

О.З. Гарпуль, В.М. Пилипів

Структурне і магнітне розупорядкування приповерхневих шарів плівок ферум-ітрієвого гранату, імплантованих йонами силіцію

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76025, Україна*

Робота присвячена вивченню змін кристалічної та магнітної структури і фізико-хімічних властивостей приповерхневого шару плівок $Y_3Fe_5O_{12}$ ЗІГ внаслідок імплантації йонами Si^+ з різними енергіями та дозами.

Встановлено фізичні закономірності трансформації кристалічної ґратки та досліджено механізми процесу дефектоутворення і зміни електронної структури залежно від умов імплантації. Показано, що при збільшенні енергії йонів Si^+ від 100 до 150 кеВ максимум дефектоутворення, яке відбувається в основному за рахунок ядерних енергетичних втрат, та глибина залягання радіаційних дефектів лінійно зростають, а концентрація дефектів зменшується. Імплантація плівок ЗІГ дозою $5 \cdot 10^{13} Si^+/cm^2$ у вибраному діапазоні енергій зумовлює утворення монотонно спадних профілів деформації, які в основних рисах повторюють вигляд теоретично розрахованих розподілів пружно-індукованих радіаційних дефектів.

Виявлено подібність залежностей відносного вмісту дублетної компоненти месбауерівського спектру від енергії йона-імплантанта для приповерхневого шару (65 нм) та інтегральної величини профілю деформації, отриманого за результатами Х-променевої дифрактометрії, а також їх кореляцію із змінами величини інтегрального розупорядкування структури приповерхневого шару.

Шляхом комбінованої аналізи виміряних для двох рефлексів КДВ від плівок ЗІГ встановлено залежності параметрів профілів деформації та аморфізації, а також характеристик структурних дефектів в імплантованому шарі від дози імплантації. Виявлено спадання величини ефективного магнітного поля на ядрах йонів феруму під час збільшення дози імплантації до $6 \cdot 10^{13} cm^{-2}$ та симбатний характер зміни величини цього поля в обох магнітних підґратках.

Ключові слова: плівки ферум-ітрієвого гранату, структурні дефекти, йонна імплантація, Х-променева дифрактометрія, радіаційні дефекти, профілі деформації, месбауерівські спектри.

O.Z. Garpul, V.M. Pylypiv

Structural and Magnetic Disordering of Surface Layers of Yttrium Iron Garnet Films Implanted with Silicon Ions

*Vasyl Stefanyk' Precarpathian National University,
57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76025, Ukraine*

This thesis is devoted to the study of changes of crystalline and magnetic structure as well as physical and chemical properties of subsurface layers of $Y_3Fe_5O_{12}$ YIG films in consequence of Si^+ ion implantation with different energies and fluencies.

Physical laws of the crystal lattice transformation have been established, and subsequently the mechanisms of the process of defects creation and change of electronic structure have been studied in dependence on implantation conditions. It has been shown that increasing Si^+ ion energy from 100 to 150 keV causes the maximum level of defect creation, which takes place mainly due to nuclear energy losses, and the depth of bedding of radiation defects grows linearly, while the concentration of defects decreases. Implantation of YIG films with a dose of $5 \cdot 10^{13} Si^+/cm^2$ in the chosen energy range causes the creation of monotonously decreasing strain profiles which in basic lines reproduce the shape of the theoretically calculated distributions of elastically induced radiation defects.

The similarity of the dependence of relative content of the duplicate component of the Mössbauer spectrum on implanted ion energy for a subsurface layer (65 nm) and the dependence of integrated value of the strain profile obtained from the results of the X-ray diffractometry has been established, and also their correlation with the changes of the integral disordering value of the subsurface layer structure has been found.

By the combined analysis of the rocking curves measured for two reflections from YIG films the dependences of strain and amorphization profiles parameters as well as of structural defects parameters in the implanted layer on the implantation dose have been determined. The decrease of the effective magnetic-field

value on the iron ion nucleus with the increase of implantation dose up to $6 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ as well as the symbate character of change of this field value in both magnetic sublattices has been established.

Key words: yttrium iron garnet films, structural defects, ion implantation, X-ray diffractometry, radiation defects, profiles strain, mössbauer spectra.

Стаття поступила до редакції 21.09.2012; прийнята до друку 09.11.2012.

Вступ

Розвиток сучасної науки і техніки висуває нові вимоги до структури приповерхневого шару монокристалів, внаслідок чого виникає необхідність контролю його параметрів та розробки технологій для досягнення заданих властивостей. Ферумітрієвий гранат (ЗІГ) – поліфункціональний феромагнітний матеріал із широкими перспективами застосування, зумовленими унікальним поєднанням структурних і магнітних властивостей, якими можна гнучко керувати в процесі синтезу та постобробки. Плівки ЗІГ, крім традиційного використання в мікрохвильовій техніці, мають також важливі застосування в сучасних оптичних технологіях (твердотільних лазерах, магнітооптичних пристроях – модуляторах, аналізаторах, дефлекторах, сенсорах візуалізації магнітних полів, нелінійних оптичних пристроях), а останнім часом наноструктури плівок ЗІГ почали використовуватись для виробництва магнетонних кристалів і контролю за взаємодією між поверхневими акустичними і магнітостатичними хвилями. Водночас епітаксійні плівки ЗІГ є зручним модельним об'єктом для дослідження взаємозв'язків між кристалічною та магнітною мікроструктурами, що зумовлено наявністю трьох пов'язаних феромагнітною взаємодією катіонних підґраток.

Для більшості напрямків практичного застосування плівок ЗІГ визначальну роль відіграють саме властивості приповерхневого шару, тому пошук і розробка методів керування його параметрами є актуальним завданням, вирішення якого дозволить оптимізувати та покращити функціональні характеристики мікро- та наноелектронних пристроїв. Одним з найбільш перспективних методів обробки приповерхневого шару плівок ЗІГ є йонна імплантація (ЙІ), перевага якої полягає в технологічній гнучкості в поєднанні з нерівноважними характеристиками процесу, що дозволяє подолати недоліки хеміко-термічних методів. Отримання в результаті ЙІ прогнозованого розподілу механічних напруг за товщиною приповерхневого шару відкриває шляхи ефективної генерації біжучих спінових хвиль, створення каналів просування циліндричних магнітних доменів, знижує поріг виникнення нелінійних ефектів. З'ясування фізичної суті процесів, що відбуваються в приповерхневому шарі під час його утворення та еволюції, є необхідною передумовою для створення функціональних матеріалів з наперед заданими власти-

востями. Незважаючи на фундаментальні напрацювання, в тематиці радіаційного дефектоутворення в плівках ЗІГ залишаються відкритими ряд суттєвих питань, зокрема, пов'язаних з дослідженням впливу бомбардування поверхні плівок ЗІГ йонами середньої маси, близькими до важких. Вивчення особливостей імплантації йонами Si^+ є важливим для одержання інформації про перебіг процесів у дефектній підсистемі плівки. Під час дослідження модифікованого об'єму необхідно враховувати перерозподіл катіонів, магнітне впорядкування, неоднорідність рельєфу поверхні, структурне розупорядкування приповерхневого шару. При низьких дозах ЙІ однією з причин релаксації напруг є утворення об'ємних дефектів, вивчення характеристик яких впливає на властивості плівок і є окремим прикладним завданням.

Різні режими імплантації йонами Si^+ , що використані в роботі, відрізняються як механізмом дефектоутворення в кінцевій ділянці пробігу йонів силіцію, так і характером глибинного залягання та взаємодією між собою утворених радіаційних дефектів. Це дає можливість встановити основні фізичні закономірності модифікації кристалічної та магнітної підсистем та формувати структури з наперед заданими властивостями за глибиною в декілька десятків нанометрів.

Аналітичний огляд літературних джерел інформації, що висвітлює теоретичні й експериментальні аспекти кристалічної і магнітної структури ферит-гранатових плівок та їх модифікації під час йонної імплантації дозволив виявити особливості кристалічної та магнітної структури монокристалічних ЕФГП і їх трансформацію під дією йонної імплантації. Здійснено послідовний теоретичний опис процесу радіаційного дефектоутворення в цих плівках, аморфізації їх структури під час йонного опромінення та розглянуто методи моделювання йонної імплантації. Показано, що внесені в структуру йонною імплантацією зміни в кристалічній та магнітній підґратках характеризуються складним розподілом дефектів і різними механізмами їх утворення, що залежать від режимів імплантації, тобто енергії йонів та дози опромінення. Здійснено порівняльний аналіз літературних даних у рамках цієї проблеми, розглянуто можливість генерації дефектів у випадках пружних і непружних енергетичних втрат.

Аналіза літературних даних дозволила встановити наявність значної кількості результатів про перебіг імплантації ЕФГП йонами при різних

дозах і енергіях та природу радіаційних дефектів, але модифікація кристалічної та магнітної мікроструктури епітаксійних плівок ЗП під час імплантації близькими до важких йонами середньої маси Si^+ є практично відсутньою. Виявлено, що переважна більшість робіт, присвячених розгляду впливу радіаційних дефектів на магнітну мікроструктуру ЕФП, носить якісний феноменологічний характер, а інформація про зародження та еволюцію радіаційно розупорядкованих ділянок під час зростання дози й енергії імплантації є неповною та суперечливою.

Отже, наявність перерахованих вище проблем, які потребують експериментального дослідження та відповідної теоретичної аналізи, і визначає актуальність вибраної теми дослідження.

Об'єкт дослідження: радіаційно-стимульовані зміни у плівках ферум-ітрієвого гранату.

Предмет дослідження: структурне і магнітне розупорядкування приповерхневих шарів плівок ферум-ітрієвого гранату, імплантованих йонами силіцію.

Метою дослідження є вивчення змін кристалічної та магнітної структури і фізико-хімічних властивостей приповерхневого шару плівок ЗП внаслідок імплантації йонами Si^+ з різними енергіями та дозами.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі наукові завдання:

1. *Дослідження* дефектності кристалічної структури епітаксійної плівки ЗП на підкладці гадоліній-галієвого гранату (ГГГ). Визначення основних типів дефектів та їх розмірів за даними Х-променевої дифрактометрії.

2. *Вивчення* особливостей формування радіаційних дефектів під впливом йонно-атомних зіткнень та їх розподілу за глибиною в порушеному шарі шляхом математичного моделювання процесу імплантації в ЗП йонів силіцію.

3. *Вивчення* деформації кристалічної ґратки плівки ЗП, утвореної в результаті імплантації йонами Si^+ з різними енергіями та дозами.

4. *Вивчення* впливу імплантації йонів Si^+ на магнітну мікроструктуру приповерхневих шарів плівок ЗП у залежності від їх енергії та дози.

5. *Дослідження* морфологічних особливостей поверхні та фізико-хімічних змін структури поверхневого шару вихідних і модифікованих імплантацією йонами Si^+ плівок, а також їх оптичних та магнітних властивостей.

I. Об'єкти та методи дослідження

1.1. Об'єкти досліджень.

1. **Монокристалічні епітаксійні плівки ЗП** $Y_3Fe_5O_{12}$ вирощувалися методом рідкофазової епітаксії (РФЕ) з розчину-розтопу на діелектричній немагнітній підкладці гадоліній-галієвого гранату $Gd_3Ga_5O_{12}$ (стала ґратки $a = 1,2382$ нм, товщина підкладки 1,0 мм, діаметр 76,0 мм) із криста-

лографічною площиною зрізу (111) в ізотермічних умовах на ростовій установці "Garnet 3" (НВП "Карат" – м. Львів) з використанням методики Чохральського. У якості розчинника використовувався $PbO-B_2O_3$, який характеризується низькою в'язкістю і високою здатністю до переохолодження, що забезпечувало добру відтворюваність і якість поверхні вирощених плівок.

2. **Йонну імплантацію в досліджуваних зразках** проведено в Інституті прикладних проблем математики та механіки ім. Я. Підстригача на йонно-променевої установці МРВ-202 фірми "Balzers" (Швейцарія) потоком йонів силіцію в діапазоні енергій 100-150 кеВ та дозою $5 \cdot 10^{13}$ см⁻² і енергією 90 кеВ та дозами $1 \cdot 10^{13}$, $6 \cdot 10^{13}$, $2 \cdot 10^{14}$ см⁻² під кутом $\sim 7^\circ$ від нормалі до поверхні плівки, що виключало процес каналювання та самовідпалу.

1.2. Методи досліджень.

1. **Вирішення поставлених завдань здійснювалось** шляхом застосування комплексу взаємодоповнюваних експериментальних і теоретичних методів досліджень: фізичне і математичне моделювання процесу йонної імплантації; конверсійна електронна месбауерівська спектроскопія (КЕМС); двокристална Х-промінева дифрактометрія (ДРД); Х-промінева фотоелектронна спектроскопія (РФЕС); оптичні дослідження; спостереження доменної структури; вимірювання кривих перемагнічування; метод феромагнітного резонансу.

2. **Для Х-променевої дифрактометричних досліджень** приповерхневих шарів плівок ЗП використано метод високороздільної двокристалної Х-променевої дифрактометрії, реалізований у геометрії Бреґа в $CuK_{\alpha 1}$ випромінюванні трубки Пулюя БСВ-29. Із експериментальних кривих дифракційного відбивання (КДВ) розраховано профілі відносної деформації $\Delta d/d(h)$ приповерхневого шару імплантованих йонами Si^+ плівок ЗП. Розрахунки виконано шляхом моделювання взаємодії Х-променів із неідеальним монокристалом за допомогою динамічної теорії дифракції Х-променів.

3. **Вивчення механізму процесу генерації** радіаційних дефектів у плівках ЗП, спричинених ядерними енергетичними втратами йонів Si^+ , здійснювалося із використанням програми SRIM-2008. Розподіл ступеня структурного розупорядкування кристалічної ґратки ЗП внаслідок імплантації йонів Si^+ отримано за допомогою програми SUSPRE.

4. **Вивчення стану хімічних первнів** у приповерхневій зоні товщиною до 5 нм проводилися за допомогою Х-променевої фотоелектронної спектроскопії Kratos Axis Ultra X-ray, що використовує монохроматичне $Al K_{\alpha}$ - джерело Х-променевого випромінювання з енергією 1486,7 еВ.

5. **Спектри ІЧ-пропускання в діапазоні 0,04-0,49 еВ** реєструвалися за кімнатної температури за допомогою інфрачервоного Фур'є-спектрометра FTIR Thermo-Nicolet (USA). Спектри поглинання в діапазоні 1,3-6,2 еВ були зняті за допомогою

спектрофотометра SPECORD M80 (Karl Zeiss Jena, Germany).

6. Для аналізу морфології поверхні імпантованих плівок проводилися дослідження за допомогою атомного силового мікроскопа Nanoscope III Multimode.

7. Конверсійні електронні месбауерівські (КЕМ) спектри Fe^{57} отримували за кімнатної температури в режимі сталих прискорень з використанням джерела γ -квантів Co^{57} у хромовій матриці з активністю ~ 90 мКи. Реєстрація конверсійних електронів здійснювалась проточним лічильником ($96\% He + 4\% CH_4$), а калібровка спектрів виконувалась відносно α -Fe. Аналізу спектрів проводили з використанням програмного забезпечення Univem MS_701.

II. Результати та обговорення

2.1. Вплив імпантації йонами силіцію з різною енергією на структуру приповерхневих шарів плівок ЗП.

1. З результатів моделювання процесу імпантації монокристалічних плівок ЗП йонами Si^+ з енергією в межах $100 \div 150$ кеВ та дозою $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ випливає, що при збільшенні енергії йонів Si^+ максимум пружного дефектоутворення та глибина максимуму залягання радіаційних дефектів лінійно зростають. Збільшення енергії йонів Si^+ призводить до зростання величини середнього проекційного пробігу та товщини імпантованого шару із зменшенням пікової концентрації йонів-імпантантів. У процесі гальмування в плівці ЗП електронні втрати співмірні з ядерними енергетичними втратами.

2. Розподіли непружних енергетичних втрат йонів Si^+ на одиницю довжини пробігу є монотонно спадними з максимумом на поверхні, причому із зростанням енергії імпантації зростає відсоток електронних втрат від 47% до 56% і збільшується глибина передачі енергії йона Si^+ в електронну підсистему мішені. Для розподілів ядерних енергетичних втрат йона Si^+ характерною є наявність максимуму (відповідно і найбільшого ступеня дефектоутворення) в глибині плівки, положення якого, зі збільшенням енергії імпантації, зсувається вглиб з одночасним лінійним зменшенням значення цієї величини, що характерно для кожної із підграток ЗП.

3. Із статистичної обробки інформації про перебіг генерації і розвитку каскадів вторинних зіткнень для 2000 йонів-імпантантів отримано, що при імпантації в ЗП йонів Si^+ з енергією 100 кеВ максимальною є ймовірність процесу генерації френкелівської пари – 44,1%; для розвитку каскаду з двох атомів віддачі – 14,5%, 3-х – 8,3%, 4-х – 4,9% тощо. Розвиток каскадів із числом зміщених атомів 10 і більше становить 16,3%. Під час збільшення енергії йонів Si^+ ефективнішим є процес генерації радіаційних дефектів менш склад-

ного типу. У досліджуваному діапазоні енергій імпантації радіаційне розупорядкування суттєвіше в аніонній підградці. За енергією 100 кеВ кількість зміщених атомів кисню досягає значення 3,1 атомів на 1 нм пробігу Si^+ , що приблизно втричі перевищує аналогічний показник для підграток феруму. Із збільшенням енергії імпантації кількість зміщених атомів катйонних підграток залишається майже без змін, а аніонна підградка розупорядковується слабше.

4. Зростання енергії імпантації за фіксованою дозою супроводжується зменшенням концентрації дефектів у приповерхневому шарі і призводить до зростання товщини порушеного шару та зменшення ступеня розупорядкування структури (рис. 1), значення якого на поверхні спадає швидше, ніж максимальне значення. Під час бомбардування плівок ЗП йонами Si^+ дефектоутворення, зумовлене електронними енергетичними втратами, є значно менш інтенсивним у порівнянні з ядерними, отже, основний внесок у процес радіаційного дефектоутворення під час імпантації плівок ЗП йонами Si^+ вносять дефекти, що утворюються під час пружного гальмування йона-імпантанта атомами мішені.

Імпантація плівок ЗП йонами Si^+ за досліджуваними режимами призводить до утворення монотонно спадних профілів відносної деформації (рис. 2).

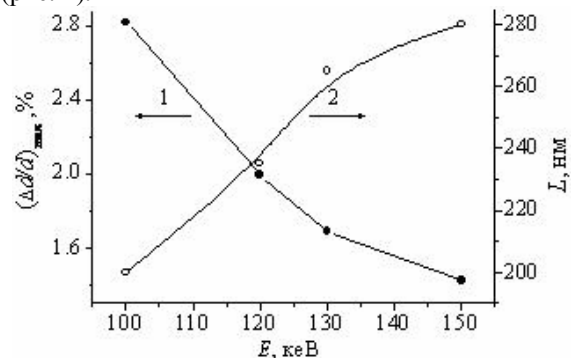


Рис. 1. Залежність максимальної відносної деформації (1) та товщини деформованого шару від енергії йонів силіцію (2).

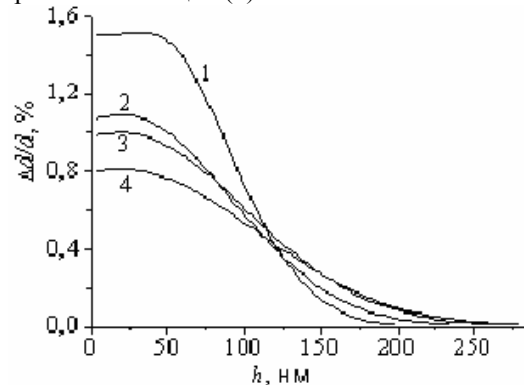


Рис. 2. Профілі відносної деформації в приповерхневих шарах монокристалічних плівок $Y_3Fe_5O_{12}$, імпантованих йонами Si^+ дозою $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ та енергіями: 1 – 100 кеВ; 2 – 120 кеВ; 3 – 130 кеВ; 4 – 150 кеВ.

5. За результатами РФЕС на поверхні присутній ферум у стані йонів Fe^{3+} , що видно із характерної властивості сателітної структури за енергією зв'язку $E_b=719$ еВ (рис. 3). Зміни, які спостерігаються при імплантації для енергій йонів Si^+ 100-140 кеВ, знаходяться в межах інструментальної похибки 0,2 еВ. Пік $Fe2p_{3/2}$ при 710,3 еВ вказує на наявність йонів Fe^{2+} , хоча сателіту струсу в спектрі для діапазону енергій імплантації 100-140 кеВ не спостерігається. Наявні йони Fe^{2+} знаходяться у структурі у невеликій кількості, але, на відміну від йонів Fe^{3+} , вони мають сильний спінорбітальний зв'язок, який є причиною їх переважаючого впливу на електронну релаксацію. Для зразка, імплантованого йонами Si^+ з енергією 150 кеВ, спостерігається зменшення рівня інтенсивності сателіту струсу до рівня інтенсивності основної лінії. Таке зникнення піку сателіту струсу свідчить про парамагнітний стан феруму (наявність великої кількості немагнітних сусідів) на поверхні зразка.

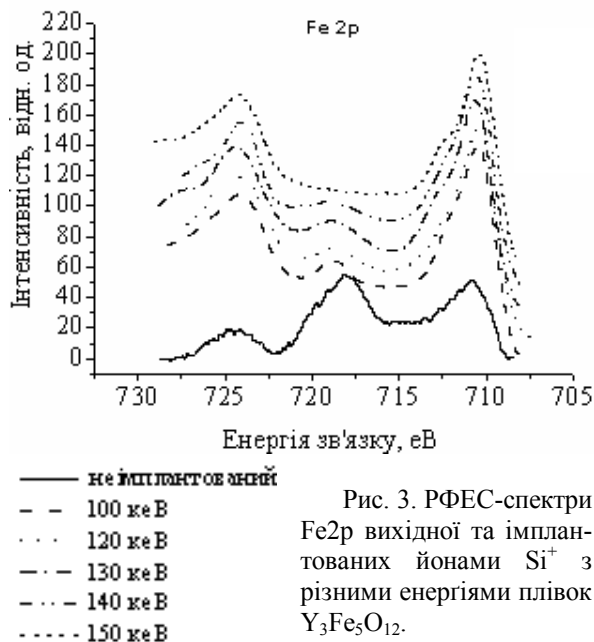


Рис. 3. РФЕС-спектри $Fe2p$ вихідної та імплантованих йонами Si^+ з різними енергіями плівки $Y_3Fe_5O_{12}$.

6. Методом оптичної спектроскопії показано, що кристали магнітних гранатів мають високу прозорість в інфрачервоному спектральному діапазоні 0,2-1,0 еВ. При енергіях, менших 0,2 еВ, поглинання швидко зростає внаслідок ґраткових коливань. Імплантаційна обробка не призводить до зміни коливального спектру молекул, тобто додаткових ліній від зміщених атомів не спостерігається. У діапазоні 0,2-0,5 еВ спостерігається характерний (синусоїдальний) вид спектру, обумовлений недосконалістю зразка, що пов'язано, в основному, з наявністю шаруватої структури плівки, зміною параметра сталого ґратки з глибиною та наявністю пружного стану через невідповідність параметрів ґраток плівки і підкладки. У ділянці прозорості можуть проявлятися також вузькі піки, що зумовлені електричними переходами тривалентних йонів рідкоземельних первнів

у s -підґратці. Незначне зростання пропускної здатності в інфрачервоному діапазоні 0,2-0,5 еВ для зразків, імплантованих йонами Si^+ енергіями 140 та 150 кеВ, свідчить про частинне зняття поверхневих напруг внаслідок імплантації. У діапазоні 1,3-6,2 еВ спостерігається додаткове поглинання в ділянці 5,0-6,0 еВ, яке продовжується в довгохвильовій ділянці та обумовлене йонами Fe^{2+} , тобто при імплантації йонами Si^+ з енергією 150 кеВ виникає невелика кількість йонів Fe^{2+} , що є причиною переважаючого їх впливу на електронну релаксацію. Значне поглинання в ділянці $E < 2$ еВ викликане підсиленням парних переходів йонів Fe^{3+} в октаедричних і тетраедричних положеннях ґратки гранату за рахунок змішування хвильових функцій збуджених станів йонів Fe^{2+} і Fe^{3+} .

7. Встановлено близькість ходу залежностей відносного вмісту дублетної компоненти КЕМ-спектру та інтегральної величини профілю деформації для приповерхневого шару товщиною 65 нм від енергії йонів Si^+ , що може розглядатися як доказ правильності застосованих моделей та достовірності математичної інтерпретації результатів X-променевої дифрактометрії (рис. 4). Водночас ці результати корелюють з даними зміни величини інтегрального розупорядкування структури приповерхневого шару плівки ЗІГ із зростанням енергії йонів Si^+ .

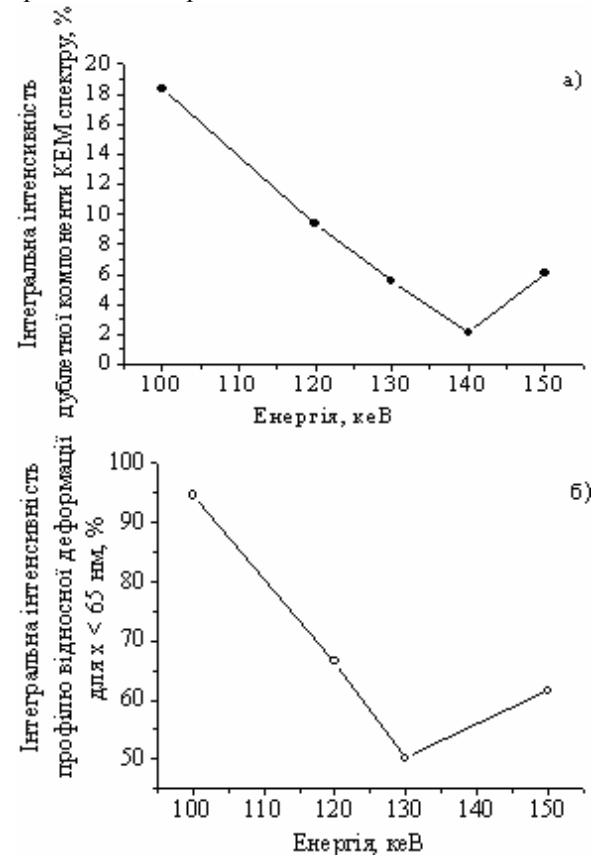


Рис. 4. Залежності відносного вмісту дублетної компоненти КЕМ спектру (а) та інтегральної інтенсивності профілю деформації приповерхневого шару товщиною 65 нм (б) від енергії йонів Si^+ ($D = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$).

8. Варто відзначити, що зростання енергії імплантанта при фіксованій дозі супроводжується порівняно більшими змінами сумарної інтегральної інтенсивності компонент спектру, які відповідають йонам феруму в октаедричному оточенні, порівняно з тетракоординованими. Із збільшенням енергії відносний вміст йонів феруму в магніто-впорядкованому стані, які належать до *a*-підгруп, зростає, наближаючись до стехіометричного.

2.2. Особливості радіаційного розупорядкування приповерхневих шарів плівок ЗП під час моноенергетичної імплантації йонами силіцію з різними дозами.

1. Приведені результати досліджень приповерхневих шарів плівок ЗП, імплантованих йонами Si^+ з енергією 90 кеВ та дозами $1 \cdot 10^{13}$, $6 \cdot 10^{13}$ та $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

2. Виконані розрахунки показали, що під час імплантації плівок ЗП йонами Si^+ з енергією 90 кеВ дещо переважає пружний тип гальмування (електронні та ядерні енергетичні втрати становлять відповідно 370 та 470 еВ/нм). Загальні енергетичні втрати імплантанта під час цієї енергії перевищують 800 еВ/нм, що передбачає можливість розвитку каскадів вторинних зіткнень.

3. Із результатів моделювання, проведеного за програмою SUSPRE, видно, що розрахункові розподіли характеризуються максимумом на глибині $25 \pm 5 \text{ нм}$ і корелюють із положенням максимуму на кривих розподілу концентрації дефектів. Відносне розупорядкування приповерхневої ділянки плівки ЗП для дози $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ становить 3%, $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ – 19%, $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ – 50% і при цій дозі імплантація супроводжується аморфізацією приповерхневого шару. Швидкість зміни максимального значення ступеня розупорядкування плівки різко зростає саме в діапазоні доз опромінення $6 \cdot 10^{13}$ – $4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, набуваючи для дози $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ значення близько 50% (рис. 5 а). Для застосованих експериментальних умов аморфізація приповерхневого шару плівки ЗП відбувається стрибком, і при дозі опромінення $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ товщина аморфного шару становить 30–40 нм (рис. 5 б). З подальшим набором дози товщина розупорядкованого шару зростає, причому швидкість її росту поступово зменшується. Максимальна товщина аморфізованого шару при дозах, більших $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, становитиме 130–140 нм.

4. Модель дефектної структури епітаксійної монокристалічної плівкової системи ЗП $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ на підкладці ГП $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, яка використовувалась під час аналізу вимірних КДВ, передбачала наявність як у підкладці, так і в плівці мікродефектів двох типів, а саме, сферичних кластерів і кругових призматичних дислокаційних петель. Враховувались також наявність точкових дефектів (антиструктурних дефектів і аніонних вакансій) та вплив теплового дифузійного розсіювання (ДР), а для повного опису вимірних КДВ – вплив на дифракцію неоднорідних деформацій у перехідних

шарах між плівкою та підкладкою і на межі між поверхнею плівки і повітрям.

5. Статистична обробка експериментальних КДВ із врахуванням одночасної наявності в кристалі дислокаційних петель і кластерів під час незалежного варіювання концентрацій та радіусів петель і кластерів у плівці та підкладці (за фіксованого значення параметра деформації на межі кластера $\epsilon = 0,03$) дозволила досягти практично максимальної якості підгонки в усьому кутовому діапазоні вимірювань (рис. 6) і, таким чином, встановити характеристики всіх мікродефектів у системі плівка-підкладка (табл. 1).

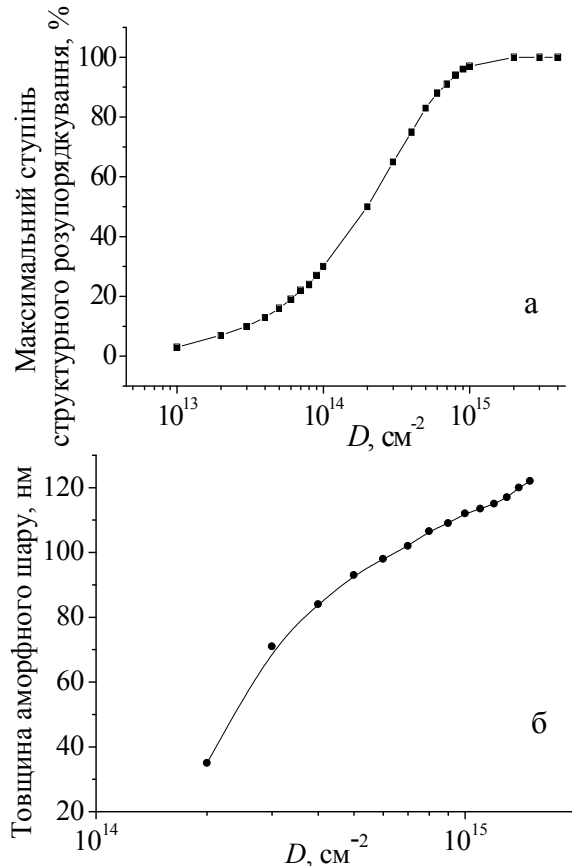


Рис. 5. Теоретично розраховані дозові залежності максимальних значень ступеня структурного розупорядкування приповерхневого шару плівки ЗП, імплантованої йонами Si^+ з енергією 90 кеВ (а), та товщини аморфізованого шару на поверхні цієї плівки (б).

Таблиця 1
Характеристики дефектів у плівці ЗП і підкладці ГП

Тип дефектів	Характеристики дефектів	Підкладка $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$	Плівка $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$
Дислокаційні петлі	Радіус $R_L, \text{ нм}$	90	5
	Концентрація $n_L, \text{ см}^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{12}$ $1 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{15}$
Сферичні кластери	Радіус $R_C, \text{ нм}$	8	10
	Концентрація $n_C, \text{ см}^{-3}$	$1 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{14}$

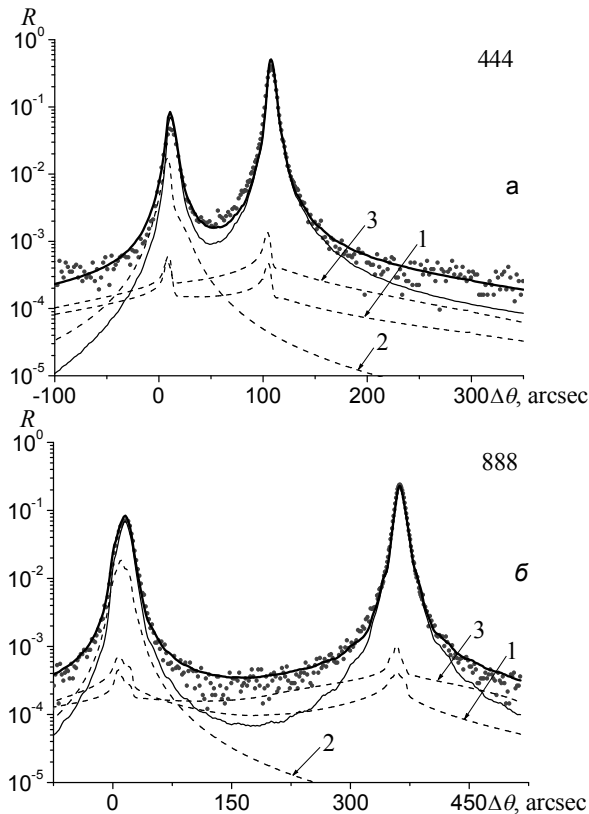


Рис. 6. Виміряні і теоретичні КДВ (відповідно маркери і товсті суцільні лінії) для рефлексів ЗП/ПП (444) (а) і (888) (б), випромінювання $\text{CuK}\alpha_1$. Тонкі суцільні і нумеровані крисковані лінії описують відповідно когерентні компоненти КДВ та внески ДР від дрібних (1) і крупних (2) дислокаційних петель та сферичних кластерів (3).

Вигляд профілю деформації, обчисленого з експериментальних КДВ, близький до теоретично розрахованого профілю концентрації радіаційних дефектів, при цьому положення максимумів профілів співпадають.

6. Розраховані за експериментальними КДВ профілі деформації від плівкової системи ЗП/ПП, імплантованої йонами Si^+ з енергією 90 кеВ у діапазоні доз $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} - 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, є однотипними (з максимумами на глибині $\sim 60 \text{ нм}$), товщина деформованого шару за досліджуваними умовами імплантації для всіх зразків співпадає. Залежності від дози опромінення значень максимальної деформації та деформації на поверхні в приповерхневому шарі є лінійними, проте швидкість зростання деформації на поверхні є меншою, ніж у максимумі профілю деформації. Основним типом складних дефектів в імплантованому шарі є сферичні кластери розміром 1,5 нм, концентрація яких у максимально деформованій ділянці змінюється від $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ до $2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ при зміні дози опромінення від $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ до $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. При всіх трьох дозах імплантації максимальна величина аморфізації в імплантованому шарі є невеликою. Аналогічно для всіх трьох доз імплантації невеликі значення приймає залежний від кута $\Delta\theta$

коефіцієнт поглинання внаслідок ДР в імплантованому шарі. Водночас обидва ці параметри мають істотний вплив на форму когерентної компоненти інтенсивності дифракції від імплантованого шару.

7. За даними, отриманими із КЕМ спектрів, йони феруму в парамагнітному стані у приповерхневому імплантованому шарі епітаксійних плівок ЗП з'являються внаслідок послаблення та руйнування надобмінної взаємодії під час генерації радіаційних дефектів. Враховуючи наявність у тетрапідградці структури ЗП до імплантації 0,9% йонів феруму в парамагнітному стані, розраховували відношення заселеності a - та d -вузлів катіонами феруму (рис. 7). Виявлено спадання відношення n_d/n_a з набором дози, що передбачає відносно більшу ефективність процесу радіаційного дефектоутворення для тетрапідградки і підтверджується якісними спостереженнями трансформації структури КЕМ-спектрів під час збільшення дози імплантації йонами Si^+ .

Цей експериментальний результат пояснюється меншим числом аніонів у ближньому оточенні йонів Fe^{3+} в октапозиціях.

Для зразка, імплантованого дозою $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, виявлено збільшення інтенсивності дифрагованого Х-випромінювання у кутовому інтервалі, що лежить між рефlekсами плівки та підкладки, тобто спостерігається зростання величини міжплощинної відстані в порушеному шарі.

Зміни ближнього оточення у процесі набору дози імплантації зумовлюють зміни величин ефективних магнітних полів H_{ef} на ядрах йонів феруму, що знаходяться в різних координаціях. В усіх випадках спостерігається спадання H_{ef} до дози $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ з подальшим зростанням. Фіксується симбатний характер зміни величин H_{ef} для ядер Fe^{57} в обох магнітних підградках.

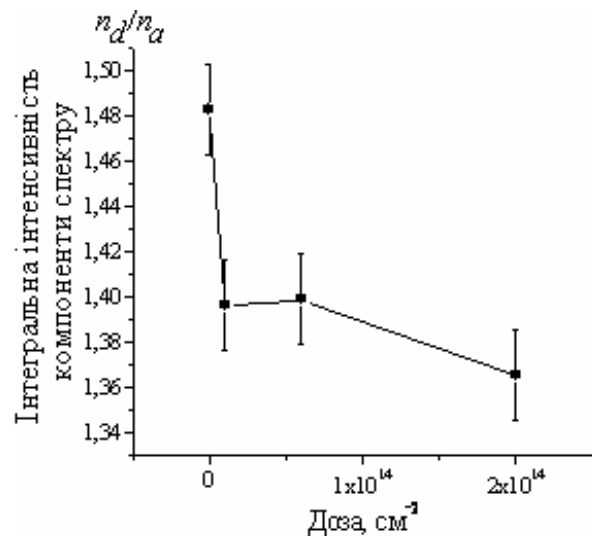


Рис. 7. Зміна відносної заселеності йонами феруму d - та a -підградок структури плівок ЗП зі збільшенням дози імплантації йонами Si^+ з енергією 90 кеВ.

Збільшення дози опромінення на початковому етапі призводить до зростання величини параметра x (відносного вмісту вкладу $4s$ -електронів ($3d^5 4s^x$), який визначає електронну конфігурацію йонів феруму), що передбачає зростання відстані Fe - O, тобто переважання напруг розтягу в плівковій структурі. Водночас, зниження валентності під час імплантації зумовлюється накопиченням дефектів у аніонній підґратці.

Як свідчить аналіза X-променевої структурних даних, зростання дози опромінення приводить до збільшення кутової відстані між рефlekсами плівки та підкладки. Імплантація з дозою $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ супроводжується аморфізацією приповерхневого шару і релаксацією наведених у структурі напруг, оскільки для цього зразка спостерігається зменшення кутової відстані між рефlekсами плівки та підкладки. Залежності від кутової відстані між рефlekсами плівки і підкладки величин ефективних магнітних полів на ядрах для випадку пружно-деформованої структури ($D \leq 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$) у всіх випадках є монотонно спадними.

9. Радіаційно розупорядковані ділянки, які виникають внаслідок імплантації плівок ЗП, за кімнатних температур уявляють собою парамагнітні включення у феромагнітній матриці. Очевидно, що концентрація аморфізованих кластерів пропорційна відносному вмісту дублетної компоненти КЕМ спектру (рис. 8).

10. Причиною зміни валентності та виключення йонів Fe з надобмінної взаємодії є входження в структуру немагнітних йонів Pb^{2+} , Pb^{4+} та Pt^{4+} . Припущення про зайняття йонами Pb^{4+} та витісненнями з додекаедричних порожнин йонами Pt^{4+} частинками Y^{3+} виключно октаедричних позицій, що визначатиме приналежність йонів Fe в парамагнітному стані до тетрапідґратки структури ЗП, підтверджується експериментальними значеннями у спектрі вихідного зразка співвідношення інтегральних інтенсивностей парціальних підспектрів, виділених для ядер Fe^{3+} в окта- і тетрапозиціях.

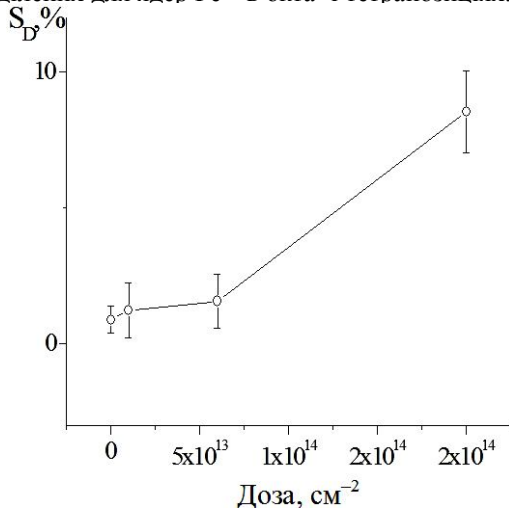


Рис. 8. Залежність відносного вмісту дублетної компоненти КЕМ-спектрів плівок ЗП від дози імплантації йонами Si^+ ($E = 90 \text{ кеВ}$).

Висновки

1. Під час імплантації йонами Si^+ з енергією від 100 до 150 кеВ у плівці ЗП утворюється значна кількість вторинних дефектів; при цьому найбільш ймовірним є утворення пар Френкеля – 44%, ймовірність розвитку каскаду з двох атомів віддачі – 15%, з десяти атомів віддачі і більше – близько 17%. Під час імплантації йонів Si^+ з енергією 90 кеВ у плівку ЗП проективний пробіг йонів Si^+ становить $80 \pm 5 \text{ нм}$, максимальна глибина їх проникнення сягає $170 \pm 6 \text{ нм}$, а максимальне дефектоутворення відбувається на глибині $50 \pm 3 \text{ нм}$. Структурне розупорядкування за цією енергією для дози $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ становить 3%, $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ – 19%, $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ – 50%, і різко зростає з подальшим збільшенням дози та поширенням процесу аморфізації.

2. Імплантація плівок ЗП йонами Si^+ з дозою $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ у діапазоні енергій 100–150 кеВ приводить до утворення монотонно спадних профілів відносної деформації, які корелюють із теоретично розрахованими розподілами пружно-індукованих радіаційних дефектів, а їх невідповідність у приповерхневій ділянці зумовлена дефектоутворенням за рахунок виникнення теплових піків.

3. На основі аналізу приповерхневого шару плівок ЗП, імплантованих йонами Si^+ дозою $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ та енергіями 100–150 кеВ, методами РФЕС та КЕМС встановлено присутність йонів Fe^{2+} і наявність великої кількості немагнітних сусідів феруму.

4. Дослідженнями оптичних спектрів у ді-лянках 0,04-0,49 еВ та 1,3-6,2 еВ для плівок ЗП, імплантованих йонами Si^+ з дозою $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, встановлено зростання пропускну здатності в діапазоні 0,20-0,49 еВ за енергіями йонів 140 та 150 кеВ, тоді як у діапазоні 5,0-6,0 еВ спостерігається додаткове поглинання, а при $E < 2 \text{ еВ}$ – сильне поглинання для енергії 150 кеВ.

5. Методом КЕМС встановлено зменшення ступеня інтегрального розупорядкування структури приповерхневого шару товщиною 65 нм плівки ЗП із зростанням енергії імплантованих йонів Si^+ від 100 до 150 кеВ при дозі $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$.

6. Залежність відносного вмісту дублетної компоненти КЕМ-спектру від енергії йона-імплантанта для приповерхневого шару товщиною 65 нм корелює з такою ж залежністю інтегральної величини профілю деформації, отриманого за результатами X-променевої дифрактометрії, та теоретично розрахованими змінами величини інтегрального розупорядкування структури цього шару, що свідчить про адекватність застосованих моделей.

7. Шляхом аналізу КДВ від рефlekсів (444) та (888) з використанням формул статистичної динамічної теорії дифракції в недосконалих кристалах встановлено, що основними типами дефектів кристалічної структури в плівках ЗП є дислокаційні петлі радіусом 5 нм та сферичні кластери радіусом 10 нм.

8. Профілі деформації від плівкової системи ЗП/ГП, імплантованої йонами Si^+ з енергією 90 кеВ, є однотипними для всіх доз з незмінною товщиною деформованого шару і максимумами на глибині ~ 60 нм. Значення максимальної деформації та деформації на поверхні зі збільшенням дози опромінення зростають лінійно, що свідчить про слабку взаємодію між первинними радіаційними дефектами. Основним типом складних радіаційних дефектів є сферичні кластери.

9. Величина ефективного магнітного поля H_{ef} на ядрах йонів феруму спадає включно до дози імплантації $6 \cdot 10^{13} \text{ Si}^+/\text{cm}^2$ і зростає під час подальшого збільшення дози опромінення. Зміни величини H_{ef} для ядер Fe^{57} в обох магнітних підгратках мають симбатний характер.

Наукова новизна отриманих результатів

Поєднання сучасних прецизійних експериментальних методів дослідження і засобів математичного моделювання дозволило отримати більш повну і різнобічну інформацію про структуру і фізичні властивості імплантованого шару, а також поглибити знання про особливості радіаційного дефектоутворення в епітаксійних ферит-гранатових плівках (ЕФГП), зокрема плівках ЗП, імплантованих йонами силіцію за різними енергіями та дозами, при цьому отримано такі нові наукові результати:

1. Уперше проведено комплексне дослідження вихідних та імплантованих йонами силіцію епітаксійних плівок ЗП і отримано інформацію про їх структурну досконалість та фізичні властивості. Встановлено, що дефектоутворення під час імплантації йонами Si^+ відбувається практично за рахунок ядерних енергетичних втрат, при цьому близько половини первинних радіаційних дефектів становлять пари Френкеля, а ймовірність розвитку каскаду із десяти і більше атомів віддачі – близько 17%.

2. Уперше показано, що імплантація плівок ЗП у діапазоні енергій 100-150 кеВ зумовлює утворення монотонно спадних профілів деформацій, які за виглядом аналогічні теоретично розрахованим розподілам пружно-індукованих радіаційних дефектів.

3. Уперше встановлено кореляцію між енергетичними залежностями інтегральної величини визначених за допомогою ДРД профілів відносної деформації у приповерхневих шарах плівок ЗП, імплантованих йонами Si^+ з енергією в діапазоні 100-150 кеВ, та теоретично розрахованими розподілами радіаційних дефектів у цих шарах і енергетичними залежностями відносного вмісту дублетної компоненти месбауерівського спектру.

4. Уперше встановлено спадання відношення заселеностей тетраедричної та октаедричної підграток з ростом дози імплантації йонів Si^+ з енергією 90 кеВ, що передбачає відносно більшу ефективність процесу радіаційного дефектоутворення для тетраедричної підгратки, та встановлено симбатний характер зміни величини ефективного магнітного поля на ядрах йонів феруму в обох магнітних підгратках.

5. Уперше, використовуючи формули нової моделі статистичної динамічної теорії дифракції Х-променів у дефектних кристалічних структурах з неоднорідним розподілом деформації, встановлено залежності параметрів профілів деформації та характеристик структурних дефектів у плівках ЗП від дози імплантації йонами Si^+ з енергією 90 кеВ.

Практичне значення отриманих результатів

1. Поєднання цілісного комплексу сучасних неруйнівних методів та методик дослідження, що представлені в роботі, забезпечує проведення детального вивчення структурної досконалості ЕФГП.

2. Отримані результати дозволяють вдосконалити комплекс технологічних методів модифікації приповерхневих шарів епітаксійних гетероструктур ЗП/ГП.

3. Поглиблені знання взаємозв'язків між параметрами дефектної кристалічної структури і характеристик магнітної мікроструктури плівок ЗП, імплантованих йонами Si^+ , та особливостей радіаційного дефектоутворення у складних оксидних сполуках, що відкриває нові можливості вдосконалення технології модифікації магнітних властивостей таких матеріалів.

Умовні позначення

ЗП – ферум-ітрієвий гранат;

ГП – гадоліній-галієвий гранат;

ЕФГП – епітаксійна ферит-гранатова плівка;

РФЕ – рідкофазова епітаксія;

ЙП – йонна імплантація;

КЕМС – конверсійна електронна месбауерівська спектроскопія;

КЕМ – конверсійний електронний месбауерівський спектр;

ДРД – двокристална Х-променева дифрактометрія;

РФЕС – Х-променева фотоелектронна спектроскопія;

КДВ – криві дифракційного відбивання;

ДР – дифузійне розсіяння.

Література

1. Остафійчук Б.К. Вплив йонної імплантації Si^+ на поверхневий шар монокристалічних ЗІГ – плівок / Б.К. Остафійчук, **О.З. Гарпуль**, Я.Т. Соловко, В.М. Пилипів // Фізика і хімія твердого тіла. – 2010. – Т. 11, № 2. – С. 344-348.
2. **Гарпуль О.З.** Оптичне поглинання в епітаксійних ферит-гранатових плівках, імплантованих йонами силіцію // Фізика і хімія твердого тіла. – 2011. – Т. 12, № 3. – С. 639-642.
3. Ostafiychuk B.K. Implantation of He^+ , B^+ and Si^+ Ions in Single Crystalline Iron Garnet Thin Films / Ostafiychuk B.K., Fedoriv V.D., Yaremiy I.P., **Garpul O.Z.**, Kurovets V.V., Yaremiy S.I. // Phys. Status Solidi A 208. – 2011. – № 9. – P. 2108-2114.
4. Pylypiv V.M. Dynamical X-ray Diffractometry of the Defect Structure of Garnet Crystals / V.M. Pylypiv, T.P. Vladimirova, I.M. Fodchuk, B.K. Ostafiychuk, Ye.M. Kyslovskyy, V.B. Molodkin, S.I. Olikhovskii, O.V. Reshetnyk, O.S. Skakunova, V.V. Lizunov and **O.Z. Garpul** // Phys. Status Solidi A. – 2011. – V. 208, №11. P. 2558-2562.
5. Пилипів В.М. Динамічна дифрактометрія структурних дефектів і деформацій в гранатовій плівковій системі $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ / В.М. Пилипів, С.Й. Оліховський, Т.П. Владімірова, О.С. Скакунова, В.Б. Молодкін, Б.К. Остафійчук, Є.М. Кисловський, О.В. Решетник, С.В. Лізунова, **О.З. Гарпуль** // Металлофізика и новейшие технологии. – 2011. – Т. 33, № 9. – С. 1147-1174.
6. Остафійчук Б.К. Формування структурної неоднорідності приповерхневого шару плівок ферум-ітрієвого гранату шляхом імплантації йонів Si^+ / Остафійчук Б.К., **Гарпуль О.З.**, Пилипів В.М., Яремій І.П., Куровець В.В. // Фізична інженерія поверхні. – 2011. – Т. 9, № 2. – С. 150-156.
7. Пилипів В.М. Структурне розупорядкування приповерхневого шару імплантованих йонами силіцію плівок ферум-ітрієвого гранату / В.М. Пилипів, **О.З. Гарпуль**, Б.К. Остафійчук, В.О. Коцюбинський, В.В. Куровець, О.Ю. Бончик // Фізика і хімія твердого тіла. – 2012. – Т. 13, № 1. – С. 48-54.
8. Пилипів В.М. Зміни магнітної мікроструктури приповерхневих шарів плівок ферум-ітрієвого гранату, ініційовані імплантацією йонів Si^+ / В.М. Пилипів, **О.З. Гарпуль**, Б.К. Остафійчук, В.О. Коцюбинський, Artur Włachowski, Krzysztof Ruebenbauer, Jan Żukrowski // Фізика і хімія твердого тіла. – 2012. – Т. 13, № 3. – С. 668-674.
9. Pylypiv V.M. Magnetic structure of subsurface layers of single crystalline yttrium-iron garnet films implanted with Si^+ ions with various energies / V.M. Pylypiv, **O.Z. Garpul**, V.O. Kotsyubynsky, B.K. Ostafiychuk, V.V. Mokliak, Michal Korpciewicz, I.I. Syvorotka // Physical surface engineering. – 2012. – V. 13, № 3. – P. 303-308.
10. Пат. № 62088 Україна, МПК⁵¹ H01F 10/00 C30B 31/22/. Спосіб формування надкисневої надструктури в імплантованих магнітних плівках / **О.З. Гарпуль**, Я.Т. Соловко (Україна); Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника. – 2011 01013; Заявл. 31.01.2011; Опубл. 10.08.2011, Бюл. №15.
11. **Гарпуль О.З.** Рентгенівське дослідження приповерхневих монокристалічних шарів $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ -плівок / Оксана Гарпуль // Тези доповідей Міжнародної конференції студентів та молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики ЕВРИКА – 2009. – Львів, 2009. – С. 12.
12. **Garpul O.Z.** Influence of ionic implantation Si^+ on superficial layer of YIG-films, grown up by method of liquid-phase epitaxy / O.Z. Garpul, Y.T. Solovko // Materials of the 6th International Conference NEET-2009, 23 – 26 June 2009, Zacořane, Poland. – Zacořane, Poland, 2009. – P. 116.
13. Остафійчук Б.К. Деформація приповерхневих шарів ФІП при імплантації йонами Si^+ / Б.К. Остафійчук, **О.З. Гарпуль**, І.П. Яремій, В.І. Кравець // Фізика і технологія тонких плівок та наносистем: Матеріали XII Міжнародної конференції МКФТГПН-ХІІ. – 18-23 травня 2009, Івано-Франківськ, Україна. – Івано-Франківськ, Україна, 2009. – Т. 2. – С. 233-234.
14. Pylypiv V.M. X-ray dynamical diffractometry of the defect structure of garnet crystals/ V.M. Pylypiv, T.P. Vladimirova, I.M. Fodchuk, B.K. Ostafiychuk, Ye.M. Kyslovskyy, V.B. Molodkin, S.I. Olikhovskii, O.V. Reshetnyk, O.S. Skakunova, V.V. Lizunov, and **O.Z. Garpul** // Materials of the 10th Biennial Conference on High Resolution X-Ray Diffraction and Imaging, ХТОР 2010, 20th – 23rd September 2010, London, United Kingdom. – London, United Kingdom, 2010. – P. 42.
15. Pylypiv V.M. Simulation of the defect structure of single crystal gadolinium gallium garnet, with the help of statistical dynamical theory of scattering / V.M. Pylypiv, T.P. Vladimirova, Ye.M. Kyslovskyy, S.I. Olikhovskii, **O.Z. Garpul** // Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems: Materials of the XIII International Conference ICPTTFN-XIII, 16-21 of May 2011, Ivano-Frankivsk, Ukraine. – Ivano-Frankivsk, Ukraine, 2011. – V. 2. – P. 151.
16. Pylypiv V.M. Modelling of radiation defects implanted Si^+ ions in epitaxial films of yttrium iron garnets/ V.M. Pylypiv, **O.Z. Garpul**, V.V. Kurovets // Mediterranean – East-Europe Meeting Multifunctional Nanomaterials: NanoEuroMed 2011, 12-14 May 2011, Uzhgorod, Ukraine. – Uzhgorod, Ukraine, 2011. – P. 133.

17. **Garpul O.Z.** Influence of ion implantation of silicon at different energies of optical absorption of YIG-films / O.Z. Garpul, Y.T. Solovko // Materials of the 7th International Conference NEET-2011, 28 June - 1 July 2011, Zaczopane, Poland. – Zaczopane, Poland, 2011. – P. 16.
18. Pylypiv V.M. Radiation defect formation in monocrystalline YIG films implanted by silicon ions / V.M. Pylypiv, **O.Z. Garpul**, V.V. Kurovets // Materials of the 4th International Conference of Radiation Interaction With Material And Its Use In Technologies. 14-17 May 2012, Kaunas, Lithuania. – Kaunas, Lithuania, 2012. – P. 205-208.
19. **Гарпуль О.З.** Изменения магнитной подсистемы монокристаллических пленок ЖИГ в результате имплантации ионами Si^+ / О.З. Гарпуль, В.М. Пылыпив, Я.Т. Соловко // Сборник материалов III Всероссийской молодежной конференции с элементами научной школы: “Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества”. 29 мая – 1 июня 2012 г., ИМЕТ РАН, РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия. – Москва, Россия, 2012. – С. 151-152.

Гарпуль Оксана Зиновіївна – старший лаборант науково-навчального центру діагностики матеріалів.

Пилипів Володимир Михайлович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, декан факультету математики та інформатики.

Рецензент

Сіренко Г.О. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри неорганічної та фізичної хемії Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.