

О.А. Кулініч

## Дислокаційні сітки як основа меза-структури в деформаційних методах отримання квантових точок

*Одеський державний економічний університет, Україна,  
м. Одеса, 65082, вул. Преображенська,8, e-mail: koeltech @ i.ua*

В даній роботі на основі використання сучасних методів досліджень в комбінації з методами хімічного селективного травлення вивчалася структура приповерхневого шару кремнію після окислення і іонного легування яка складалася з області полікристалічного кремнію і області, що містить дислокаційні сітки. Проведений порівняльний аналіз властивостей дислокаційних сіток, що виникають при окисленні і легуванні. Показано, що дислокаційні сітки можуть служити основою для створення меза (проміжної) структури в різних деформаційних методах отримання квантових точок

**Ключові слова:** кремній, окислення, іонне легування, дефекти, дислокаційні сітки.

*Стаття постуила до редакції 30.08.2011; прийнята до друку 15.03.2012.*

### Вступ

Форма, фотоелектричні та механічні властивості квантових точок залежать не тільки від властивостей вихідного матеріалу, а також від методу їх формування [1]. Відомо, що всі основні сучасні методи отримання квантових точок: літографічний, епітаксiальний, колоїдний оснований на отриманні меза-структури, при хімічній обробки якої можливо сформувати частки нанорозмірів як на поверхні пластин, так і у просторі [2]. Всі ці методи об'єднує те, що основними механізмами отримання меза-структур є деформаційні механізми, при яких на межі поділу контактуючих матеріалів релаксують механічні напруження, що веде до виникнення пластичної деформації. Хоча всі основні види пластичної деформації вже відомі, залишаються питання пов'язані з конкретними видами пластичної деформації, які діють при різних методах формування квантових точок. Так при формуванні структури діоксид кремнію-кремній на межі поділу утворюється перехідний шар, який складається з області полікристалічного кремнію та області, яка вміщує дислокаційні сітки [3]. Області полікристалічного кремнію та дислокаційних сіток також формуються при легуванні напівпровідників, якщо концентрація легуючої домішки перевищує допустиму густину, при якій починається процес пластичної деформації [4].

Метою даної роботи є порівняльний аналіз процесу виникнення та структури дислокаційних сіток, які формуються при окисленні та легуванні кремнію та дослідження можливості використання

цих сіток у якості меза - структур в деформаційних методах отримання квантових точок.

### I. Досліджувані матеріали, методи дослідження й обладнання

Вивчався процес дефектоутворення, що відбувається при окисленні пластин монокристалічного високоомного кремнію ( $\rho = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ). Температура окислення становила  $1150^\circ\text{C}$ , товщина оксиду кремнію становила порядку  $1 \text{ мкм}$ . Контроль товщини оксиду проводився за часом окиснення та еліпсометрическим методом. Іонне легування проводили на пластинах монокристалічного високоомного кремнію ( $\rho = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ). Величина потоку іонів бору становила порядку  $10^{16} \text{ м}^{-2}$ . Температура розгонки становила  $600^\circ\text{C}$ . Контроль профілю розподілу легуючої домішки здійснювали за допомогою методу виміру зворотної вольт - фарадной характеристики. Для виявлення структури поверхні кремнію після окиснення й іонного легування, проводилася пошарова обробка поверхні пластин хімічними селективними травниками (СТ) Сиртля (поверхня 111) и Секко (поверхня 100) (швидкість травлення -  $(2 - 3) \text{ мкм/хв}$ ) [5] с попередньою обробкою в суміші Каро та перекисноаміачному розчині [6]. Така попередня обробка дозволяла підвищити виявляючу здатність виборчих травників.

Для вивчення структури приповерхневої області кремнію використовувалися наступні методи й обладнання:

- електронна скануюча мікроскопія (РЕМП), електронний скануючий мікроскоп - аналізатор `Cam Scan`-4 D с системою енергетичного дисперсійного аналізатора `Link- 860` (з використанням програми «Zaf», чутливість приладу складала 0,01 % за масою, діаметр пучка – від  $5 \cdot 10^{-9}$  до  $1 \cdot 10^{-6}$  м).

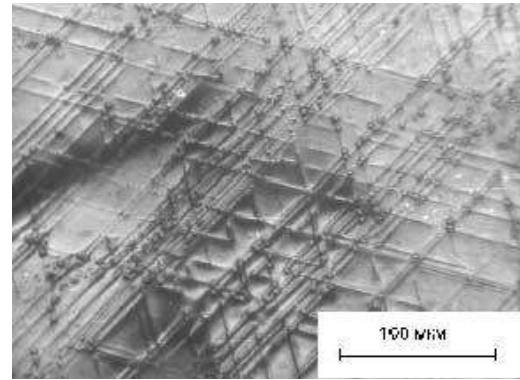
- оптичні методи досліджень за допомогою металографічного мікроскопа ММР - 2Р;

- рентгенівський метод двохкристальної спектроскопії, ДРОН -2. Використовувався кремнієвий монохроматор,  $\text{CuK}\alpha$   $\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$ . Напруга була 16 кВ, струм 2 мА;

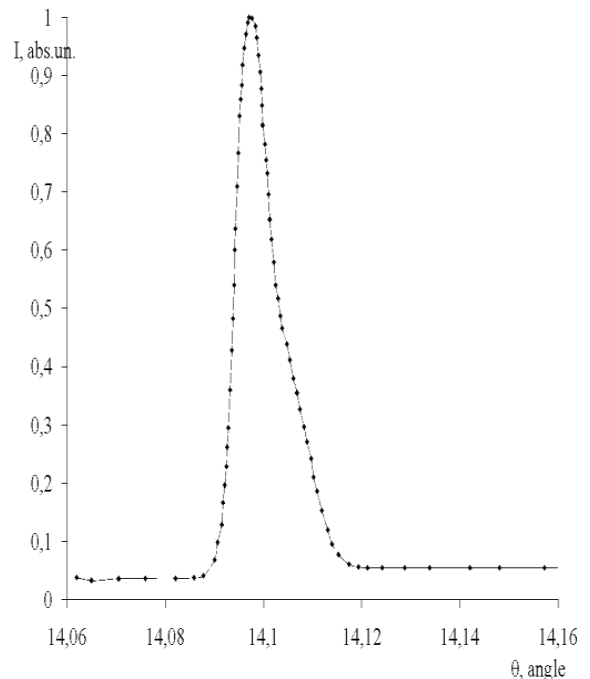
- метод виміру зворотної вольт - фарадній характеристики за допомогою спеціально розробленого характерографа з комп'ютерною обробкою інформації.

## II. Основна частина

Процес окислення поверхні кремнію супроводжується високотемпературною дифузією кисню з наступним утворенням оксида кремнію, а процес дефектоутворення відбувається у два етапи, що збігається із процесом дефектоутворення при іонному легуванні, при якому дефектоутворення відбувається в процесі загону і розгону легуючої домішки. Перший етап процесу дефектоутворення при окисненні пластин відбувається до моменту утворення оксиду кремнію, другий етап - після утворення оксиду кремнію. Встановлено, що перехідний шар кремнію під оксидом має шарову структуру та складається із полікристалічного недоокисненого кремнію та кремнію, що містить дислокаційні сітки (рис. 1). При утворенні полікристалічного кремнію на межі поділу діють механізми транскристалітної, інтеркристалітної та ротоційної пластичної деформації, причому співвідношення між цими механізмами залежить від рівня значень локалізованих пластичних деформацій, який, в свою чергу залежить від параметрів кремнію, оксида кремнію, товщини діоксиду та наявності дефектів у вихідному кремнію. Між разупорядкованим полікристалічним кремнієм і кремнієм, який містить дислокаційні сітки, існує стрибок густини рівнів захоплення носіїв зарядів, який можна пояснити різницею рівнів механічних напруг і деформацій, який відбувається внаслідок процесу прискореної дифузії кисню уздовж структурних вихідних дефектів [7] (рис. 2). Деформація правої частини кривої «гойдання» пов'язана з наявністю стрибка рівня деформації на межі разупорядкованого полікристалічного кремнію та області, яка вміщує дислокаційні сітки. Густина дислокацій у дислокаційних сітках визначається рівнем пластичної деформації, яка залежить від параметрів високотемпературної дифузії кисню, параметрів оксиду кремнію, кремнію та товщини оксиду. Густині дислокацій у сітках досягла значень  $10^{10} \text{ м}^{-2}$ , що на кілька порядків більше, чим густина дислокацій у сітках при іонному легуванні. Густина дислокацій і відповідно період дислокаційної сітки



**Рис. 1.** Електронне зображення дислокаційних сіток в кремнію після високотемпературного окислення ( $t = 1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (глибина розташування сіток 8 мкм від межі поділу оксид кремнію-кремній).



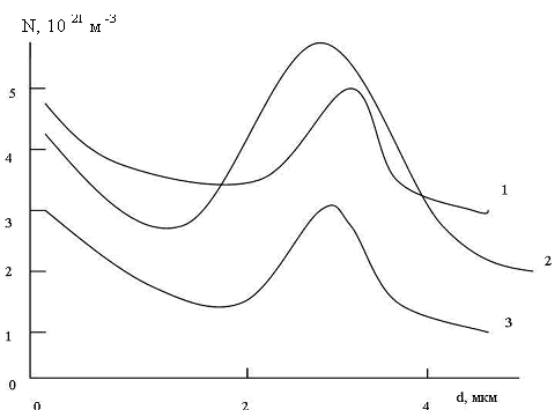
**Рис. 2.** Крива «гойдання», отримана від поверхні окисненого кремнію КЭФ-4.5 (100), виміряна за допомогою двохкристального дифрактометра ДРОН -2 (товщина оксиду кремнію 1,5 мікрон).

змінювалися (період збільшився) зворотно пропорційно відстані від межі поділу кремній – оксид кремнію. Дані залежності періоду дислокаційних сіток від глибини їх залягання дозволяє розрахувати деякі параметри окислення, такі як, критичну концентрацію атомів кисню, яка викликає, відповідно до закону Вегарда  $\epsilon = \omega C$  (з обмеженнями на  $sp^3$ -гібридизацію), де  $\epsilon$  – відносна деформація,  $\omega$  - коефіцієнт Вегарда,  $C$  – концентрація домішки [8], пластичну деформацію, коефіцієнт дифузії кисню при переміщенні вздовж структурних дефектів і коефіцієнт Вегарда для атомів кисню у кремнію. Розкид значень періоду у одній дислокаційній сітці можна пояснити тим, що у різних частинах сітки локалізовані різні значення

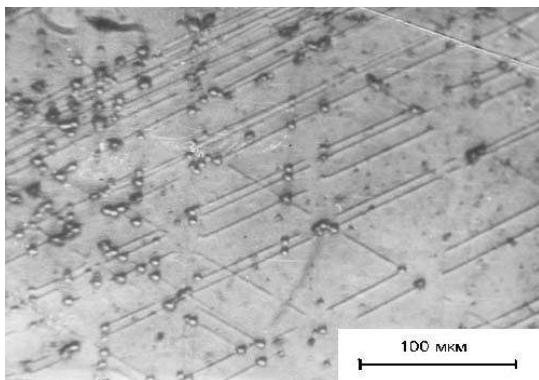
деформацій, які пов'язані з наявністю вихідних дефектів ( $d = \kappa |b| / \epsilon$ , де  $|b|$  - значення проекції вектору Бюргера 600 дислокації на площину контрасту,  $d$ - період дислокаційної сітки,  $\kappa = 0,5$ ).

На рисунку 3 показано розподіл легуючої домішки (бору) по глибині пластини після іонного легування, отримане за допомогою методу виміру зворотних вольт - фарадних характеристик. Встановлено, що розподіл концентрації легуючої домішки по глибині пластини має плавний характер із двома максимумами: Виникнення першого максимуму концентрації на поверхні пов'язане з тим, що після температурної розгонки на поверхні залишаються іони легуючої домішки з концентраціями, які перевищують середню концентрацію. Виникнення другого максимуму можна пояснити в рамках теорії каналірування, у відповідності з якою іони домішки, внаслідок взаємодії з фононами кристалічної ґратки, втрачають енергію, що призводить до скупчення іонів на деякій відстані від поверхні кремнію.

Проведений пошаровий аналіз за допомогою методу селективного травлення пластин кремнію після процесів іонного легування показав, що основним видом дефектів безпосередньо на поверхні



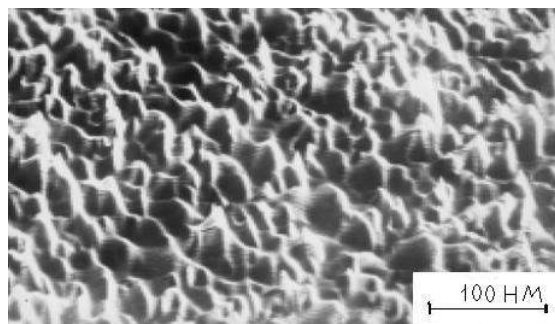
**Рис. 3.** Розподіл концентрації легуючої домішки (бору) по глибині пластини кремнію КЕФ - 4,5 (111).



**Рис. 4.** Електронне зображення дислокаційних сіток в кремнію після іонного легування бором (глибина розташування сіток 5 мкм від поверхні кремнію).

пластин є сильно розупорядкований полікристалічний кремній та дислокаційні сітки, що залягають на деякій відстані від поверхні кремнію і складаються, в основному, з 600 дислокацій (рис. 4). З'ясовано, що дислокаційні сітки розташовуються в областях максимуму концентрації легуючої домішки, тобто, в місцях максимальних значень пластичної деформації. Накопичуючись у цих областях, атоми домішки займають положення у вузлах і міжвузлях, що відповідно до закону Вегарда викликає появу деформацій, які можуть перевищувати межу пластичної течії кремнію [8]. Густина дислокацій у зразках легуваних бором кремнію, становила до  $10^8 \text{ м}^{-2}$ , що на декілька порядків менше, ніж у випадку процесу окислення. У деяких випадках, коли рівень деформацій значно перевищував поріг пластичного течії кремнію, спостерігалася поява полікристалічної структури та дислокаційних сіток в кремнію безпосередньо в місцях максимуму концентрації легуючої домішки на значних відстанях від поверхні кремнієвої пластини.

Таким чином, при виникненні значних величин деформацій, які перевищують межу пластичної течії, в процесах окислення та легування з'являються умови для появи періодичної дефектної структури. Ця структура, в основному складається з сіток 600 дислокацій, при обробці якої хімічними селективними травниками можливо отримати нанорозмірні квантові точки (рис. 5). Форма та розмір цих квантових точок залежить від таких параметрів як орієнтація пластин вихідного кремнію, величини локалізованих деформацій на межі поділу



**Рис. 5.** Електронне зображення поверхні кремнію КДБ - 10(100) з квантовими точками після травлення меза - структури хімічним СТ за час 10 хвилин.

оксид кремнію-кремній та часу обробки селективними хімічними травниками. Оскільки ці квантові точки мають нанорозміри та електрично пов'язані з підкладкою викликає інтерес у вивченні їх фотолюмінесцентних властивостей. Носії зарядів у квантових точках знаходяться у квантових ямах з дискретним енергетичним спектром, а ширина забороненої зони залежить від розмірів квантових точок [9]. Для малих квантових точок, розмір яких наближається до одиниць нанометрів, енергетичний спектр стає майже дискретним («газоподібним»),

ширина забороненої зони стає максимальною, а максимум спектра фотолюмінісценції у відповідності з квантоворозмірним механізмом зсувається в напрямку найменших довжин хвиль.

## Висновки

Таким чином, згідно основі проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

- параметри дислокаційних сіток, що виникають на межі поділу оксид кремнію-кремній функціонально залежать від рівня деформації, яка в свою чергу залежить від параметрів оксида кремнію, кремнію та наявності вихідних дефектів у кремнію;
- параметри дислокаційних сіток, що виникають в процесі легування, залежать також від рівня деформацій, який перевищує межу пластичної

течі кремнію. Ці деформації виникають внаслідок недоліків процесу легування або можуть бути створені штучно, якщо концентрація легуючої домішки перевищує межу, з якої починається процес пластичної течії кремнію;

- дислокаційні сітки, які виникли в процесах окислення та легування, створюють меза (проміжну) структуру, яка є основою для отримання острівців бездефектного кремнію - квантових точок, форма та параметри яких залежать від орієнтації пластин вихідного кремнію, величини деформацій на межі поділу та часу обробки селективними хімічними травниками.

**Кулініч О.А.** – доктор фізико-математичних наук, професор.

- [1] А.А. Шкляев, М Ичикава. Предельно плотные массивы наноструктур германия и кремния. // *Успехи физических наук*, **178**(2), сс.139-169 (2008).
- [2] А.Н. Алешин. Квантовые точки // *ФТТ*, **49**(11), сс. 19-21 (2007).
- [3] О.А. Кулініч. Дослідження приповерхневих шарів кремнію при його окисленні. // *Фізика і хімія твердого тіла*, **6**(1), сс.65 – 68 (2005).
- [4] В.А. Смытына., О.А. Кулинич, М.А. Глауберман, Э.Т. Роговская., Г.Г.Чемересюк, И.Р. Яцунский, О.В. Свиридова.. Влияние дефектов на распределение концентрации легирующей примеси по пластине монокристаллического кремния // *Сенсор*, **3**, сс.19-23 (2006).
- [5] К. Рейви. *Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии*. М. Мир, с. 471 (1984).
- [6] О.А. Кулинич, А.А. Лисовская, Н.Н. Садова. О повышении выявляющей способности избирательного травления монокристаллов кремния // *УФЖ*, **35**(11), сс.1691-1695 (1990).
- [7] О.А. Кулинич, М.А. Глауберман., Н.Н. Садова. Исследование приповерхностных слоёв кремния в структурах SiO<sub>2</sub>-Si // *Известия вузов. Физика*, **10**, сс.63-66 ( 2003).
- [8] В.А. Сминтина, О.А Кулініч, М.А. Глауберман, Е.Т. Роговська, Г.Г. Чемересюк, І.Р. Яцунський, О.В. Свіридова. Вплив дефектів на розподіл концентрації легуючої домішки та дефектоутворення при легуванні кремнію // *Фізика і хімія твердого тіла*, **8**(4), сс. 698-701 (2007).
- [9] В.Г. Заводинский. Квантово-механическое исследование упругих свойств наночастиц и процессов их агломерации // *Российские нанотехнологии*, **2**(11-12), сс. 58-62 (2008).

О.А. Kulinich

## Dislocation Nets as Basis of Bellow-Structure is in the Deformation Methods of Receipt of Quantum Points

Ukraine, Odesa, 65082, Odesa state economic university, street of Preobrazhenskaiy, 8, e - mail: koeltech @ i.ua)

In this work on the basis of the use of modern methods of researches in combination with the methods of chemical selective etch, the structure of resurface layer of silicon was studied after oxidization and ionic alloying, which was from an area polycrystalline silicon and area containing dislocation nets. The comparative analysis of properties of dislocation nets arising up at oxidization and alloying is conducted. It is shown that dislocation nets can serve as basis for creation of bellow (intermediate) of structure in the different deformation methods of receipt of quantum points.

**Key words:** silicon, oxidization, ionic alloying, defects, dislocation nets.