КИЇВСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМ. ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

На правах рукопису
УДК 548.4: 539.216

РОБУР ОЛЕНА ГАРІЇВНА

ВПЛИВ ПОСТІЙНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ ТА ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ НА ДИНАМІЧНУ ПОВЕДІНКУ ДИСЛОКАЦІЙ В КРИСТАЛАХ КРЕМНІЮ

Спеціальність 01.04.07 - фізика твердого тіла

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата фізико-математичних наук

К И Ї В - 1994

ЛННБ України ім.В.Стефаника
00778687 (0)

Дисертаці

Роботу виконано на кафедрі фізики металів фізичного факультету Київського університету ім. Тараса Шевченка

Наукові керівники: член-кореспондент АН України, доктор фізико-математичних наук, професор **Макара В.А.**, кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник **Стебленко Л.П.**

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук **Романюк Б.М.**, кандидат фізико-математичних наук **Хіменко М.В.**

Провідна організація: Інститут проблем матеріалознавства АН України

Захист дисертації відбудеться 27 червня 1994 року о 14³⁰ год на засіданні Спеціалізованої ради Д 068.18.15 при Київському університеті ім. Тараса Шевченка за адресою: 252127, Київ-127, пр.Глушкова, 6а (фізичний факультет).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Київського університету ім. Тараса Шевченка.

Автореферат розіслано "____" _____ 1994 р.

Вчений секретар
Спеціалізованої ради **Охріменко Б.А.**

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

АВ-30.411

Актуальність теми досліджень. За останні десять років з'явилась велика кількість робіт, присвячених фізиці електронних процесів у напівпровідниках та технології виготовлення напівпровідникових структур. В основному, ці роботи стосуються кремнію як найбільш технологічного і дешевого напівпровідникового матеріалу для виготовлення планарних шаруватих структур, що складають базу сучасної інтегральної електроніки.

Електронні процеси у напівпровідникових структурах надзвичайно сильно залежать від наявності дефектів структури та домішок на поверхні та в об'ємі матеріалу, а також на границі між напівпровідником та металом або діелектриком. Ці дефекти впливають на рекомбінацію, захоплення та розсіяння носіїв заряду в кристалах. Основу традиційного напряму фізичного матеріалознавства довгий час складали дослідження впливу домішок та дефектів кристалічної структури на електронні властивості напівпровідників, але останнім часом все більший інтерес викликає обернена задача: вивчення впливу електронної підсистеми на еволюцію дефектної структури кристалів. Цей інтерес посилюється у зв'язку з проблемами деградації характеристик напівпровідникових електронних та оптоелектронних приладів.

Виявлення залежності швидкості руху дислокацій від їх зарядового стану створює принципову можливість впливу електронної підсистеми напівпровідникових кристалів на їх пластичні властивості, що має значну не тільки теоретичну, але й практичну цінність.

Слід відмітити, що в останні роки проводились дослідження електропластичного ефекту, але вони були, в основному, здійснені на складних напівпровідникових кристалах типу $A^{II}B^{VI}$, $A^{III}B^{V}$ та на металах. Актуальною проблемою також є вивчення впливу збудження електронної підсистеми кристала на пластичність елементарних напівпровідників типу Si та Ge, які широко використовуються в сучасній мікроелектроніці. У зв'язку з цим основна увага приділялась дослідженням електропластичних властивостей кристалів кремнію.

Мета досліджень полягала в експериментальному вивченні закономірностей зміни динамічної поведінки індивідуальних дислокацій в кристалах кремнію при протіканні постійного

електричного струму та при прикладанні електростатичного поля у порівнянні з вихідними зразками.

Для досягнення поставленої у роботі мети передбачалось вирішення наступних задач:

1. Дослідити вплив постійного електричного струму та електростатичного поля на зміну часів затримки та стартових напружень для початку руху дислокацій в кристалах кремнію в широкому інтервалі температур та механічних напружень.

2. Дослідити зміну характеристик динамічної поведінки дислокацій під впливом постійного електричного струму або електростатичного поля при різних значеннях густин струму, напруженності поля та параметрів деформування кристалів.

3. Вивчити вплив електричного струму та електростатичного поля на температуру початку руху дислокацій у кристалах кремнію.

4. Дослідити вплив високотемпературної термообробки кристалів кремнію на динамічну поведінку дислокацій у збуджених постійним електричним струмом або електростатичним полем зразках.

5. Виявити вплив електричного струму або електростатичного поля на характеристики розподілу домішок у приповерхневих шарах кристалів кремнію.

Наукова новизна роботи:

У роботі вперше вивчався вплив постійного електричного струму та електростатичного поля на динаміку руху індивідуальних дислокаційних сегментів у кристалах кремнію.

Проведені дослідження дозволили виявити ряд нових ефектів, що з`являються у кристалах кремнію в процесі деформування при одночасному збудженні електронної підсистеми. До таких ефектів, в першу чергу, слід віднести істотне зменшення в температурному інтервалі деформації $T < T_{кр}$ часів затримки під впливом постійного електричного струму або електростатичного поля, а також зменшення стартових напружень для руху дислокацій під впливом електричного струму (величина $T_{кр}$ залежить від густини струму і для $j = 1 \times 10^6$ А/ м^2 $T_{кр} =$ 973 К). Це свідчить про те, що під дією постійного електричного струму та електростатичного поля зростає ймовірність подолання дислокаціями домішкових центрів, які закріплюють їх у

стартових положеннях. Електричний струм та електростатичне поле відіграють важливу роль не лише на етапі відкріплення дислокацій від домішкових центрів, але і при подальшому русі дислокацій. У роботі вперше виявлено ефект значного зростання швидкостей руху дислокацій при протіканні електричного струму при температурах $T < T_{кр}$ та ефект зниження мінімальної температури початку руху дислокацій, а також ефект зменшення швидкості руху дислокацій у порівнянні з вихідними зразками при температурах $T > T_{кр}$. Вперше показано, що прикладання електростатичного поля одночасно з механічним навантаженням призводить до збільшення у 2-4 рази швидкостей руху дислокацій у порівнянні з вихідними зразками. Таким чином, одержано, що протікання постійного електричного струму та прикладання електростатичного поля дає можливість змінювати пластичні характеристики кристалів кремнію.

В роботі вперше спостерігався ефект "пам`яті" дислокаціями впливу електростатичного поля, який полягає в тому, що при наступному механічному навантаженні дислокації рухаються із такими швидкостями, які вони мали б при одночасній дії електростатичного поля та механічного напруження, і пов`язаний зі стійкою зміною зарядового стану дефектів під впливом електростатичного поля.

Практична цінність роботи. Практична цінність роботи полягає в можливості використання експериментальних даних про вплив постійного електричного струму та електростатичного поля на динамічну поведінку дислокацій при розробці технологічних режимів виготовлення кремнієвих структур, що забезпечить зростання проценту виходу структур за рахунок зменшення їх схильності до крихкого руйнування. Експериментальні результати, отримані в роботі, можуть бути використані для розробки технологічних методів оптимізації робочих характеристик, пов`язаних з послабленням ефектів деградації оптоелектронних приладів. Результати та висновки роботи можуть бути використані також для побудови теорії пластичності твердих тіл, зокрема теорії рухливості дислокацій у кристалах з високими бар"єрами Пайєрлса, при збудженні електронної підсистеми кристалу.

Розроблені експериментальні методики доцільно використати як практичну можливість гетерування домішок із об"єму напівпровідника в його приповерхневі шари.

Положення, що виносяться на захист:

1. Часи затримки початку руху дислокацій при деформуванні кристалів кремнію в інтервалі температур 623-973 К зменшуються під впливом як постійного електричного струму, так і електростатичного поля. Мінімальна температура, при якій спостерігається макроскопічний рух дислокацій при деформуванні кристалів кремнію, зменшується лише під дією постійного електричного струму.

2. Швидкості руху дислокацій у деформованих кристалах кремнію під впливом як постійного електричного струму, так і електростатичного поля, збільшуються в інтервалі температур 623-973 К.

3. Характер впливу електростатичного поля та постійного електричного струму на динамічну поведінку дислокацій залежить від попередньої термообробки зразків. В термооброблених кристалах кремнію (Т=1423К, t = 3 год) Під дією як постійного електричного струму, так і електростатичного поля, зникає здатність дислокацій до руху при деформуванні зразків в усьому досліджуваному інтервалі температур та механічних напружень.

4. В кристалах кремнію дислокації, виведені у стартові положення, "запам`ятовують" факт прикладання електростатичного поля до зразка, тобто при наступному механічному навантаженні дислокації рухаються із такими швидкостями, як і при одночасній дії електростатичного поля та механічного напруження. Вказана "дислокаційна пам`ять" зберігається протягом тривалого часу при кімнатній температурі у відсутності поля.

Апробація роботи та публікації. Основні результати та висновки дисертації доповідались та обговорювались на таких республіканських та міжнародних конференціях:

П Всесоюзній конференції по високотемпературній надпровідності (Київ, 1989); У1 Республіканській конференції "Фізичні проблеми МДП-інтегральної електроніки" (Севастополь, 1990); Науково-практичному семінарі "Оптика і спектроскопія та

їх застосування в народному господарстві та екології" (Кам`янець-Подільський, 1992); Першій міжнародній літній школі "Оптика конденсованого стану" (Київ, 1993); 5-th International autumn meeting " Gettering and defect enginering in semiconductor technology - GADEST' 93" (Frankfurt (Oder), Germany, 1993); Всеукраїнській конференції "Сучасні фізико-математичні дослідження молодих науковців вузів України" (Київ, 1994).

За матеріалами дисертації опубліковано 8 робіт.

Структура та об"єм. Дисертація складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку літератури, додатку. Дисертаційна робота має сторінок, малюнків, 3 таблиці, список літератури включає назв.

ЗМІСТ РОБОТИ.

У вступі обгрунтовується актуальність досліджуваної проблеми, визначено мету роботи, основні задачі дослідження, наукову новизну та практичну цінність результатів та висновків, приведено положення, що виносяться на захист, описано структуру та об`єм роботи.

У першому розділі проведено аналіз існуючих літературних даних про зв`язок рухливості дислокацій з ефектами збудження кристалів, електроніку дефектів у напівпровідниках, рекомбінаційно-стимульовані реакції на дефектах.

Відомо, що характер пластичної деформації кристалів обумовлюється, в основному, поведінкою дислокацій. Аналіз літературних даних показує, що поряд з домішками та деякими дефектами кристалічної гратки, роль електрично активних центрів можуть відігравати дислокації, рухливість яких впливає на електричні властивості кристалів. Проте до цих пір, питання про природу та вплив електронних станів дислокацій на пластичні характеристики кристалів остаточно не вирішено. Це пов'язано з двома основними причинами. По-перше, будь-який процес пластичної деформації кристала породжує не тільки дислокації,

але й велику кількість різноманітних дефектів. Тому при реєстрації змін електричних характеристик у процесі деформації кристалу дуже важко виділити вклад, обумовлений саме дислокаціями, а не точковими дефектами чи їх скупченнями. Друга причина полягає в різноманітності та мінливості електронних станів самих дислокацій.

Основну увагу в даному розділі приділено викладенню експериментальних та теоретичних результатів про взаємозв'язок пластичних характеристик напівпровідників з різними способами електронного збудження.

У другому розділі описано використані в роботі експериментальні методики, а також наведено дані про об`єкти досліджень. Дослідження проводились на бездислокаційних кристалах кремнію n- та p-типу провідності, легованих під час вирощування методом Чохральського фосфором та бором, відповідно. Для визначення ролі атмосфери дислокацій при впливі постійного електричного струму та електростатичного поля на характеристики руху дислокацій використовувались також зразки кремнію з виведеними у стартові положення дислокаціями, які пройшли спеціальну високотемпературну обробку на повітрі при температурі 1423K на протязі 3 год (термооброблені зразки).

Джерелом дислокаційних напівпетель були концентратори напруження, що створювались шляхом нанесення подряпини при кімнатній температурі у напрямку <110> на поверхні (111) кристалу за допомогою алмазного індентора на установці ПМТ-3. Статичне навантаження зразків здійснювалось методом чотирьохопорного вигину. Виходи кінців дислокаційних напівпетель на поверхню виявлялись за допомогою традиційної методики повторного селективного хімічного травлення у травнику Сіртла.

При дослідженнях впливу електричного струму та електростатичного поля на поведінку дислокацій в кристалах кремнію необхідно було до зразка одночасно прикладати механічне навантаження та електростатичне поле або пропускати через зразок електричний струм. Для цього був виготовлений спеціальний керамічний патрон, в якому в ролі нижніх опор для прикладання механічного напруження виступали титанові або вольфрамові циліндричні електроди, на які подавалась напруга від

лінійного стабілізованного джерела напруги або струму. У випадку дослідження електростатичного поля на рухливість дислокацій між контактами, на які подавалась електрична напруга (U= 2 - 50В), і зразком розміщували діелектричну прокладку із слюди, товщиною 10 мкм. Це повздовжня геометрія прикладання електростатичного поля. При поперечній геометрії прикладання поля електрична напруга подавалась з однієї сторони зразка на з`єднані між собою контакти-опори, а з другої сторони зразка - на металеву фольгу, яка накладалась зверху на слюдяну пластину.

Так як при протікання струму через кремній температура зразка відрізняється від температури печі (тобто існують температурні градієнти), особлива увага приділялась вимірюванню температури з врахуванням перегрівів, а також визначенню розподілу температури по поверхні та в об'ємі зразка. З цією метою було проведено ряд тестових експериментів та теоретичних розрахунків.

Дослідження розподілу домішок металів, бору та вуглецю по поверхні та глибині зразка проводились методом вторинної іонної мас-спектрометрії (ВІМС). Концентрації термодонорів пов`язаних з киснем та SiO_x-преципітатів визначались методом інфрачервоної спектроскопії (ІЧ-спектроскопії) поглинання.

У третьому розділі описано закономірності впливу постійного електричного струму густиною $j = 10^2 - 10^6$ А/ м^2 при прикладанні зовнішніх механічних напружень σ= 10-110 МПа на динамічну поведінку індивідуальних дислокацій в кристалах кремнію при різних температурах досліджень. В роботі експериментально встановлено факт існування переміщень дислокацій в області температур 623-773 К, де у вихідних кристалах дислокації залишаються нерухомими при звичайних механічних навантаженнях та реально можливих часах спостереження. Тобто ми одержали, що протікання постійного електричного струму через зразок під час механічного навантаження призводить до зниження мінімальної температури початку руху дислокацій в кристалах кремнію.

Під впливом електричного струму стартові напруження та часи затримки руху дислокацій зменшуються при температурах $T < T_{кр}$, а при температурах $T > T_{кр}$ - збільшуються у порівнянні з вихідними зразками. У вихідних кристалах кремнію

температурна залежність часу затримки $t_з$ носить термоактиваційних характер:

$$t_з = t_{зо} (\sigma / \sigma_{ст})^{-m} \exp \{ U(\sigma) / kT \} \quad (1),$$

де $U(\sigma)$ - енергія активації процесу відкріплення дислокацій, $t_{зо}$, $\sigma_{ст}$, m - деякі параметри. Нами встановлено, що при протіканні через зразки електричного струму $j < 5x\ 10^5$ А/ м^2 термоактиваційний характер температурної залежності часу затримки зберігається, величина $t_з$ лінійно залежить від густини струму, і формулу (1) можна записати у вигляді:

$$t_з = t_{зс} (\sigma / \sigma_{ст})^{-m} \exp \{ U(\sigma) / kT \} (1-j/j_o) \quad (2),$$

де j_o - параметр. При цьому показник степеня m зменшується від 2,0 - 2,5 у вихідних зразках до 1,3 у зразках, через які протікає електричний струм.

Із температурних залежностей часів затримки було обчислено енергію активації відкріплення дислокацій від атмосфери точкових дефектів $U(\sigma)$ для вихідних, термооброблених та зразків, через які протікав електричний струм. Оскільки енергія активації U лінійно залежить від механічного напруження для всіх типів зразків

$$U = U_o - \gamma \sigma \quad (3),$$

було найдено також активаційний об`єм γ процесу відкріплення дислокацій від атмосфери точкових дефектів та енергію взаємодії U_o дислокацій з центрами закріплення.

З експериментальних залежностей середніх величин пробігів дислокацій від часу визначалась середня швидкість дислокацій V у вихідних зразках та зразках, через які протікав електричний струм. У вихідних кристалах характер руху дислокацій термоактиваційний, а середня швидкість дислокацій описується формулою:

$$V = V_o (\sigma / \sigma_o)^m e^{-E/kT} \quad (4),$$

де V_o , σ_o , m - деякі параметри, E - енергія активації руху дислокацій. При протіканні електричного струму через зразок термоактиваційний характер руху дислокацій зберігається, а швидкість дислокацій залежить також і від густини струму. Для одержаної експериментально залежності швидкості дислокацій V від густини струму j в області температур $623\ K < T < T_{кр}$ нами запропоновано наступну формулу:

$$V = V_o (\sigma / \sigma_o)^m [1 + p(j / j_o)^n] e^{-E^*/kT} \quad (5)$$

де E^* - енергія активації руху дислокацій при протіканні електричного струму через зразок, p - ймовірність рекомбінації носіїв в області дислокації, n - показник степеня, що залежить від температури та змінюється в межах n= 1,6-2,6; j_o - деяке порогове значення густини струму, нижче якого швидкість дислокацій не залежить від густини струму. В наших експериментах $j_o = 10^4$ А/ м^2. Якщо врахувати, що показники степеня m та n залежать від температури обернено пропорційно, то ця формула легко приводиться до наступного вигляду:

$$V = V_o \exp [- (E_o - H_o \ln \sigma/\sigma_o)/ kT] + $$
$$+ pV_o \exp[- (E_o - H_o \ln \sigma/\sigma_o - H_o^* \ln j/j_o)/ kT] \quad (6)$$

де H_o та H_o^* -деякі параметри, які можна визначити за експериментальними залежностями показників степеня m та n від температури у вихідних зразках та зразках, через які протікає електричний струм, відповідно. Якщо позначити $E = E_o - H_o \ln(\sigma/\sigma_o)$, $pV_o = V_{oi}$ та $\Delta E = H_o^* \ln(j/ j_o)$, то наведена формула буде мати такий самий вигляд як відома формула Маєди для швидкості дислокацій $V_{зб}$ під впливом електронного збудження:

$$V_{зб} = V_1 \exp[-E/ kT] + V_2 \exp[-(E - \Delta E)/ kT] \quad (7),$$

де V_1, V_2- передекспоненційні множники, E - енергія термоактиваційного руху дислокацій у вихідних зразках при даному механічному навантаженні, ΔE - зменшення енергії активації руху дислокацій спричинене збудженням електронної підсистеми.

Розрахована нами по температурній залежності швидкості руху дислокацій у кристалах кремнію, через які протікає електричний струм, величина енергії активації E^* виявилась значно меншою в залежності від густини струму та механічного напруження, ніж енергія активації E у вихідних зразках (при температурах 773 K < T < $T_{кр}$ величина E^* зменшується у 1,5-3,0 рази). Визначено також величину зміни енергії активації ΔE, що виділяється при рекомбінації носіїв заряду та полегшує утворення та рух подвійних перегинів на дислокації, а також прискорює рекомбінаційно-стимульовану дифузію домішок. Величина додаткової енергії рекомбінації може бути досить великою, про що свідчить одержане в наших експериментах значне зменшення залежності від температури швидкості руху дислокацій.

При досить великих густинах струмів $j \sim j_{кр}$ чисельник експоненти у другому члені формули (5) може стати близьким до нуля, що призводить до того, що швидкість руху дислокацій при протіканні електричного струму практично співпадає зі швидкістю для вихідних кристалів. В цій області густин струму швидкість дислокацій в межах розкиду не залежить від температури. Нами було визначено значення $j_{кр}$ для різних температурних інтервалів.

Одержані ефекти збільшення швидкості руху дислокацій у кристалах кремнію при протіканні постійного електричного струму при температурах $623\ K < T < T_{кр}$ можна пояснити тим, що під впливом електричного струму заряджена атмосфера навколо дислокації частково або повністю нейтралізується, що, згідно літературних даних, знижує потенціальний бар'єр навколо дислокації та полегшує відкріплення дислокацій від центрів закріплення та наступний рух у потенціальному рельєфі Пайєрлса. Це може бути пов'язано зі зменшенням під дією струму кулонівської складової взаємодії дислокацій з центрами закріплення.

Вплив електричного струму при температурах вище критичного значення $T > T_{кр}$ призводить до зменшення швидкості руху дислокацій у порівнянні з вихідними кристалами кремнію. Це пояснюється зміною електричної активності дислокацій та зникненням термодонорів пов'язаних з киснем при таких температурах. Останнє підтверджується нашими дослідженнями за допомогою методу ІЧ-спектроскопії поглинання.

Методом ІЧ-спектроскопії було одержано, що в області температур $623\ K < T < 773\ K$ концентрація термодонорів у 4-5 разів менша, ніж в області температур $773\ K < T < T_{кр}$, а при $T > T_{кр}$ термодонори пов'язані з киснем зникають. Під впливом електричного струму зростає концентрація термодонорів в області температур $623\ K < T < 773\ K$, що, на нашу думку, підвищує ймовірність протікання рекомбінації носіїв заряду на подвійних перегинах, які утворюються на дислокаціях.

Вплив постійного електричного струму на поведінку дислокацій у термооброблених зразках призводить до того, що дислокації втрачають здатність до руху. Згідно літературних даних

відпалювання кремнію при високих температурах ~1400 К призводить до формування укрупнених кисневих центрів як в атмосфері дислокації, так і в об'ємі матеріалу, та втрати електричної активності дислокацій. Електронейтральністю атмосфери дислокацій і можна пояснити одержане збільшення швидкості дислокацій при наступному механічному навантаженні у термооброблених вихідних зразках. При протіканні електричного струму змінюється зарядовий стан атмосфери навколо дислокації, електронейтральна атмосфера заряджається. При цьому укрупнені заряджені кисневі центри настільки сильно закріплюють дислокації, що дислокації не спроможні залишити стартові позиції. Таким чином, наші дослідження показали, що за допомогою термообробки можна змінювати структуру центрів закріплення та характер їх взаємодії з дислокаціями як у відсутності, так і при протіканні електричного струму через кремнієві зразки.

За допомогою методу вторинної іонної мас-спектрометрії (ВІМС) було одержано, що під впливом електричного струму хаотичний характер розподілу домішок цілого ряду металів по поверхні кремнію змінюється на регулярний вздовж площин ковзання дислокацій у напрямку руху кінця дислокаційного сегмента, що перетинає поверхню, а концентрація домішок у приповерхневій області зростає.

У четвертому розділі описано вплив електростатичного поля на динамічну поведінку дислокацій в кристалах кремнію. Одержано, що прикладання електростатичного поля без механічного навантаження не зміщує дислокації із стартових положень. При одночасній дії електростатичного поля та механічного напруження збільшуються у 2-4 рази пробіги і, відповідно, швидкості дислокацій та зменшуються часи затримки початку руху дислокацій. Стартові напруження при цьому майже не змінюються. Швидкість руху дислокацій у випадку прикладання електростатичного поля до зразка залежить від механічного навантаження та величини напруженності електростатичного поля, але не залежить від геометрії прикладання поля та від того, на якій віддалі від електрода знаходиться дислокаційний сегмент. Розрахована енергія активації руху дислокацій в кристалах кремнію, до яких

прикладалось електростатичне поле одночасно з механічним навантаженням, виявилась на 13 % менше, ніж енергія активації у вихідних зразках. Одержані ефекти, на нашу думку, пов`язані зі зміною зарядового стану домішкової атмосфери навколо дислокацій під впливом електростатичного поля.

Вплив електростатичного поля аналогічно впливу постійного електричного струму на термооброблені зразки кремнію призводить до закріплення дислокацій у стартових положеннях. Це, як і у випадку дії електричного струму, можна пояснити тим, що електронейтральна атмосфера, яка сформувалась при високотемпературній термообробці, при прикладанні поля заряджається, що і призводить до втрати дислокаціями здатності до руху. Таким чином, вплив електростатичного поля на д`намічну поведінку дислокацій може бути різним і залежить від домішкової атмосфери, яка оточує дислокації.

Одержано ефект "дислокаційної пам`яті" впливу електростатичного поля, який полягає в тому, що коли до зразка кремнію з виведеними у стартові положення дислокаціями прикласти електростатичне поле, то дислокації запам`ятовують цей факт, і при наступному прикладанні самого лише механічного навантаження рухаються із такими швидкостями, які вони мали б при одночасній дії аналогічного електростатичного поля та механічного напруження. Ефект "дислокаційної пам`яті" проявлявся як відразу після дії поля, так і зберігався при кімнатних температурах на протязі досить довгих проміжків часу після видалення зразка із поля. Стерти "дислокаційну пам`ять" можна шляхом проведення відпалу на протязі 1 год при температурах T > 400 K та при опроміненні зразків імпульсною ксеноновою лампою ІФП-2000. Існування вказанного ефекту дає можливість припустити, що прикладене поле впливає на електростатичну взаємодію в атмосфері дислокації в приповерхневій області, що призводить до зміни її зарядового стану. Незалежність ефекту пам`яті від часу прикладання поля говорить про те, що ця зміна протікає в момент прикладання поля і веде до утворення стійкого перерозподілу зарядів в атмосфері дислокації, який потім не зазнає істотних змін.

Дослідження за допомогою методу ВІМС показали, що прикладання електростатичного поля до кристалів кремнію,

аналогічно впливу електричного струму, змінює характер розподілу домішок металів по поверхні та по глибині зразків, концентрація домішок металів у приповерхневому шарі зростає. Це може приводити до зміни електричної активності дислокацій та площин ковзання.

ВИСНОВКИ.

1. Досліджено вплив електростатичного поля та постійного електричного струму на кінетичні та динамічні закономірності руху сегментів дислокаційних напівпетель, що перетинають поверхню кристалів кремнію, в широкому діапазоні температур деформування T= 300-1073 K, механічних напружень σ = 10 - 110 МПа, густин струму $j = 1x\ 10^2 - 1x\ 10^6$ А/ м^2 та електричних напруг U = 0-50 В.

2. Встановлено, що при деформуванні кристалів кремнію при температурах T < 773 K дислокації не рухаються ні у вихідних зразках, ні у зразках, до яких прикладалось електростатичне поле. Під дією постійного електричного струму густиною $j = 1x\ 10^5 - 1x\ 10^6$ А / м^2 дислокації починають рухатись при значно нижчих температурах деформації у порівнянні з вихідними зразками.

3. Експериментально встановлено, що при деформуванні кристалів кремнію стартові напруження для руху дислокацій та часи затримки початку їх руху при протіканні постійного електричного струму зменшуються в інтервалі температур $T > T_{кр}$ і зростають при температурах $T > T_{кр}$ у порівнянні з вихідними зразками кремнію. Прикладання електростатичного поля до кристалів кремнію під час деформування зразків зменшує часи затримки початку руху дислокацій, але не впливає на стартові напруження.

4. Температурна залежність часів затримки початку руху дислокацій як у вихідних, так і у кристалах, через які протікав електричний струм, має термоактиваційний характер. Визначено термоактиваційні параметри, що характеризують процес відкріплення дислокацій від домішкових центрів. Аналіз отриманих результатів свідчить про зниження при протіканні електричного струму висоти бар'єрів, які утримують дислокації в

стартових положеннях, що можна пояснити зменшенням кулонівської складової взаємодії дислокацій з центрами закріплення.

5. Характер впливу електростатичного поля та постійного електричного струму на динамічну поведінку дислокацій залежить від попередньої термообробки зразків. Так вплив, як електростатичного поля, так і постійного електричного струму, на термооброблені зразки (T= 1423 K, t= 3 год) призводить до того, що дислокації у таких зразках втрачають здатність до руху. Це вказує на те, що характер цього впливу на динамічну поведінку дислокацій залежить від електричної активності дислокацій та стану домішкової атмосфери навколо дислокацій.

6. Швидкість дислокацій в кристалах кремнію при деформуванні в температурній області $T < T_{кр}$ зростає під дією постійного електричного струму. Залежність швидкості руху дислокацій від густини струму - степенева, де показник степеня змінюється в межах n = 1,6- 2,6 в досліджуваному інтервалі температур. В температурній області деформування кристалів кремнію $T > T_{кр}$ пропускання електричного струму призводить до зменшення швидкості руху дислокацій у порівнянні з вихідними зразками. Дія електростатичного поля при механічному деформуванні призводить до збільшення швидкості руху дислокацій у порівнянні з вихідними зразками кремнію.

7. Вплив, як електростатичного поля, так і постійного електричного струму, при $T < T_{кр}$ не змінює термоактиваційний характер руху дислокацій, а також характер залежності швидкості руху дислокацій від механічного напруження. Параметри, що характеризують рух дислокацій: енергія активації руху дислокацій та показник степеня m в залежності $V \sim \sigma^{m}$ змінюються в залежності від густини струму та величини електричної напруги. В електростатичному полі зміна енергії активації незначна (13 %). При протіканні електричного струму в температурній області $773\ K < T < T_{кр}$ енергія активації руху дислокацій зменшується у 1,5-3,0 рази в залежності від густини струму у порівнянні з вихідними кристалами. У температурній області $623\ K < T < 773\ K$ термоактиваційний рух дислокацій визначається ще більш низькими значеннями енергії активації, і при густині струму $j \sim j_{кр}$ швидкість руху дислокацій практично перестає залежати

від температури. Одержані ефекти зміни швидкості та енергії активації руху дислокацій можуть бути пояснені виділенням додаткової енергії рекомбінації носіїв заряду при протіканні електричного струму.

8. За допомогою методу інфрачервоної спектроскопії встановлено, що у вихідних зразках кремнію можна виділити дві температурні області існування термодонорів пов'язаних з киснем. При цьому в низькотемпературній області 623 K < T < 773 K їх концентрація у 4 - 5 разів вища, ніж в області температур 773 K < T < $T_{кр}$. Процес протікання електричного струму супроводжується зростанням концентрації термодонорів в низькотемпературній області, що, на нашу думку, підвищує ймовірність протікання рекомбінації носіїв заряду на подвійних перегинах, які утворюються на дислокаціях. При прикладанні електростатичного поля не зафіксовано зміни концентрації термодонорів.

9. За допомогою методу вторинної іонної мас-спектрометрії (ВІМС) встановлено, що під впливом як електростатичного поля, так і постійного електричного струму, характер розподілу домішок металів по поверхні та по глибині зразка змінюється. Домішки розташовуються вздовж ліній виходу площин ковзання дислокацій на поверхню зразка. При цьому концентрація домішок в приповерхневій області зростає. Це, можливо, призводить до зміни електричної активності площин ковзання дислокацій.

10. При вивченні впливу електростатичного поля на динамічну поведінку дислокацій в кристалах кремнію встановлено, що дислокації виведені в стартові положення "запам'ятовують" факт прикладання електростатичного поля до зразка і при наступному механічному навантаженні рухаються із такими швидкостями, які вони мали б при одночасній дії електро-статичного поля та механічного напруження. "Дислокаційна пам'ять" зберігається протягом тривалого часу при кімнатній температурі у відсутності поля. Ефект "дислокаційної пам'яті" можна пояснити частковою або повною нейтралізацією під дією поля заряду SiO_x-преципітатів. Ця зміна заряду преципітатів при кімнатній температурі є стійкою.

Основні результати дисертації опубліковано у роботах:

1. Горидько Н.Я., Новиков Н.Н., Стебленко Л.П., Бузанева Е.В., Робур Е.Г. О природе влияния твердофазных покрытий на кинетику движения коротких дислокационных полупетель в кремнии // УФЖ. -1986. - Т. 33, N 1. -С. 84-89.

2. Кузнецов Г.В., Скрышевский В.А., Стриха В.И., Робур Е.Г. ИК-спектроскопия границ раздела металл-ВТСП // Тез. докл. П Всесоюзной конф. по высокотемпературной сверхпроводимости. -г. Киев. -1989. Т. 2. -С. 160-161.

3. Скрышевский В.А., Робур Е.Г., Стриха В.И. Применение ИК-спектроскопии отражения-поглощения для исследования свойств контакта GdBaCuO-Si // Тез. докл. У1 Респ. конф. "Физические проблемы МДП-интегральной электроники". -г. Севастополь. -1990. -С. 159.

4. Скрышевский В.А., Стриха В.И., Робур Е.Г. Влияние промежуточного слоя на характеристики контакта сверхпроводник-полупроводник // -УФЖ. -1993. -Т.38, N.6. -С.933-938.

5. Литвиненко С.В., Скрышевский В.А., Стриха В.И., Робур Е.Г. Применение поляризационной ИК-спектроскопии для мониторинга природных и технических сред // Материалы научно-практического семинара "Оптика и спектроскопия и их применение в народном хозяйстве и экологии". -г. Каменец-Подольский. -1992. -С.113.

6. Макара В.А., Стебленко Л.П., Робур Е.Г., Цареградская Т.Л. Влияние электрического поля на подвижность дислокаций в монокристаллах кремния // Доклады АН Украины. -1993. -N.12. -С.75-78.

7. Makara V.A., Steblenko L.P. and Robur E.G. The influence of the electron subsystem excitation on the kinetic and dynamic of dislocation // -Solid State Phenom. -1993. -V.32-33. -P.619-625.

8. Макара В.А., Стебленко Л.П., Горидько Н.Я., Робур Е.Г., Воронцова Л.А., Литвинова Е.М., Хижняк В.И. Влияние постоянного электрического тока на подвижность дислокаций в кристаллах кремния // -Доповіді АН України. -1994. N.3. С. 78-80

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Зам. 79 Формат 60х84/16. Обл.-вид.арк. 0,93
Підписано до друку 5.05.1994 р. Тираж 100
Поліграфічна дільниця ІТФ ім.М.М.Боголюбова НА України

457737

Ав 30.411