

МАТЕРІАЛИ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

УДК 621.315.592

ГЕНЕРУВАННЯ ДИСЛОКАЦІЙ В НАПІВПРОВІДНИКОВИХ КРИСТАЛАХ МЕТОДОМ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ

Б. Павлик¹, Р. Дідик¹, Й. Шикоряк¹, Р. Лис¹, Д. Слободзян¹,
А. Грипа¹, М. Кушлик¹, І. Чегіль²

¹ Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. ген. Тарнавського, 107, 79017 Львів, Україна
pavlyk@electronics.wups.lviv.ua

² НВП “Карат”, вул. Стрийська, 202, 79031 Львів, Україна

Проаналізовано вплив дислокацій на фізичні властивості напівпровідникових кристалів. Запропоновано оригінальну установку пластичної деформації масивних (товщиною до 4 мм) монокристалічних зразків кремнію. Описано процес підготовки зразків до деформації. Розглянуто особливості розподілу дислокацій на площині (111) вздовж деформованих зразків залежно від деформації. Наведено картини селективного травлення поверхні (111) деформованих зразків *p*-Si.

Ключові слова: приповерхневий шар, дислокації, хімічне травлення поверхні, монокристалічний кремній.

Поняття про дислокації як специфічні дефекти атомно-кристалічної структури є одним з важливих у фізиці твердого тіла та матеріалознавстві. Ситуація в галузі фізики дислокацій доволі динамічна, про що свідчить численна бібліографія з цієї проблеми [1–5]. Теоретичні та експериментальні дослідження засвідчують вплив дислокацій на механічні, електричні та низку інших властивостей твердих тіл [5–7].

Характерною особливістю дислокацій є те, що вони створюють навколо себе в кристалічній ґратці поле напружень зі значною енергією пружної деформації. Таке поле здатне захоплювати домішки та інші дефекти ґратки, створюючи навколо дислокації так звану хмаринку Коттрела [8].

Поле напружень і скупчення дефектів навколо дислокації знижують енергію звільнення атомів поблизу дислокації в разі травлення кристалічної поверхні селективним травником. Зокрема, у випадку розчинення деформованого матеріалу поблизу дислокації вивільняється енергія, зв'язана з деформацією [4, 6]. Тому вихід на поверхню дислокації виявляється ямкою травлення [6].

Дислокації здатні переміщатись по кристалічній ґратці у полі механічних напружень [9]. Захоплюючи домішки на своєму шляху, дислокації здатні очистити частину кристала і можуть відігравати роль гетера в разі виготовлення напівпровідникових приладів [1–3].

Завдяки тому, що в оточенні дислокації концентрація дефектів зростає, біля дислокації треба очікувати прискорення процесів взаємодії дефектів між собою (ефект катализатора), що допомагає виявити закономірності, які в бездислокаційному кристалі не можуть чітко виявитись. Зі сказаного можна зробити висновок, що, залежно від концентрації дислокацій, домішки та інші дефекти ґратки можуть по-різному впливати на фізичні властивості напівпровідникового монокристала. Тому такі дослідження доцільно проводити на зразках з різною концентрацією дислокацій [7].

Відомі дослідження на тонких (близько 0,4 мм) монокристалічних пластинках кремнію, у яких генерували дислокації пластичною деформацією нагрітої пластинки, спертої на три точки опори у вигляді трикутника [5]. Такий метод деформації, на жаль, не придатний для зразків більшої товщини, застосовуваних в експериментах, де необхідна одновісна деформація, наприклад, у разі дослідження електромеханічних властивостей монокристалів кремнію.

На сконструйованій нами установці (рис. 1) виконували пластичну деформацію зразків кремнію прямокутної форми з розмірами близько 4×4×8 мм за температур до 1 100 К. До торців зразка прикладали силу до 60 кГ (виникав тиск порядку $6 \cdot 10^7$ Па). На відміну від відомих [10] редукторних деформаційних установок, ми використали коромисло з віссю обертання 9 і плечима різної довжини 10 та 11, яке забезпечує постійність сили тиску в процесі деформації. Це дало змогу регулювати деформацію зразка, змінюючи час деформації і контролюючи процес деформації за зміщенням кінця великого плеча коромисла (переміщенням стрілки 25 відносно шкали 26, у нашому випадку 1 мм зміщення стрілки відповідає 14 мкм деформації зразка).

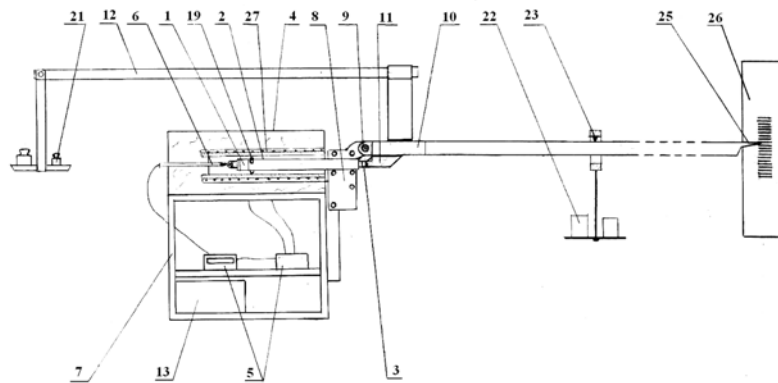


Рис. 1. Установка для деформації монокристалів прямокутної форми:

- 1 – капсула касети; 2 – корпус касети; 3 – стискальний шток; 4 – трубчаста електропіч;
- 5 – терморегулятор; 6 – термопара; 7 – корпус установки; 8 – штатив; 9 – вісь коромисла силової штанги; 10 – силовий вузол з великим плечем коромисла; 11 – планка короткого плеча коромисла;
- 12 – плече протизваги; 13 – протизвага корпусу установки; 21 – тягарці протизваги силового вузла;
- 22 – тягарці силового вузла; 23 – призма шальки силового вузла; 25 – стрілка силового вузла;
- 26 – шкала розміру деформації.

Зразок для досліджень вирізали дисковою алмазною пилкою, шліфували абразивним порошком, полірували травленням у лужному травнику [7]. Закінчували підготовку

тим, що для забезпечення плоскопаралельності торці пришліфовували у спеціальному шаблоні (товщиною 7,6 мм), у якому закріплювали зразок.

Зразок 18 (рис. 2) вставляли в касету між двома центрувальними призмочками 17. Гвинтом 15 та контргайкою 16 регулювали висоту частини зразка, що виступає над корпусом капсули 14. Рух стискального штока 3 обмежений торцем капсули 14. Капсула з'єднана з корпусом касети двома трьома циліндричними штирками 19. Зразок з усіх боків ізолювали від металевих деталей касети слюдяними прокладками, які унеможливають хімічну взаємодію зразка з металом за температури деформації. На рис. 2 показано лише слюдяні прокладки 20 біля торців зразка.

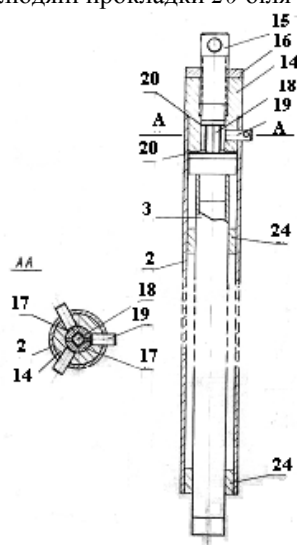


Рис. 2. Касета деформаційної установки: 2 – корпус касети; 3 – стискальний шток; 15 – гвинт; 16 – контргайка; 17 – фіксувальні призмочки; 18 – дослідний зразок; 19 – фіксувальні штирі; 20 – слюдяні прокладки; 24 – напрямні втулки.

Якщо сторінка буде непарна, то рисунок перемістити до правого боку!!

Касету вставляють у піч 4 і кріплять у штативі 8 (див. рис. 1) так, щоб стискальний шток 3 був проти наконечника короткого плеча коромисла 11. Силу тиску на шток підбирають тягарцями 22 на шальці 23 та відстанню від осі коромисла 9 до призми шальки 23. Для зрівноважування силового вузла 10 (з довгим плечем коромисла) слугує механізм зрівноважування 12 з тягарцями 21 на шальці. Необхідну температуру зразка 18 з точністю $\pm 0,5$ К підтримують електропіччю 4 з ніхромовим нагрівним елементом 27 за допомогою мікропроцесорного терморегулятора РЕ-205 з термопарою 6. Противага 13 запобігає перекиданню установки моментом сил, який виникає на довгому плечі силового вузла відносно корпусу установки 7.

Перед початком деформування піч зі зразком прогрівають упродовж години, після чого навантаження на зразок поступово збільшують до необхідного. У разі досягнення потрібної сили тиску відмічають на шкалі 26 положення стрілки 25 і починають відлік часу деформації. За переміщенням стрілки простежують хід деформації. Після припинення процесу деформації касету виймають з печі та від'єднують капсулу зі зразком.

Густину дислокацій на гранях (111) зразка визначають таким способом: розчиняють у плавиковій кислоті протягом 2–3 хв окисну плівку на поверхні зразка, протравляють зразок у селективному [7] травнику протягом 20 с. Місця виходу дислокацій проявляються маленькими чорними крапками, за якими можна оцінити їхню густину, підраховуючи їхню кількість на певній площі поверхні зразка.

Дослідження характеру розподілу ямок травлення на гранях (111) деформованих зразків засвідчило, що густина дислокацій уздовж зразка нерівномірна. Максимальною є густина біля торців, а мінімальною – по середині зразка. Це можна пояснити дещо вищою температурою торців зразка, які контактують (через слюдяні прокладки) з металевими деталями, тоді як нагрівання бічних граней відбувається через повітряний прошарок. Ліпше прогріті ділянки зразка повинні мати більшу пластичність.

На рис. 3 показана фотографія грані (111) зразка монокристалічного кремнію КДБ 1-20 розміром $3,0 \times 3,9 \times 7,6$ мм, підданого 0,07 % деформації за температури 970 К протягом 50 хв силою тиску $4,5 \times 10^7$ Па. Місця виходу дислокацій, проявлені ямками травлення, у відбитому світлі виглядають світлими. Як бачимо, більша концентрація дислокацій зосереджена біля торців зразка.

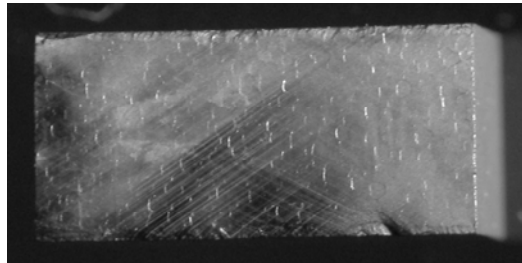


Рис. 3. Вигляд селективно протравленої поверхні (111) у відбитому світлі кремнієвого зразка, підданого пластичній деформації ($\times 10$).

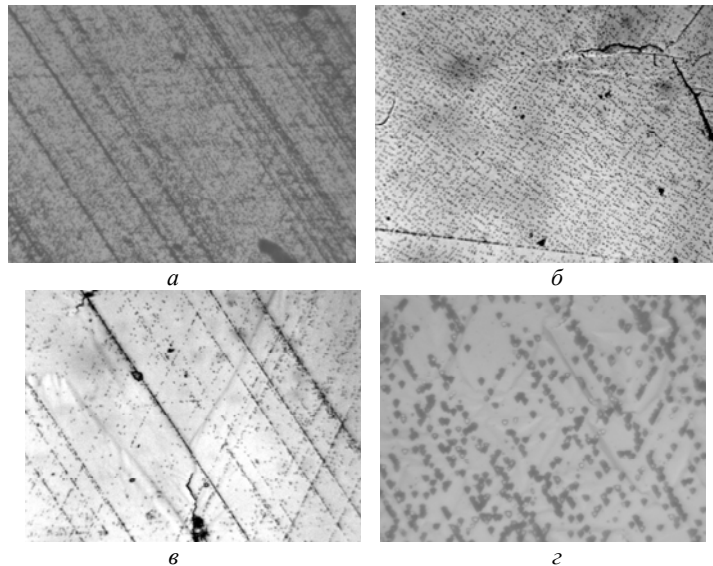


Рис. 4. Дислокаційні ямки травлення поверхні (111), $\times 238$:
a – близько до торця зразка; *б* – на відстані 1,5 мм від торця;
в – на відстані 2,5 мм від торця; *г* – посередині зразка.

На фотографіях рис. 4 зображено окремі ділянки тієї ж поверхні зразка у збільшеному вигляді. Фотографії (див. рис. 4, а-в) зроблені з поверхні, протравленої в селективному травнику протягом 20 с. Фотографія рис. 4, г зроблена з поверхні, протравленої протягом 160 с.

На фотографіях рис. 4 зображено окремі ділянки тієї ж поверхні зразка у збільшеному вигляді. Фотографії (див. рис. 4, а-в) зроблені з поверхні, протравленої в селективному травнику протягом 20 с. Фотографія рис. 4, г зроблена з поверхні, протравленої протягом 160 с.

Із наведених мікрофотографій бачимо, що максимальна густина дислокацій є поблизу торців зразка ($n \approx 3,2 \times 10^7 \text{ см}^{-2}$). Це можна пояснити дещо вищою температурою торців завдяки теплопередаванню з деформувальних деталей, що спричинило локальне підвищення пластичності кремнію. Ділянки зразка, віддалені на 1,5 мм від торців, мають густину дислокацій $n \approx 2,2 \times 10^7 \text{ см}^{-2}$, на відстані 2,5 мм – $n \approx 5,6 \times 10^6 \text{ см}^{-2}$, посередині зразка – $n \approx 1,7 \times 10^6 \text{ см}^{-2}$.

Отже, з'ясовано, що концентрація дислокацій впливає на електрофізичні властивості напівпровідникових матеріалів.

Запропоновано оригінальну установку для пластичної деформації масивних зразків напівпровідникових кристалів.

Доведено, що концентрація дислокацій уздовж зразка внаслідок пластичної деформації на запропонованій установці є неоднаковою, а це дає змогу отримувати зразки з розподіленою густиною дислокацій, унаслідок чого можна отримувати залежності електрофізичних характеристик напівпровідникових матеріалів від густини дислокацій у приповерхневому шарі.

1. Судзуки Т., Ёсінага Х., Такеу-ти С. Динамика дислокаций и пластичность / пер. с япон. А. В. Хачояна. – М.: Мир, 1989. – 294 с.
2. Готра З. Ю. Технология микрорелектронных устройств. Справочник. – М.: Радио и связь, 1991. – 258 с.
3. Курносав А. И. Материалы для полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. – М.: Высшая школа, 1980. – 327 с.
4. Амелинкс С. Методы прямого наблюдения дислокаций. – М.: Мир, 1968. – 438 с.
5. Скворцов А. А., Гонар Л. И., Орлов А. М. Электростимулированный транспорт дислокаций в постоянном магнитном поле // Физика тв. тела. – 2003. – Т. 45. – Вып. 9. – С. 1603–1607.
6. Сангвал К. Травление кристаллов: Теория, эксперимент, применение / пер. с англ. А. В. Быстрицкого. – М.: Мир, 1990. – 492 с.
7. Павлик Б., Дідик Р., Шикоряк Й. та ін. Мікроскопічні дослідження дефектної структури приповерхневого шару кристалів р-Si // Теор. електротехніка. – 2010. – Вип. 61. – С. 164–170.
8. Ууон G., Lacombe P. Report Conference Defects in Crystalline Solids. – London, 1954. – 187 p.
9. Косевич А. М. Физическая механика реальных кристаллов. – Киев: Наук. думка, 1981. – 275 с.

10. Матульський В. Б., Павлик Б.В., Струк Я. А. Высоковакуумная установка для исследования термической и радиационной стойкости твердых тел в условиях механической нагрузки // Приборы и техника эксперимента. – 1989. – № 4. – С. 245–247.

DISLOCATIONS GENERATION IN SEMICONDUCTOR CRYSTALS USING THE PLASTIC DEFORMATION METHOD

**B. Pavlyk¹, R. Didyk¹, J. Shykoryak¹, R. Lys¹, D. Slobodzyan¹, A. Hrypa¹,
M. Kushlyk¹, I. Tshehil²**

¹*Faculty of Electronics, Ivan Franko National University of Lviv
107 Tarnavsky St., UA–79017 Lviv, Ukraine
pavlyk@electronics.wups.lviv.ua*

²*SPE “Carat”, 202 Stryiska St., UA–79031 Lviv, Ukraine*

We analyze the influence of dislocations on the physical properties of semiconductor crystals. We suggest an original device for plastic deformation of massive (the thickness of 4 mm) single-crystalline silicon samples. The process of preparation of samples for deformation is described. The features of distribution of dislocations in the plane (111) in the deformed samples is investigated, depending on the magnitude of deformation. The patterns of selective etching of the surfaces (111) of deformed *p*-Si samples are shown.

Key words: near-surface layer, dislocations, surface chemical etching, single-crystalline silicon.

ГЕНЕРИРОВАНИЕ ДИСЛОКАЦИЙ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛАХ МЕТОДОМ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

**Б. Павлык¹, Р. Дидык¹, И. Шикоряк¹, Р. Лыс¹, Д. Слободзян¹, А. Грыпа¹,
М. Кушлык¹, И. Чегиль²**

¹*Львовский национальный университет имени Ивана Франко
ул. ген. Тарнавского, 107, 79017, Львов, Украина
pavlyk@electronics.wups.lviv.ua*

²*НПП “Карат”, ул. Стрыйская, 202, 79031, Львов, Украина*

Проанализировано влияние дислокаций на физические свойства полупроводниковых кристаллов. Предложена оригинальная установка для пластической деформации массивных (толщиной до 4 мм) монокристаллических образцов кремния. Описан процесс подготовки образцов к деформации. Рассмотрены особенности распределения дислокаций на плоскости (111) вдоль деформированных образцов в зависимости от величины деформации. Приведены картины селективного травления поверхности (111) деформированных образцов *p*-Si.

Ключевые слова: приповерхностный слой, дислокации, химическое травление поверхности, монокристаллический кремний.

Стаття надійшла до редколегії 15.03.2012

Прийнята до друку 17.04.2012