

УДК 539.384+548.4

## В.О. Надточій, М.М. Голоденко, М.К. Нечволод, І.В. Жихарев, О.В. Періг Рух дислокацій у напівпровідниках, спричинений градієнтом напружень

Слов'янський державний педагогічний інститут,  
вул. Ген. Батюка, 19, м. Слов'янськ, Україна, 84116  
E-mail: slavgpi@slav.dn.ua

Досліджується рух дислокацій, обумовлений виникненням градієнта напружень при деформаціях згину кремнієвої кристалічної пластини зі скошеними краями. З умов рівноваги при чистому згині отримано розподіл напружень у пластині, а потім і вираз для розподілу концентрації вакансій. Методами оптичної мікроскопії спостерігалися треки дислокацій, що рухалися під дією осмотичних сил, спричинених потоками нерівноважних вакансій. Виміряна експериментально швидкість переповзання дислокацій узгоджується з теоретичними оцінками.

**Ключові слова:** напівпровідники, градієнт напружень, переповзання дислокацій

Стаття постуила до редакції 2002; прийнята до друку 2002

Дослідження низькотемпературної мікропластичності алмазоподібних напівпровідників (Ge, Si та ін.) надзвичайно ускладнюється притаманною їм високою крихкістю. Нижче 600-700 К рух дислокацій спостерігається лише в тонких приповерхневих шарах (~1...10 мкм). Було показано [1], що під дією градієнта напружень у приповерхневих шарах напівпровідників виникають потоки нерівноважних вакансій, що сприяє неконсервативному руху дислокацій. Серед факторів, що сприяють неоднорідності напружень, слід відзначити різні вклучення, що виникають під час вирощування кристалів, сходинки атомного розміру на поверхні, а також дислокації і тріщини, що виникають у процесі механічної обробки.

Важливо було провести дослідження процесів міграції точкових дефектів і руху дислокацій у випадку, коли градієнт напруження в кристалі можна змінювати за певним законом, вибираючи необхідний профіль досліджуваних об'єктів. У цій роботі досліджується рух дислокацій, обумовлений виникненням

градієнта напруження при навантаженні Si кристалічної пластини зі скошеними краями, показаної на рис. 1. Такої форми пластині надавали з метою отримання градієнта напруження вздовж осі  $x$ . У будь-якому поперечному перерізі пластини виникає лише згинаючий механічний момент.

Прикладена до краю пластини сила  $\vec{F}$  змінюється повільно порівняно з періодом властивих коливань пластини. Це дозволяє розглядати деформацію пластини як квазістатичну.

Згинаючий момент

$$M = \frac{EJ}{R}, \quad (1)$$

де  $E$  – модуль Юнга (коефіцієнт пружності) монокристала Si в напрямі [110],  $R$  – радіус кривини нейтрального шару, що лежить посередині товщини пластини. Момент інерції будь-якого поперечного перерізу з координатою  $x$  відносно його осі симетрії, паралельної осі  $z$ ,

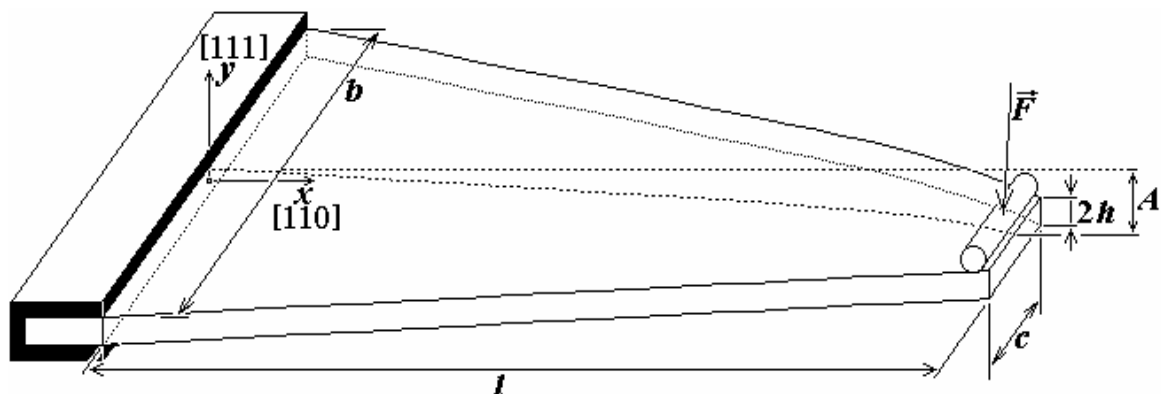


Рис. 1. Кристалічна пластинка, піддана чистому згину.

$$J = \frac{2}{3} h^3 \left( b - x \cdot \frac{b-c}{l} \right). \quad (2)$$

У випадку малих деформацій для згину у пластини маємо

$$y'' = \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{1}{R} = \frac{3Ml}{2Eh^3 [lb - x(b-c)]}. \quad (3)$$

У точці  $x=0$ , як це видно з рис. 1, похідна  $\frac{dy}{dx} = 0$ , а згин  $y = 0$ . Тому

$$y' = \frac{dy}{dx} = \frac{3Ml}{2Eh^3 (b-c)} \{ \ln(lb) - \ln[lb - x(b-c)] \}; \quad (4)$$

$$y = \frac{3Ml}{2Eh^3 (b-c)} \left\{ x \ln(lb) + \frac{lb - xb + xc}{b-c} [\ln(lb - xb + xc) - 1] + \frac{lb}{b-c} [1 - \ln(lb)] \right\} \quad (5)$$

Згин краю пластини з координатою  $x=l$

$$A = y_{\max} = \frac{3Ml^2}{2Eh^3 (b-c)} \left\{ \ln(lb) + \frac{1}{b-c} [c \ln(lc) - b \ln(lb)] + 1 \right\}. \quad (6)$$

Звідси згинаючий момент

$$M = \frac{2AEh^3 (b-c)}{3l^2 \cdot \left\{ \ln(lb) + \frac{1}{b-c} [c \ln(lc) - b \ln(lb)] + 1 \right\}}. \quad (7)$$

Нормальне напруження в поперечному перерізі пластини

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{E\eta}{R} = Ey''\eta = \frac{3lM}{2h^3 [lb - x(b-c)]} \eta = \\ &= \frac{AE(b-c)}{l[lb - x(b-c)] \cdot \left\{ \ln(lb) + \frac{1}{b-c} [c \ln(lc) - b \ln(lb)] + 1 \right\}} \cdot 3. \end{aligned} \quad (8)$$

На рис. 2 показана залежність механічного напруження (8), нормованого за згином  $A$  краю пластини та відстанню  $\eta$  від нейтрального шару для силіцієвої кристалічної пластини з розмірами (див. рис. 1):  $l = 7$  мм,  $b = 7$  мм,  $c = 2$  мм,  $h = 0,25$  мм.

При чистому згині у пластині виникають лише нормальні до поперечного перерізу напруження розтягу і стиску, причому у нейтральному шарі напруження відсутні. Зі збільшенням відстані  $\eta$  від нейтрального шару напруження (8) лінійно зростає. У шарах, більш віддалених від центра кривини, спостерігається напруження розтягу, а в шарах, ближчих до центра кривини, – напруження стиску, як це показано на рис. 3. Нейтральна вісь – це лінія перетину нейт-

рального шару з площиною поперечного перерізу.

Таким чином, при згині пластини зі скошеними краями виникатимуть потоки вакансій в напрямках зростання стискаючих напружень вздовж осі  $x$ , а також у напрямі дії сили  $F$ . Локальна концентрація вакансій [2-4] може бути визначена за формулою

$$C_{\sigma} = C_0 \exp \frac{\sigma V_a}{kT}, \quad (9)$$

де  $V_a$  – об'єм атома;  $\sigma$  – механічне напруження. Враховуючи залежність механічного напруження  $\sigma$  від координати  $x$ , отримаємо

$$C_{\sigma} = C_0 \exp \frac{V_a A G \eta}{kT(H-x)}. \quad (10)$$

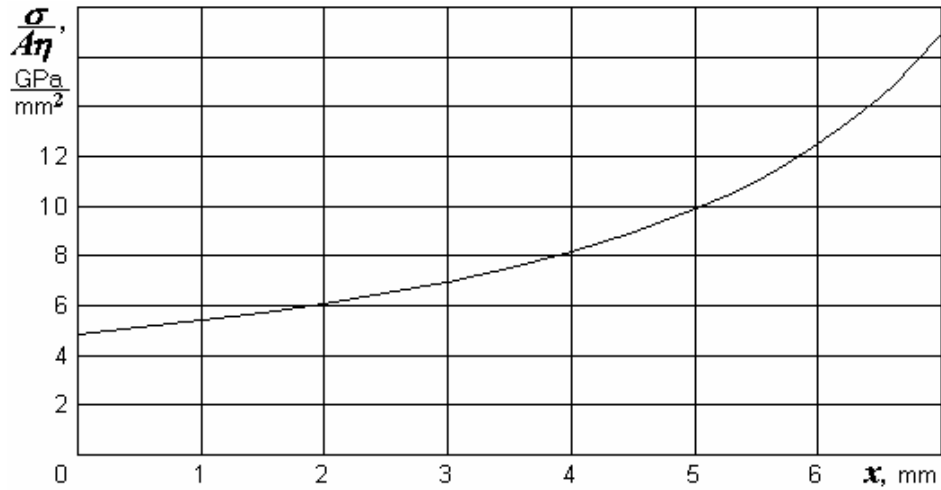


Рис. 2. Розподіл нормального напруження вздовж пластини.

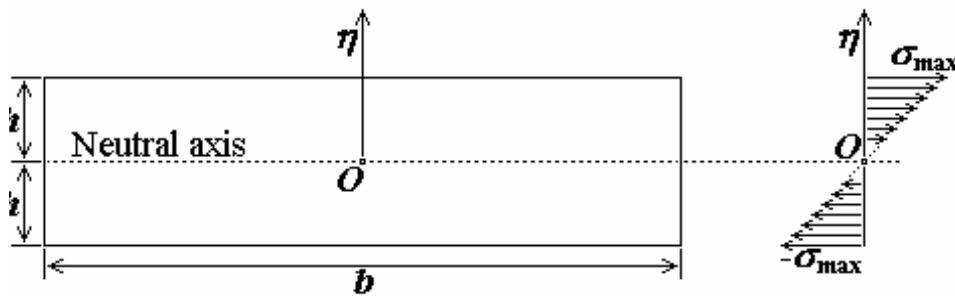


Рис. 3. Розподіл нормальних напружень у поперечному перерізі пластини.

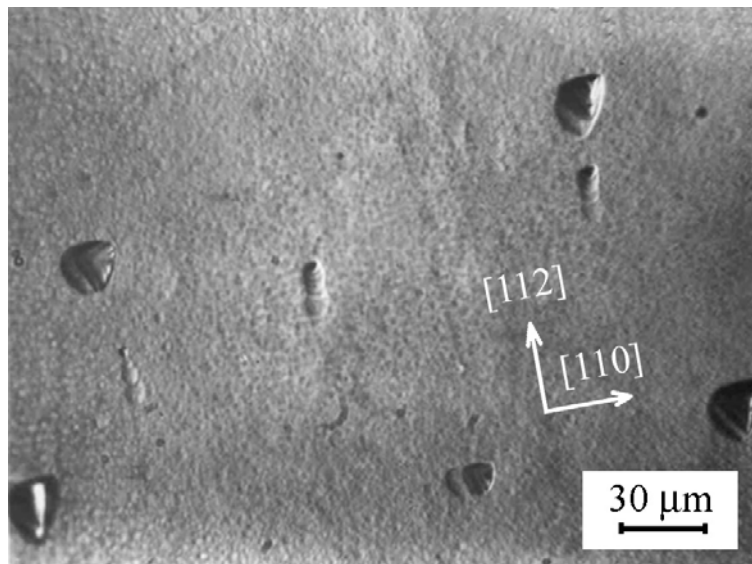


Рис. 4. Треки дислокацій, що рухаються в площині (111) у напрямі [112].

Рівноважна концентрація вакансій [3]

$$C_0 = \exp\left(-\frac{E_0}{kT}\right), \quad (11)$$

де  $E_0$  – енергія утворення вакансій.

Час життя вакансій [5]  $\tau \leq 3$  мкс. Це набагато менше від тривалості навантаження. Тому можна

розглядати дифузію вакансій у припущенні, що концентрація вакансій без запізнення відслідковує зміну напруження.

Згідно з першим законом Фіка густина потоку вакансій

$$J = -D \frac{\partial C_\sigma}{\partial x}. \quad (12)$$

Підставляючи сюди вираз для  $C_\sigma$ , отримаємо

$$J = -\frac{DC_0V_aAG\eta}{kT(H-x)^2} \exp\left(-\frac{V_aAG\eta}{kT(H-x)}\right). \quad (13)$$

Коефіцієнт дифузії вакансій [3]

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_m}{kT}\right), \quad (14)$$

де  $D_0$  – коефіцієнт дифузії при  $T \rightarrow \infty$ ,  $E_m$  – енергія міграції вакансій. Розрахувавши вакансійне пересичення, можна знайти швидкість переповзання дислокацій.

При температурах деформації, нижчих від 600 – 700 К, для алмазоподібних напівпровідників Ge і Si процес переповзання дислокацій, що реалізується у приповерхневих шарах кристала [1, 6], буде домінуючим. Розрахувавши вакансійне пересичення, можна знайти швидкість переповзання дислокацій в низькотемпературній області при заданому напруженні.

На рис. 4 показана мікрофотографія протравленої поверхні Si кристалічної пластини, попередньо підданої при температурі  $T = 300$  К ступінчастому навантаженню з величиною ступеня довантаження

$\Delta\sigma = 12$  МПа і тривалістю витримки на кожному з трьох ступенів 1 год. Дислокація рухається під дією градієнта напружень, а також осмотичної сили, що утворюється потоком нерівноважних вакансій. У той час, як при високих температурах дислокації рухаються ковзанням у напрямках  $\langle 110 \rangle$  в системі площин  $\{111\}$ , у низькотемпературній області виникає можливість руху переповзанням у напрямках  $\{112\}$ . За дислокацією тягнеться шлейф домішкової атмосфери, який ми і бачимо на протравленій поверхні. Виникнення нових дислокацій на фотографії не спостерігається.

**В.О. Надточій** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, докторант;

**М.М. Голоденко** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики;

**М.К. Нечволод** – доктор фізико-математичних наук, професор, ректор;

**І.Г. Жихарев** – кандидат фізико-математичних наук, зав. кафедри фізики;

**О.В. Періг** – студент.

- [1] В.П. Алехин. *Физика прочности и пластичности поверхностных материалов*. Наука, М., 280 с. (1983).
- [2] Ю.Н. Степанов, В.П. Алехин, К.П. Гуров. Диффузионная релаксация распределения вакансий при циклическом нагружении металлов. // *ФММ*, 4, сс. 42-46 (1991).
- [3] А.Н. Орлов. *Введение в теорию дефектов в кристаллах*. Высшая школа, М., 144 с. (1983).
- [4] А.М. Косевич. *Дислокации в теории упругости*. Наукова думка, К., 218 с. (1978).
- [5] В.В. Болотов, А.В. Васильев, Л.С. Смирнов. Об энергии миграции простейших дефектов в германии и кремнии. // *ФТП*, 8(3), сс. 518-521 (1974).
- [6] В.А. Надточій, Н.К. Нечволод, Н.Н. Голоденко, Д.Г. Сущенко. Электрические свойства кремниевых р-п-переходов с дислокациями, созданными низкотемпературной деформацией // *Proceedings of 4-th International Symposium on Diamond and Related Materials.*, Kharkov, pp. 327-330 (1999).

V. Nadtochy, M. Golodenko, M. Nechvolod, I. Zhikharev, O. Perig

## Movement of Dislocations in Semiconductors Caused by the Stress Gradient

*Slovjansk State Teacher-Training Institute,  
Slovjansk, 84116, Ukraine*

The movement of dislocations caused by stress gradient in the bent Si crystal plate with slanting ends was investigated. From the equilibrium conditions of the plate subjected to pure bending there was obtained stress distribution in the plate as well as vacancy concentration distribution. By means of optical microscopy there were observed the tracks of the dislocations moving under the action of the osmotic forces caused by the flows of the nonequilibrium vacancies. Experimentally measured dislocations' creeping velocity checks well with theoretical estimations.