

А.А. Гроза¹, П.Г. Литовченко¹, Л.О. Матвеева², П.Л. Нелюба²,
М.Б. Пінковська¹, М.І. Старчик¹

Вплив нейтронного опромінення та термообробки на виникнення ефекту самоорганізації, Франца-Келдиша та квантово-розмірного ефектів у монокристалічному кремнії

¹Інститут ядерних досліджень НАН України, проспект Науки, 47, м. Київ, 03028, Україна

²Інститут фізики напівпровідників ім. В.С.Лащкарьова НАН України,
проспект Науки, 47, м. Київ, 03028, Україна, e-mail: matveeva@isp.kiev.ua

Методом модуляційної спектроскопії електровідбивання (ЕВ) світла в області 3...3,8 еВ досліджено вплив опромінення швидкими нейтронами ($10^{15} \dots 10^{18}$ н/см²), ізотермічного відпалу (800⁰ С) та хімічного поліруючого травлення на оптичні та електронні параметри, а також внутрішні механічні напруження збагаченого киснем ($8 \cdot 10^{17}$ см⁻³) кремнію. Виявлені умови виникнення ефекту Франца-Келдиша, квантово-розмірного ефекту та гетерування поверхнею радіаційних дефектів. Визначені енергія електронного переходу (ширина забороненої зони), розсіяння носіїв заряду та час їх енергетичної релаксації, електрооптична енергія, вбудоване електричне поле, енергії квантованих рівнів і ширина поверхневої квантової ями в залежності від обробки зразків. Показано, що при великих флюенсах опромінення відбувається зміна знаку сигналу ЕВ та його розщеплення із зсувом максимумів в протилежні боки порівняно з вихідним зразком. Ефект великих доз пояснюється процесом самоорганізації власних радіаційних дефектів різного типу (вакансійного і міжвузловинного) шляхом виникнення відокремлених областей радіаційного розупорядкування з різними знаками механічних напружень. Обговорюються механізми переносу носіїв заряду та особливості зонної структури нейтронно опроміненого кремнію.

Ключові слова: кремній, нейтронне опромінення, термообробка, електровідбивання, зонна структура, механічні напруження, поверхневе гетерування, самоорганізація.

Стаття постуила до редакції 23.10.2012; прийнята до друку 15.12.2012.

Вступ

Кремній - унікальний напівпровідник, який завдяки дешевій і добре опрацьованій технології виготовлення планарних структур на його основі є базовим матеріалом сучасної інтегральної електроніки. На кремнії створюються і вдосконалюються надвеликі і надшвидкі інтегральні схеми [1] та нові елементи мікроелектроніки сьогодення.

Відомо, що у кремнії, вирощеному за методом Чохральського, основною ростою домішкою є кисень, який (залежно від його положення в кремнієвій гратці) може бути як в нейтральному, так і в електрично активному стані [2]. При термічній обробці кремнію утворюються електрично активні комплекси за участю кисню (термодонори) або частинки нової фази (преципітати SiO₂). Останні можуть стягувати домішки з об'єму кристала (гетерування домішок), що використовується в технології виготовлення інтегральних схем. Виникає

потреба в контрольованому введенні киснево-кремнієвих преципітатів. Застосовуючи в своїх дослідженнях комплекс експериментальних методик (селективне травлення, електронну мікроскопію, інфрачервону спектроскопію) ми показали [3], що цього можна досягнути радіаційно-термічними обробками кремнію.

З іншого боку, використання при виготовленні напівпровідникових приладів трансмутаційно легованого кремнію, як однієї із можливостей отримання матеріалу з однорідним розподілом питомого опору, робить необхідним отримання даних про взаємодію радіаційних і термічних дефектів в опроміненому кремнії. Зокрема, особливої уваги заслуговує поведінка домішки кисню, здатної брати участь в утворенні радіаційних дефектів, а при відпалі – киснево-кремнієвих комплексів та частинок нової фази (SiO_x).

Основні результати наших досліджень опроміненого кремнію оптичними і структурними методами викладено у монографії [3]. Для отримання

додаткових даних про фізичні процеси, які відбуваються в кремнії при опроміненні та відпалі, ми вважали доцільним дослідити також електронні спектри, застосовуючи метод електровідбивання світла (ЕВ) [4]. Вперше цей метод ми застосували при дослідженні електронних спектрів приповерхневих шарів опроміненних зразків кремнію [5]. В даному випадку його застосовано для отримання об'ємних характеристик матеріалу, що і становило мету роботи.

I. Експеримент

Досліджувався кремній p -типу провідності (p -Si) з питомим опором $10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ і концентрацією розчиненого кисню $\leq 8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, вирощений за методом Чохральського (Si-Cz). Зразки опромінювали швидкими нейтронами реактора флюенсами $10^{15} \dots 10^{18} \text{ н/см}^2$ при температурі не вище 70°C . Ізотермічний відпал зразків проводили при 800°C впродовж 170 годин. Це приводило майже до повного виходу розчиненого кисню в фазу. Ми відслідковували кінетику цього процесу за інфрачервоним поглинанням міжвузловинним киснем [3]. Аналізувалась смуга поглинання при 1110 см^{-1} .

Для дослідження електронних спектрів приповерхневих шарів кремнію застосовано метод модуляційної спектроскопії ЕВ з використанням електролітичної методики [6]. Суть методу полягає в реєстрації відбивної здатності кристала, яка виникає при прикладанні до нього модулюючого електричного поля. При цьому вимірюється відносна модуляція коефіцієнта відбивання $\Delta R/R$. Виміри проведені при кімнатній температурі в неполяризованому світлі в області прямого краю поглинання кремнію E_0 в центрі зони Бріллюена ($3 \dots 3,8 \text{ eV}$). Частота модуляції електричного поля $1,09 \text{ кГц}$, спектральна роздільна здатність 3 меВ , точність вимірювання величини сигналу $\sim 1 \%$.

Різнопольярні спектри ЕВ проаналізовано за допомогою слабопольової теорії з використанням трьохточкового методу Аспенса [7]. За спектральним положенням сигналу і його величиною визначали енергію електронного переходу E'_0 (ширину забороненої зони E_g) та феноменологічний параметр розширення спектру Γ . Він характеризує розсіяння носіїв заряду на дефектах структури кристалічної ґратки і дозволяє визначити час енергетичної релаксації збуджених світлом носіїв заряду $\tau = \hbar/2\Gamma$ та їх рухливість $\mu = \hbar/m^* \Gamma$ (m^* - зведена ефективна маса носіїв заряду). Форма різнопольярного сигналу залежала від типу провідності зразка. Електронному типу провідності відповідав від'ємний перший екстремум сигналу, а дірковому – додатній. При однополярному спектрі значення E_g визначали по енергетичному положенню максимуму сигналу, а параметр Γ – із напівширини смуги ЕВ. Даний метод дозволяє також виявити наявність вбудованого електричного поля і квантово-розмірного ефекту в кремнії на межі поділу з

власним оксидом [8].

II. Результати експерименту та їх обговорення

При дослідженні напівпровідників методом модуляційної спектроскопії електровідбивання світла особливу увагу слід приділяти способу обробки поверхні досліджуваних зразків, якщо треба отримати об'ємні характеристики матеріалу [9]. Форма сигналу ЕВ залежала від флюенсу нейтронного опромінення та умов подальшої обробки зразків, тобто від наявності і виду киснево-кремнієвих преципітатів та радіаційних дефектів в них. Вона змінювалась від різнопольярної до однополярної з різними знаками провідності в залежності від дози опромінення, термічного відпалу та обробки поверхні кремнію. На рис. 1 приведено спектри механічно полірованих зразків кремнію: a - вихідного зразка (крива 1 – невідпалений, крива 2 - відпалений); b - опроміненого флюенсом 10^{15} н/см^2 (крива 1 – невідпалений, крива 2 - відпалений); c - опроміненних флюенсами $5 \cdot 10^{16} \text{ н/см}^2$ (крива 1) і 10^{18} н/см^2 (крива 2) та відпалених. Як видно із рис. 1, a неопромінені зразки мали різнопольярну форму спектру. Вона відповідала p -типу кремнію з параметрами $E_g = 3,416 \text{ eV}$, $\Gamma = 220 \text{ меВ}$ (крива 1) та $E_g = 3,388 \text{ eV}$, $\Gamma = 104 \text{ меВ}$ (крива 2). Отже, для відпаленого кремнію параметр Γ зменшувався вдвічі, відповідно збільшувалися рухливість та час енергетичної релаксації збуджених світлом носіїв заряду (від 84 до $173 \text{ см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$ та від $4,69 \cdot 10^{-15}$ с до $9,61 \cdot 10^{-15}$ с).

Як видно із рис. 1, b , в опроміненних флюенсом 10^{15} н/см^2 зразках p -тип провідності зберігався після відпалу, а інтенсивність сигналу зростала. Він мав однополярну форму з параметрами $E_g = 3,358 \text{ eV}$, $\Gamma = 124 \text{ меВ}$ до відпалу (крива 1) і $E_g = 3,378 \text{ eV}$, $\Gamma = 120 \text{ меВ}$ після відпалу (крива 2) з відповідними μ 145 і $150 \text{ см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$, а τ $8,06 \cdot 10^{-15}$ с і $8,33 \cdot 10^{-15}$ с.

В зразках, опроміненних флюенсами $5 \cdot 10^{16}$ і 10^{18} н/см^2 , сигнал спочатку не реєструвався. Він з'явився лише після відпалу (рис. 1, c), мав однополярну форму спектру з від'ємним максимумом, що відповідало n -типу провідності напівпровідника. Параметр Γ при збільшенні флюенсу опромінення зменшився від 88 меВ (крива 1) до 79 меВ (крива 2), інтенсивність сигналу також зменшилася, зросли μ і τ до $227 \text{ см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$ та $12,65 \cdot 10^{-15}$ с.

Відсутність сигналу ЕВ до відпалу опроміненних зразків свідчить про велику розупорядкованість структури кремнію при збільшенні флюенса нейтронів, що могло приводити до аморфізації приповерхневих шарів кремнію або є наслідком гетерування поверхнею структурних дефектів. Відомо, що біля поверхні зразків, механічно полірованих дрібнодисперсними алмазними пастами, розміщується дефектний прошарок, який впливає на сигнал електровідбивання. Для отримання об'ємних

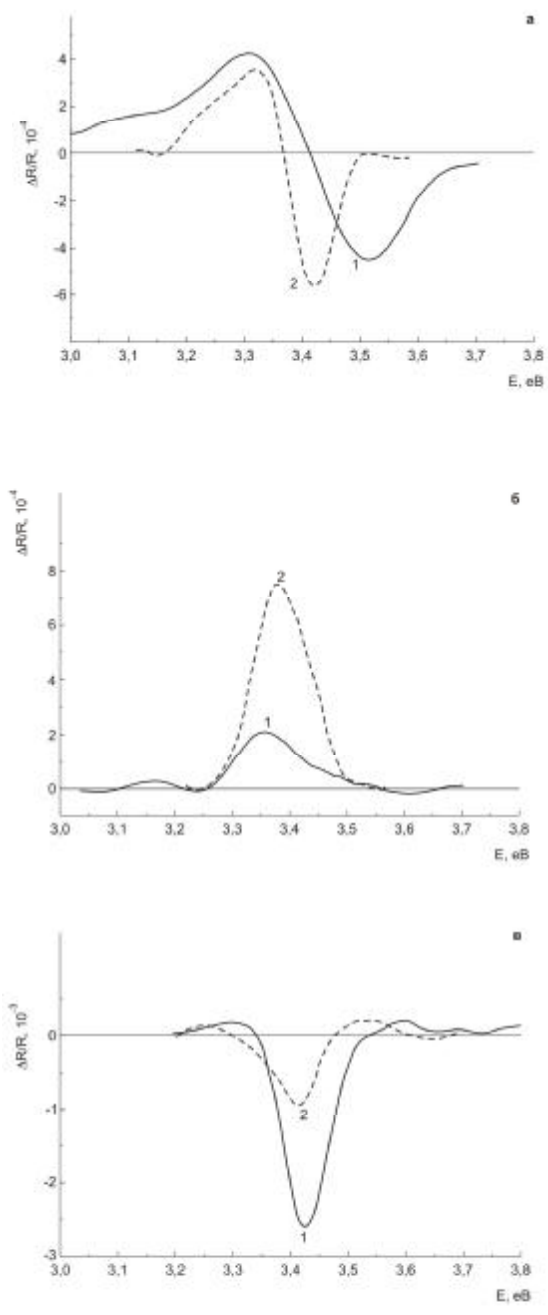


Рис. 1. Спектри електровідбивання монокристалічного механічно полірованого кремнію: *а* – до опромінення не відпалений (1) та відпалений (2); *б* – після опромінення флюенсом 10^{15} н/см² не відпалений (1) та відпалений (2); *в* – відпалений після опромінення флюенсами $5 \cdot 10^{15}$ н/см² (1) та 10^{18} н/см² (2).

характеристик матеріалу цей прошарок необхідно видалити. Для цього нами було використано поліруючий травник HF:HNO₃:H₂O, взятий у співвідношенні 1:3:1. Поява сигналу ЕВ після видалення поверхневого шару в опромінені зразках підтверджує наявність ефекту гетерування поверхнею структурних дефектів в кристалічному кремнії при нейтронному опроміненні, яке призводить до трансформації структурних дефектів, і

пояснюється появою нових місць для преципітацій кисню та залежністю їх природи від флюенса нейтронів. При малих флюенсах це пластинчасті преципітати кристалічної фази (кристаліт), а при великих – колонії мікропреципітацій аморфного кварцу [2].

Спектр вихідного зразка після видалення дефектного шару товщиною 15 мкм мав різнополярну форму (рис. 2, *а*, крива 1) з параметрами $E_g = 3,348$ еВ та $\Gamma = 138$ меВ. Відпалений неопромінений зразок ($E_g = 3,325$ еВ, $\Gamma = 68$ меВ) змінював тип провідності з *p* на *n* (рис. 2, *а*, крива 2) і мав однополярну форму сигналу. Зміна типу провідності відбулася за рахунок утворення високотемпературних термодонорів за відпалу [2]. Зміну форми сигналу для відпалених неопроміненіх сильно легованих зразків *p*-кремнію можна пояснити компенсацією носіїв *p*-заряду термодонарами, в результаті чого зразки набувають провідність, близьку до власної, а сильно легованим компенсованим напівпровідникам притаманна однополярна форма сигналу ЕВ [10].

Поява сигналу ЕВ після хімічного видалення поверхневого шару пояснюється гетеруванням механічно полірованою поверхнею структурних дефектів в кристалічному Si при нейтронному опроміненні високими дозами, бо процес

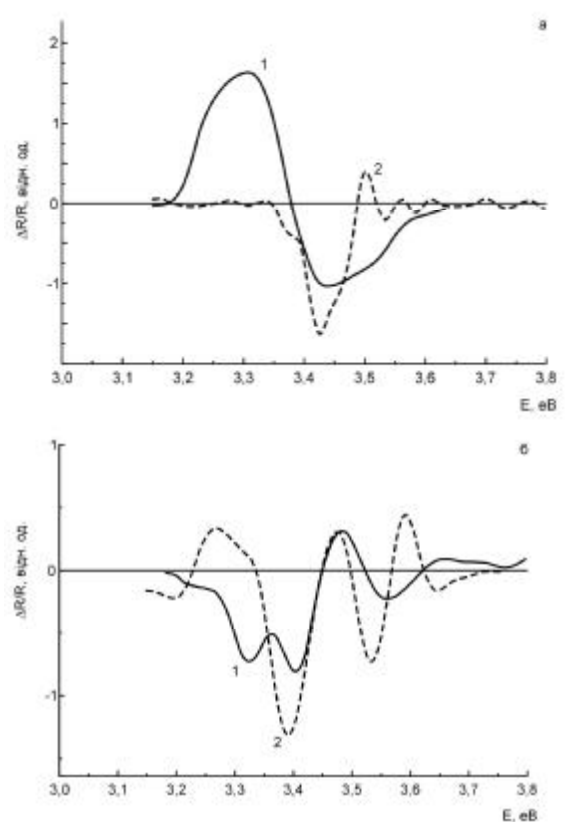


Рис. 2. Спектри електровідбивання монокристалічного кремнію механічно полірованого та хімічно протравленого: *а* – до опромінення не відпалений (1) і відпалений (2); *б* – опромінений флюенсом 10^{18} н/см² не відпалений (1) і відпалений (2).

радіаційного дефектоутворення на поверхні відбувається при менших дозах опромінення, ніж в об'ємі зразка. В спектрі кремнію, опроміненого флюенсом 10^{18} н/см² і не відпаленого (рис. 2,б, крива 1), виявлено два максимуми при 3,403 еВ та 3,325 еВ. (рис. 2,б, крива 1). Розщеплення $\Delta E_g = 78$ меВ можна пояснити існуванням в опроміненому кремнії двох типів областей розупорядкування: вакансійного (скупчення дивакансій) і міжвузловинного. Як показали наші дослідження опроміненого кремнію методом інфрачервоної спектроскопії, відносна доля останніх зростає зі збільшенням флюенсу опромінення. Наявність в опроміненому кремнії областей розупорядкування вакансійного типу приводить до внутрішніх механічних напружень розтягування з енергією переходу $E_{gv} = 3,403$ еВ, а міжвузловинного – до напружень стиску з $E_{gi} = 3,325$ еВ, тобто до локального збільшення і зменшення забороненої зони [11, 12] в порівнянні з $E_g = 3,38$ еВ для ненапруженого кремнію [9], що й знайшло своє підтвердження в спектрі ЕВ за відповідним зсувом максимумів на рис 2,б (крива 1).

Поява в інфрачервоних спектрах напівпровідників, опроміненних високоенергетичними частинками, біля краю власної смуги поглинання додаткового, так званого “білякрайового” поглинання (БКП), сприймалося як ознака наявності в опроміненних кристалах областей розупорядкування (ОР), або кластерів дефектів [13]. Наші дослідження природи “білякрайового” поглинання (БКП) в опроміненому кремнії показали [14], що БКП в опроміненних напівпровідниках зумовлено ОР, які, в загальному випадку, є скупченнями точкових радіаційних дефектів. Поява “білякрайового” поглинання може бути пояснена утворенням “хвостів густини станів” біля країв забороненої зони, за які відповідальні декілька факторів, такі як флуктуації густини речовини, локальні деформаційні та електричні поля та ін. БКП в даному випадку зумовлене як внутрішнім ефектом Франца–Келдиша [4], так і переходами між звуженими ділянками забороненої зони. Наявність високоенергетичних осциляцій в спектрах ЕВ опроміненних нейтронами кремнієвих кристалів є підтвердженням існування в них локальних електричних полів.

Однак, сам факт появи розщеплення сигналу ЕВ не тільки підтверджує існування в опроміненому нейтронами кремнію двох типів областей розупорядкування, але і наочно ілюструє ефект самоорганізації власних радіаційних дефектів, який в наших дослідженнях кремнію, опроміненого високоенергетичними легкими іонами [15], проявлявся у вигляді надгратки “стінок дефектів”, розташованих перпендикулярно напрямку опромінення [16]. Ці ефекти можна пояснити в межах синергетичного підходу [17] і є важливими при побудові сучасної теорії взаємодії високоенергетичного опромінення з речовиною [18].

Після відпалу в опроміненому зразку розщеплення сигналу ЕВ зникло (рис. 2,б, крива 2). Области розупорядкування обох типів та точкові

радіаційні дефекти відпалилися при 800°C вже в перші декілька хвилин відпалу. Максимуми в спектрах ЕВ відпалених зразків кремнію, неопроміненого (рис. 2,а, крива 2) і опроміненого (рис. 2,б, крива 2), зсувалися в сторону більших енергій в порівнянні з E_g для ненапруженого кристалу Si (3,38 еВ). Вони спостерігалися при енергії 3,425 еВ і 3,391 еВ, відповідно, а параметр Γ зменшувався до 68 меВ в неопроміненому зразку і до 64 меВ в опроміненому. Зсув E_g був меншим в опроміненому відпаленому зразку. Даний ефект пояснюється тим, що молярний об'єм фази SiO_x ($x \leq 2$) майже вдвічі більший за об'єм кремнієвої матриці, тому в кремнії виникають внутрішні локальні напруження розтягу, які збільшують ширину забороненої зони [11]. Механічні напруження різного знаку в опроміненому зразку компенсувалися після відпалу, деформаційний потенціал зменшився, дефектна структура зразків упорядкувалася, що є характерним для більш рівноважного стану.

Привертає увагу складна форма смуги ЕВ відпаленого зразка неопроміненого кремнію (рис. 2,а, крива 2): у основної смуги (3,425 еВ) виявляються, принаймні, два супутники з максимумами біля 3,375 еВ і 3,46 еВ, що може свідчити про утворення різних модифікацій преципітатів за відпалу. Це узгоджується з даними ІЧ-спектроскопії, за якими в неопроміненних зразках утворюється більша кількість видів окислів при високотемпературній обробці, порівняно з опроміненними. Структура кисневокремнієвої фази, що утворюється при відпалі в опроміненому кремнії, визначається, в першу чергу, загальною концентрацією наведених радіацією точкових дефектів (А-центрів). Чим більший флюенс опромінення, тим вірогідніше утворення аморфного виду окисної фази. При малих флюенсах опромінення при термообробці кремнію утворюється кристалічна фаза (кристоболіт) [3].

Зміна типу провідності опроміненних зразків після їх відпалу відбувалася за рахунок утворення високотемпературних термодонорів II (або т. з. нових термодонорів) за відпалу при 800°C, які мають прямий зв'язок з преципітацією кисню, або самі є преципітатами, зародками яких були маленькі ростові преципітати [2, 3].

За даними ІЧ-спектроскопії ми виявили, що за термообробки нейтронно опроміненого кремнію при 600 ÷ 800 °C і при 1000 °C спостерігається ефект прискорення преципітації надлишкового кисню, порівняно з неопроміненним. Прискорення преципітації кисню визначається загальною концентрацією наведених точкових радіаційних дефектів вакансійного типу. При опроміненні кремнію флюенсами $5 \cdot 10^{16}$ н/см² і 10^{18} н/см² зростає вплив радіаційних дефектів на спектри ЕВ у порівнянні з термічними. При флюенсі опромінення $\geq 5 \cdot 10^{16}$ н/см² процес преципітації наближається до гомогенного. Роль ростових преципітатів стає незначною. Дефекти структури, пов'язані з преципітацією кисню, виявляються за відпалу при

600...800 °С в усіх опромінених зразках значно раніше в часі, ніж у вихідних зразках, що підтверджує ефект прискорення преципітації кисню в опромінену кремній. В опромінених флюенсом 10^{18} н/см² і термооброблених при 800 °С зразках, за даними вибіркового травлення, спостерігалось зменшення концентрації дефектів майже вдвічі порівняно з кремнієм, відпаленим при 700 °С, та збільшення їх розміру, що, можливо, пов'язане з явищем коалесценції.

В спектрах ЕВ травлених відпалених зразків, неопроміненого і опроміненого флюенсом 10^{18} н/см⁻² (рис. 2,а, б, криві 2), а також невідпаленого опроміненого зразка з'являлись високоенергетичні осциляції, зумовлені внутрішнім ефектом Франца–Келдиша. Такі осциляції спостерігались також в спектрах ЕВ не травлених опромінених та відпалених зразків (рис. 1,в). Після відпалу в них виникають електрично активні комплекси (термодонори) і частинки нової фази SiO_x. Із збільшенням флюенса зростає вплив межі поділу Si/SiO_x на електронні процеси, які відбуваються в напівпровіднику. В ньому накопичується від'ємний заряд для компенсації додатного заряду в оксиді. Це призводить до вигину енергетичних зон Si вниз і, відповідно, до зміни знаку сигналу ЕВ. В тонкому інверсійному шарі носії заряду вільно рухаються паралельно межі поділу, а рух в напрямку, перпендикулярному поверхні, квантується в трикутній вузькій потенціальній ямі з двомірним електронним газом [19]. При наявності квантово-розмірного ефекту в спектрах ЕВ крім переходу з енергією E_g реєструвались також переходи з енергією $E_g + e_n$, де e_n – енергія квантованого рівня n в трикутній ямі на ширині L . За значенням енергії рівня e_n , без врахування змішування зон важких і легких дірок, визначали величину відповідної ширини квантової ями із залежності [20]

$$e_n = \frac{\hbar^2}{2m^*} \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2. \quad (1)$$

Значення e зростало від 60 меВ до 85 меВ при збільшенні дози опромінення з відповідним значенням ширини квантової ями 3 нм і 2 нм.

Осциляції Франца – Келдиша реєструвались не лише в опромінених зразках. Вони з'являлись також в спектрах неопроміненого травленого кремнію після відпалу зразків. Такі знакозмінні осциляції в спектрах ЕВ спостерігаються зазвичай при умові [8]

$$m\pi = f + \frac{4}{3} \left(\frac{E_m - E_g}{\hbar\theta} \right)^{3/2}, \quad (2)$$

де m і E_m – порядковий номер екстремуму осциляції і його енергетичне положення, $\hbar\theta$ – електрооптична енергія, φ – фазовий фактор. Величина $\hbar\theta$ визначається із нахилу залежності $(4/3\pi) \cdot (E_m - E_g)^{3/2}$ від номера осциляції, фактор φ – по перетину прямої з віссю абсцис.

Електрооптична енергія наступним чином залежить від міжзонної ефективної маси носіїв

заряду та електричного поля F_s ,

$$(\hbar\theta)^3 = \frac{e^2 \hbar^2 F_s^2}{2m^*}, \quad (3)$$

де m^* – зведена ефективна маса носіїв заряду для конкретного прямого переходу.

Величина поля змінювалась від $2,3 \cdot 10^6$ В/м до $5 \cdot 10^7$ В/м у відпалених неопроміненому і опроміненому флюенсом 10^{18} н/см² кремній при відповідній зміні електрооптичної енергії від 54 до 95 меВ. В опроміненому невідпаленому кремній величина поля становила $4,04 \cdot 10^7$ В/м.

Висновки

Досліджено вплив опромінення швидкими нейтронами реактора ($10^{15} \dots 10^{18}$ н/см²), ізотермічного відпалу при 800⁰ С та поліруючого травлення монокристалів Si-Cz з високою концентрацією розчиненого кисню ($8 \cdot 10^{17}$ см⁻³) на спектри електровідбивання, оптичні та електронні параметри, а також внутрішні механічні напруження. Визначені ширина забороненої зони, зміна типу провідності зразка, час енергетичної релаксації та рухливість збуджених світлом носіїв заряду, їх розсіювання на власних структурних дефектах при різних зовнішніх чинниках. Встановлена роль радіаційних дефектів та термодонорів різного типу в формуванні спектрів ЕВ.

При дозі 10^{18} н/см² до відпалу зразків виявлено розщеплення сигналу ЕВ із зсувом максимумів в різні сторони спектру, що пояснюється існуванням в монокристалічному кремній, опроміненому високими дозами нейтронів, двох типів відокремлених областей розупорядкування з різним знаком механічних напружень: розтягу (вакансії) та стиску (міжвузловиння). Отриманий результат наочно ілюструє ефект самоорганізації власних радіаційних дефектів вакансійного і міжвузловинного типу і є важливим для побудови сучасної теорії взаємодії високоенергетичного опромінення з речовиною.

Встановлено умови виникнення ефекту Франца–Келдиша та квантово-розмірного ефекту залежно від обробки зразків. Визначені величини електрооптичної енергії і вбудованого електричного поля, енергії квантованих рівнів і ширина квантової ями, виявлено ефект гетерування поверхнею структурних дефектів в зразках кремнію, опроміненому великими флюенсами нейтронів ($5 \cdot 10^{16}$ н/см², 10^{18} н/см⁻²).

Гроза А.А. - науковий співробітник;

Литовченко П.Г. - доктор фізико-математичних наук, професор, зав. Відділу;

Матвеева Л.О. - доктор фізико-математичних наук, професор, головний науковий співробітник;

Нелюба П.Л. - науковий співробітник;

Пінковська М.Б. - науковий співробітник;

Старчик М.І. - старший науковий співробітник.

- [1] G.Ja. Krasnikov, N.A. Zajcev. Sistema kremnij – dioksid kremnija submikronnyh SBIS (Tehnosfera, Kiev, 2003).
- [2] V.M. Babich, N.I. Bleckan, E.F. Venger. Kislorod v kristallah kremnija (Interpres LTD, Kiev, 1997).
- [3] A.A. Groza, P.G. Litovchenko, M.I. Starchik. Efekti radiacii v infrachervonomu poglinanni ta strukturi kremniju (Naukova dumka, Kiiv, 2006).
- [4] V.A. Tjagaj, O.V. Snitko. Jelektrootrazhenie sveta v poluprovodnikah (Naukova dumka, Kiev, 1980).
- [5] A.A. Groza, E.F. Venger, V.I. Varnina, R.Yu. Holiney, P.G. Litovchenko, L.A. Matveeva, A.P. Litovchenko, M.I. Starchik, V.I. Sugakov, G.G. Semicon. Phys. Quant. Electron. and Optoelectron. 4(3), 152 (2001).
- [6] M. Kardona. Moduljacionnaja spektroskopija (Mir, Moskva, 1972).
- [7] D.E. Aspnes. Surf. Sci. 37(2), 418 (1973).
- [8] E.F. Venger, T.Ja. Gorbach, L.A. Matveeva, S.V. Svechnikov. ZhJeTF 5(11), 1750 (1999).
- [9] R.Yu. Holiney, L.A. Matveeva and E.F. Venger. Semicon. Phys. Quant. Electron. and Optoelectron. 2(4), 10 (1999).
- [10] N.P. Garbar, L.A. Matveeva, V.F. Mitin, Ju.A. Thorik, R. Harman Ju.M. Shvarc, Z. Shroubek. FTP 21(3), 393 (1987).
- [11] D. Dargys and J. Kundrotas. Handbook on physical properties of Ge, Si, GaAs and InP (Science and Enciclopedia Publishers, Vilnius, 1994).
- [12] A.L. Poljakova. Deformacija poluprovodnikov i poluprovodnikovyh priborov (Jenergija, Moskva, 1979).
- [13] R.F. Konapljova, V.A. Litvinov, N.A. Uhin. Osobennosti radiacionnyh povrezhdenij poluprovodnikov chasticami vysokih jenergij (Atomizdat, Moskva, 1971).
- [14] A.A. Groza, V.I. Hivrich. FTP 17(5), 870 (1979).
- [15] V.I. Varnina, A.A. Groza, P.G. Litovchenko, L.S. Marchenko, M.I. Starchik, G.G. Shmatko. 9-ja Mezhd. konf. «Vzaimodejstvie izluchenij s tverdyim telom» (VITT-2011) (Izd. BGU, Minsk, 2011), p. 110.
- [16] A.A. Groza, P.G. Litovchenko, M.I. Starchik, V.I. Khivrich, G.G. Shmatko. Ukr. J. Phys. 55, 699 (2010).
- [17] V.I. Sugakov. Osnovi sinergetiki (Oberegi, Kiiv, 2001).
- [18] P.A. Selishhev. Samoorganizacija v radiacionnoj fizike (OOO Aspekt–Poligraf, Kiiv, 2004).
- [19] T. Ando, A. Fauler, F. Stern. Jelektronnye svojstva dvumernyh sistem (Mir, Moskva, 1985).
- [20] P. Ju, M. Kardona. Osnovy fiziki poluprovodnikov (Fizmatlit, Moskva, 2002).

A. Groza¹, P. Litovchenko¹, L. Matveeva², P. Nelyuba², M. Pinkovska¹, M. Starchyk¹

Influence of the Neutron Irradiation and Thermal Treatment on the Effect Self-Organization Appearance, Franz-Keldysh and Quantum-Confinement Effects in Monocrystalline Silicon

¹*Institute of Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine, Prospect Nauky 47, Kyiv 03028, Ukraine*

²*V. Lashkarev Institute of Semiconductor Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, Prospect Nauky 45, Kyiv 03028, Ukraine; e-mail: matveeva@isp.kiev.ua*

The method of modulation spectroscopy of light electroreflectance (ER) in the spectral range 3...3,8 eV was used in order to study optical and electronic properties, and also inner mechanical stresses of oxygen reach (8·10¹⁷ cm⁻³) silicon, irradiated with fast neutrons (10¹⁵...10¹⁸ n/cm²), annealed isothermally at 800 oC and chemically etched. The conditions of appearing of the Franz-Keldysh, the quantum-confinement and the surface gettering effects were established. From the analysis of ER spectra, the following parameters were obtained: the energy of electron transition (bandgap), the broadening parameter, the energy relaxation time of charge carriers, the intrinsic mechanical stresses, the electrooptical energy, the surface built-in electrical field, the energy of quantized levels and the quantum well width in dependence on the samples treatment conditions. In samples, irradiated by 10¹⁸n/cm², the splitting of electroreflectance signal was discovered with maxima shifts in opposite sides in comparison with the Eg value for initial sample. The revealed high dose effect is caused by the self-organization of own radiation-induced defects owing to existence of two types separated disorder regions (vacancies and interstitials) with the mechanical stresses of different signs. The carries transport mechanism and the energy-band structure features have been discussed.

Keywords: silicon, neutron irradiation, thermal treatment, electroreflectance, surface gettering, self-organization.