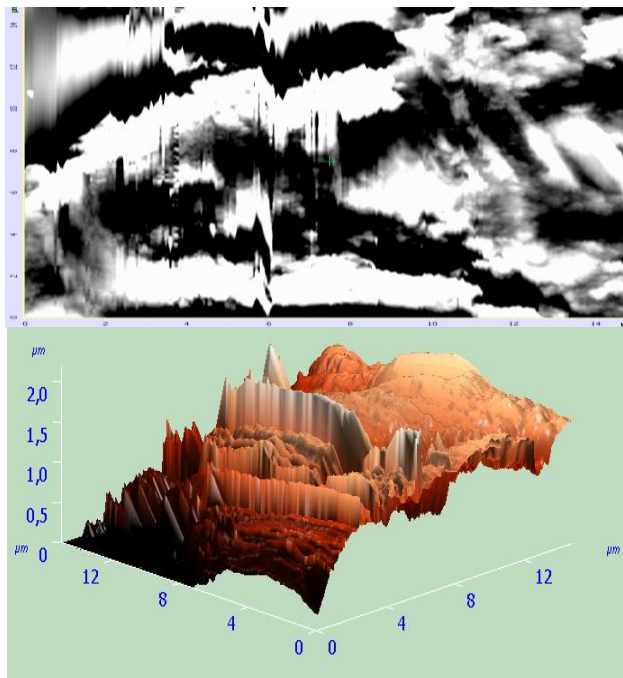


Рис. 5. 3D ACM зображення мікроструктури GeSi орієнтації (111) (15x15 мкм).

Спостерігається мілко дисперсна гладка поверхня, зрощення малих островків, їх форма стає круглястою. Монокристалічні ділянки мають сильно фрагментарну структуру, яка складається з слабо розорієнтованих один відносно іншого островків.

Висновки

Таким чином, наведені результати вивчення впливу структурних дефектів на поглинання пружних звукових хвиль в Si + SiO₂ підкладках, які дозволяють оцінювати характер наноструктури. Результати оцінки динамічних характеристик міжвузельних атомів Si_j, вакансійних V-V і O-V комплексів можуть бути застосовані з метою отримання оптимального технологічного відпаалу для структурних дефектів в Si + SiO₂.

Список використаних джерел

1. *Novik A., Berri B.* Relaxation phenomenon in crystals. – Moscow : Atomizdat, 1975. – 472 p. (in Russian).
2. *Aleksandrov L.N., Zotov M.I.* Internal friction and defects in semiconductors. – Novosibirsk : Nauka, 1979. – 158 p. (in Russian).
3. *Nikanorov S.P., Kardashev B.K.* Elasticity and dislocation inelasticity of crystals. –

Moscow : Nauka, 1985. – 253 p. (in Russian).

4. *Shpak A.P., Kunickiy Y.A., Karbovskiy V.L.* Clusters and nanostructure materials. – Kyiv : Academy periodic, 2001. – 588 p. (in Russian).
5. *Molodkin V.B., Nizkova A.I., Shpak A.P. et al.* Diffractometria nanosize defects and geterolayers in crystals. – Kyiv : Academy periodic, 2005. – 364 p. (in Russian).
6. *Selyshchev P.A.* Self-organization in radiation physics. – Moscow : SIC Institute computer research, 2008. – 208 p. (in Russian).
7. *Selyshchev P.A., Sugakov V.I.* About creeping temperature dependence of irradiated materials // *Metalphysics and new technology.* – 2000. – **22**, № 5. – P. 46-48.
8. *Selyshchev P.A., Moskalenko V.V.* Feature of non-stationary creeping of irradiated metals with impurity // *VANT Ser.: PRD and RM.* – 2005. – № 3(86). – P. 64-67.
9. *Onanko A.P., Lyashenko O.V., Lyashenko I.O. et al.* Acoustic attenuation in silicon and silicon oxide // *J. Acoust. Soc. Am.* – 2008. – **123**, № 5, Pt. 2. – P. 3701.
10. *Onanko A.P.* Influence of hydrogen on directional surface of inelastic-elastic body Ti_{0.5}Al_{0.5} alloy // *Metalphysics and new technology.* – 2011. – **33**, № 2. – P. 253-261.
11. *Lyashenko O.V., Onanko A.P., Veleschuk V.P. et al.* Structural defects relaxation during complex thermal and dynamical mechanic processing of CdTe // *Photoelectronics.* – 2008. – № 17. – P. 10-13.
12. *Lyashenko O.V., Veleschuk V.P., Onanko A.P. et al.* Acoustic emission at inhomogeneous thermal impulse influence with liquid phase formation // *Sensor electronics and microsystem technologies.* – 2009. – № 1. – P. 36-41.
13. *Onanko A.P., Lyashenko O.V.* Static elastic characteristics of carbon nanotubes // *ECS Transactions.* – 2010. – **25**, № 21. – P. 7-10.
14. *Onanko A.P., Lyashenko O.V., Vyzhva S.A. et al.* Influence of temperature, ultrasound, electrical current on inelastic-elastic characteristics, relaxation processes in Ge-Si and SiO₂ // *Sensor electronics and microsystem technologies.* – 2011. – **2(8)**, № 3. – P. 14-21.

Надійшла до редколегії 17.01.2013