

УДК 538.975+539.26

Б.К. Остафійчук, І.П. Яремій, В.І. Кравець, В.Д. Федорів, Л.С. Яблонь Дослідження структурних змін в монокристалах ГГГ, модифікованих іонами бору при різних енергіях

*Прикарпатський університет ім. В. Стефаника
вул. Шевченка, 57, Івано-Франківськ, Україна*

Представлені результати досліджень приповерхневих шарів монокристалів ГГГ, імплантованих іонами B^+ дозою $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ в діапазоні енергій 80–150 кеВ. Показано, що при імплантації іонами бору профіль зміни міжплощинної відстані для даної дози є монотонно-спадним, і його можна представити у вигляді суми двох профілів, один з яких пов'язаний з ядерними, а інший з електронними втратами.

Ключові слова: гадоліній-галієвий гранат, крива дифракційного відбивання, профіль відносної зміни міжплощинної відстані.

Стаття постуила до редакції 17.09.2002; прийнята до друку 23.09.2002

I. Постановка задачі і об'єкти дослідження

Одним з можливих способів зміни структурних, і відповідно магнітних, параметрів приповерхневих шарів епітаксійних ферит-гранатових плівок (ФГП) є їх іонна імплантація. Важливою практичною задачею для розробки фізичних основ науково-обґрунтованого управління структурними і магнітними властивостями плівок та прогнозування їх поведінки в процесі експлуатації є встановлення закономірностей формування структури приповерхневої зони плівки в процесі іонного опромінення. Аналіз змін кристалічної структури гранатових плівок, що відбувається при імплантації іонів бору середніх енергій в межах доз $3 \cdot 10^{14} - 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, проведено в роботах [1,2], однак модифікація кристалічної ґратки для доз нижчих $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ні в даних, ні в інших роботах не розглядається. Однією з причин такої ситуації є складність розшифрування (обчислення профілів відносної зміни міжплощинної відстані з глибиною) кривих дифракційного відбивання даних зразків, а також проблема неоднозначності, яка при цьому часто виникає [3].

Метою даної роботи було дослідження приповерхневих шарів ФГП, деформованих внаслідок низькодозової імплантації іонами B^+ в діапазоні енергій 80–150 кеВ.

В якості модельних зразків були вибрані монокристали гадоліній-галієвого гранату $Gd_3Ga_5O_{12}$ (ГГГ), вирощені методом Чохральського з площиною зрізу $\langle 111 \rangle$ і сталою ґратки $12,382 \text{ \AA}$. Імплантація проводилась на установці "Везувій" в режимі, що

виключає каналювання, іонами B^+ з енергією 80, 110 та 150 кеВ і дозою $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

Вибір для дослідження монокристалів ГГГ був зроблений з таких міркувань.

1. Усувається вплив плівки на процес модифікації приповерхневого шару в процесі іонної імплантації. Досліджувані ФГП хоча і є структурно досконалими, в них все ж існують пружні деформації за рахунок розбіжностей в сталих ґратки плівки і підкладки та різниці в їх термічних коефіцієнтах. Крім того, на величину пружної деформації впливає товщина плівки [1].

2. На кривих дифракційного відбивання від монокристалів ГГГ відсутній головний брегівський пік підкладки, який може попадати в область додаткових піків від порушеного шару, в зв'язку з чим втрачається частина інформації.

II. Методика обробки експериментальних результатів

Методом двокристалльної рентгенівської спектроскопії на установці ДРОН-2.0 були одержані криві дифракційного відбивання (КДВ) від площини (444). За даними кривими, моделюючи на основі рівняння Такаґі поширення рентгенівських променів [4], обчислювались профілі відносної зміни міжплощинної відстані з глибиною. Загальний вигляд даних профілів задавався функціонально, з наступним поділом приповерхневої деформованої частини монокристала на підшари, в кожному з яких відносна деформація вважалася сталою.

В роботі [5] запропонована динамічна модель структури імплантованого шару, згідно якої в ФГП, імплантованих іонами B^+ з енергією 80 кеВ і дозами $9 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, приповерхневий модифікований шар складається з наступних підшарів: поверхневого аморфного, дефектно-деформованого кристалічного, внутрішнього аморфного та пружно-деформованого кристалічного підшару. При дозах нижчих $9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ аморфізація починається з поверхні плівки і поширюється в глибину. При дозах більших $9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ поряд з поверхневим аморфним шаром на глибині $\sim 1200 \text{ \AA}$ виникає внутрішній аморфний шар, які зливаються в один при дозі $\sim 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

Виходячи з даної моделі, для доз нижчих $9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, профіль відносної зміни міжплощинної відстані нами запропоновано задавати у вигляді суми профілів, один з яких зв'язаний з ядерними, а другий з електронними втратами іона-імплантанта. В роботі [6] показано, що при імплантації іонами бору з енергією 80 кеВ максимум ядерних втрат лежить в глибині порушеного шару, тоді як максимум електронних втрат припадає на поверхню. За даними [7] профіль деформації пропорційний профілю ядерних втрат, форму якого можна задати асиметричною гаусіаною.

Із вище сказаного, та з метою мінімізації кількості параметрів, якими проводиться наближення, профіль відносної зміни міжплощинної відстані $\frac{\Delta d}{d}(z)$ вибирався у вигляді суми асиметричної та спадної гаусіан:

$$D = \begin{cases} D_{\max}^{\text{Я}} \exp[-(z - R_p^{\text{Я}})^2 / \sigma_1^{\text{Я}2}], & \text{якщо } z < R_p^{\text{Я}} \\ D_{\max}^{\text{Я}} \exp[-(z - R_p^{\text{Я}})^2 / \sigma_2^{\text{Я}2}], & \text{якщо } z \geq R_p^{\text{Я}} \end{cases} + D_{\max}^{\text{Е}} \exp[-(z - R_p^{\text{Е}})^2 / \sigma^{\text{Е}2}]$$

$D = \frac{\Delta d}{d}$, z – відстань, яка відраховується від поверхні в глибину кристалу, $R_p^{\text{Я}}$ – точка зшивки асиметричної гаусіани, $\sigma_1^{\text{Я}}$, $\sigma_2^{\text{Я}}$ і $\sigma^{\text{Е}}$ – параметри гаусіан, які характеризують їх ширину на піввисоті. Перший доданок, асиметрична гаусіана, – складова профілю, пов'язана з ядерними втратами (верхній індекс Я). В другому доданку $R_p^{\text{Е}} < 0$, тобто складова профілю, зв'язана з електронними втратами (верхній індекс Е) є монотонно-спадною. Визначення профілю відносної зміни міжплощинної відстані проводилося за методикою, описаною в [3].

III. Результати експерименту та їх обговорення

Обчислені профілі відносної зміни міжплощинної відстані та їх складові при імплантації іонів B^+ з дозою $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ представлені на рис. 1. Як бачимо, дані профілі для всіх зразків є монотонно-спадними і максимум деформації припадає на приповерхневий шар, тобто визначальну роль у створенні деформацій в іонно-імплантованому шарі відіграє складова про-

філю, пов'язана з електронними втратами.

Відомо, що деформація іонно-імплантованого шару пов'язана із зміщенням іонів матриці, які відбуваються за рахунок ядерних втрат [8]. Зміщення іонів

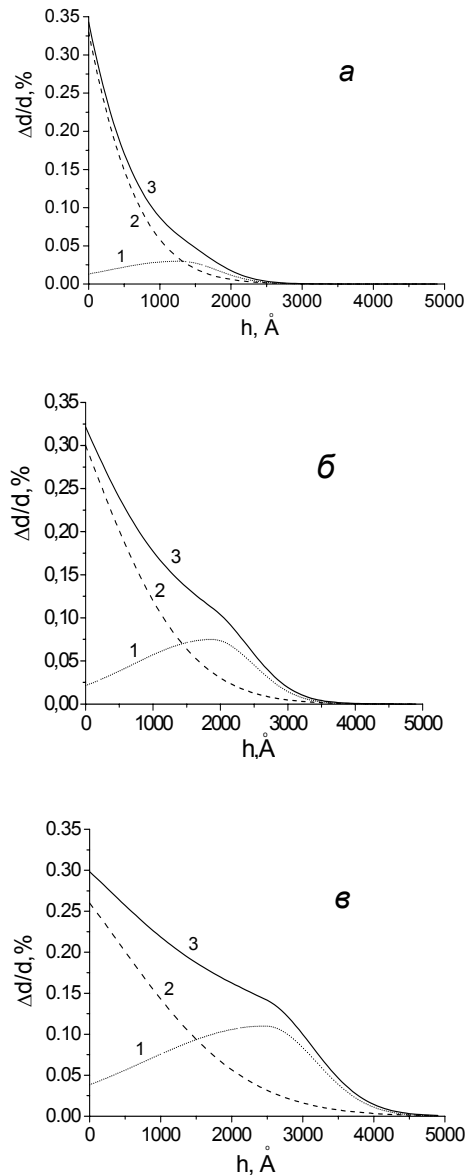


Рис. 1. Профілі відносної зміни міжплощинної відстані в приповерхневому шарі ПТГ, імплантованому іонами B^+ з енергією а – 80 кеВ, б – 110 кеВ, в – 150 кеВ та дозою $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (1, 2 – складові профілю, пов'язані з ядерними та електронними втратами відповідно, 3 – сумарний профіль).

матриці за рахунок електронних втрат можливе лише у випадку діелектриків [9]. Механізм даного процесу полягає в наступному: діелектрики характеризуються високою енергією іонізації, яка часто перевищує енергію, необхідну для зміщення іонів матриці. Крім того, оскільки позитивні іони, що утворюються в діелектрику, мають низьку рухливість і їх поле просторового заряду вдержують електрони, то виділена енергія локалізується в малому об'ємі біля треку іо-

на-імплантанта.

Із загального вигляду профілів відносної зміни міжплощинної відстані та його складових видно, що із зменшенням енергії імплантації вони зміщуються

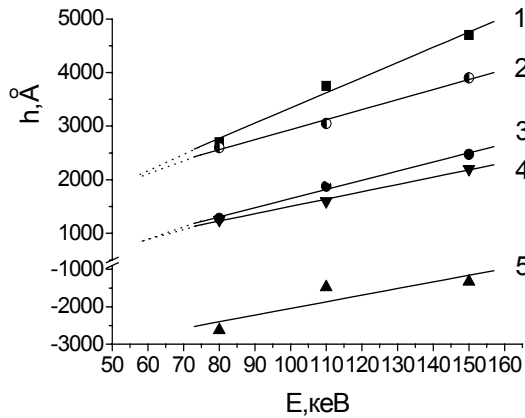


Рис. 2. Залежність максимальної глибини профілю відносної зміни міжплощинної відстані (1), положення максимуму його складової, пов'язаної з ядерними втратами (3), максимальної глибини змодельованого профілю зміщених за рахунок ядерних втрат іонів матриці (2) та положення його максимуму (4) і параметра R_p^E (5) в залежності від енергії імплантації.

до поверхні. Аналогічним чином поведуться і змодельовані за допомогою програми TRIM 2000 профілі імплантованих іонів та зміщених іонів матриці, що пов'язано із зменшенням проективного пробігу іонів імплантантів. При моделюванні процесу іонної імплантації значення енергії зв'язку та енергії зміщення атомів бралися згідно [10].

Графіки залежностей параметрів профілів від енергії показані на рис. 2. Зважаючи на те, що зміщення атомів за рахунок енергії, переданої в електронну підсистему в програмі TRIM 2000 не передбачено, проводилося порівняння профілів зміщених іонів матриці і складової профілю зміни міжплощинної, яка пов'язана із ядерними втратами. Як видно з рис. 2, найкраще співпадання положення максимумів профілю зміщених іонів матриці із максимумом профілю відносної зміни міжплощинної відстані спостерігається для енергії 80 кеВ. Така ж сама ситуація спостерігається і для максимальної глибини відповідних профілів. При зростанні енергії імплантації збільшується різниця між вказаними вище параметрами. Це означає, що між імплантованим шаром та досконалою частиною монокристалу утворюється пружно-деформований перехідний шар. Апроксимуючи в першому наближенні лінійно залежності параметрів профілю від енергії можна прогнозувати, що при енергії імплантації ~ 60 кеВ пружно деформований шар утворюватися не буде.

Характер зміни параметрів складових профілю відносної зміни міжплощинної відстані представлений на рис. 3. Із зменшенням енергії імплантації відносна деформація, пов'язана з ядерними втратами, зменшується, і при енергії ~ 60 кеВ різниця між мак-

симальною глибиною профілю відносної зміни міжплощинної відстані та максимальною глибиною змодельованого профілю зміщених за рахунок ядерних втрат іонів матриці близька до нуля.

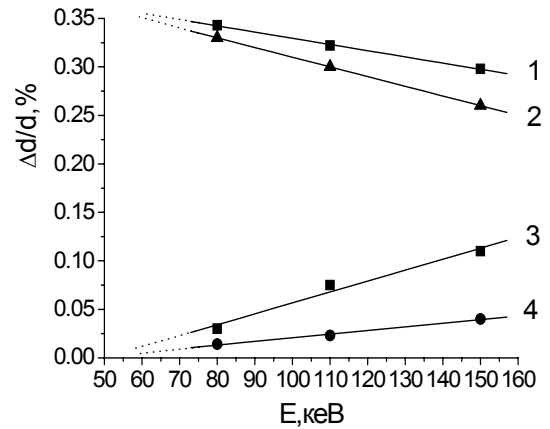


Рис. 3. Зміна максимальної відносної деформації сумарного профілю (1) і його складових D_{\max}^E і D_{\max}^A (2,3) та деформація на поверхні пов'язаної з ядерними втратами складової (4) в залежності від енергії імплантанта.

Згідно [6], утворення і ріст аморфної фази відбувається з набором дози в результаті накопичення радіаційних дефектів в глибині плівки. Щодо поверхневого шару, то він знаходиться в сильно дефектному, але все ж кристалічному стані. В нашому ж випадку дози досить малі і не приводять до суттєвого порушення кристалічної структури, а тим більше аморфізації, в тій частині порушеного шару, де спостерігається максимум ядерних втрат. Як показали наші попередні дослідження, при збільшенні дози імплантації в глибині плівки відбуватиметься накопичення радіаційних дефектів, в результаті чого деформація в середині порушеного шару інтенсивно зростатиме і профіль деформації, починаючи з деякої дози, з монотонного перетвориться на немонотонний.

IV. Основні результати та висновки

1. При імплантації іонами V^+ профіль відносної зміни міжплощинної відстані є суперпозицією двох профілів, один з яких пов'язаний з ядерними, а інший з електронними втратами.
2. Складові профілю, пов'язані з ядерними втратами, в загальних рисах співпадає із змодельованим профілем ядерних втрат і їх максимуми з ростом енергії імплантації зміщуються в глибину плівки.
3. Іонна імплантація дозою $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ в діапазоні енергій 80–150 кеВ зумовлює утворення монотонно-спадних профілів відносної зміни міжплощинної відстані з глибиною.
4. Між імплантованим шаром та досконалою частиною монокристалу утворюється пружно-деформований перехідний шар, товщина якого спадає із зменшенням енергії іонів-імплантантів, і при енергії ~ 60 кеВ він практично зникає.

Б.К. Остафійчук – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри матеріалознавства і новітніх технологій, проректор по науковій частині;

І.П. Яремій – аспірант кафедри матеріалознавства і новітніх технологій;

В.І. Кравець – кандидат фізико-математичних наук, доцент;

В.Д. Федорів – кандидат фізико-математичних наук, доцент;

Л.С. Яблонь – аспірант кафедри матеріалознавства і новітніх технологій

- [1] Б.К. Остафійчук, В.А. Олейник, В.М. Пыльпив и др. Кристаллическая и магнитная структура имплантированных слоев монокристаллических пленок железо-итриевого граната. Препринт // *АН УССР. Ин-т металлофизики, ИМФ*, **191**, К. 70 с. (1991).
- [2] Б.К. Остафійчук, В.М. Пилипів, В.І. Кравець. Моделювання структури приповерхневого шару епітаксійних плівок залізо-ітрієвого гранату, імплантованих іонами бору // *Вісник Прикарпатського університету. Математика. Фізика. Хімія.*, **1**, сс. 94-104 (1999).
- [3] Б.К. Остафійчук, І.П. Яремій, В.І. Кравець та ін. Про можливість однозначного визначення профілів зміни міжплощинної відстані в приповерхневих шарах монокристалів за даними двокристалльної рентгенівської дифрактометрії // *Фізика і хімія твердого тіла*, **3(1)**, сс. 148-153 (2002).
- [4] М.В. Ковальчук, В.Г. Кон, Э.Ф. Лобанович Измерение малых деформаций в тонких эпитаксиальных пленках кремния методом фотоэлектронной эмиссии, возбужденной стоячей рентгеновской волной // *ФТТ*, **27(11)**, сс. 3379-3387 (1985).
- [5] Б.К. Остафійчук, В.Д. Федорив, В.И. Кравец и др. Структура приповерхностного слоя феррит-гранатовой пленки, имплантированной ионами бора // *Металлофизика и новейшие технологии*, **17(2)**, сс. 67-72 (1995).
- [6] Б.К. Остафійчук, В.М. Ткачук, О.Н. Ворончак и др. О возможном механизме аморфизации поверхности феррит-гранатовых пленок вследствие ионной имплантации // *Металлофизика и новейшие технологии*, **16(8)**, сс. 51–54 (1994).
- [7] G. Balestrino, S. Lagomarsino. Reconstruction mechanisms in ion-implanted yttrium iron garnet films. // *J. Appl. Phys.*, **63(8)** (1988).
- [8] *Ионная имплантация* // Х. Риссел, И. Руге. – М: Наука, 320 с. (1983).
- [9] *Ионная имплантация и лучевая технология* / Под ред. Дж. С. Вильямса, Дж. М. Поута. – К: Наукова думка, 360 с. (1988).
- [10] Я.О. Довгый, В.И. Китык, А.О. Матковский и др. Квантовомеханический подход к образованию дефектных состояний в гадолиний-галлиевых гранатах // *ФТТ*, **34(4)**, сс. 1078- 1087 (1992).

В.К. Ostafiychuk, I.P. Yaremiy, V.I. Kravets, V.D. Fedoriv, L.S. Yablon

The Investigation of Structural Changes in GGG-monocrystal Modified by Boron of the Different Energies

*Physics-Chemical Institute at the Vasyl Stefanyk Prekarpathian University
Shevchenko str., 57, Ivano-Frankivsk, 76025, Ukraine*

The results of surface layers researches of GGG monocrystal implanted by boron at energies ranges 80-150 keV with dose 10^{14} ion/cm² are represented. It is shown, that at an implantation by boron ions the profile of interplanar distance modification for the given dose monotonically downward and can be presented as the total of two profiles, one of which is caused by kernel losses, and second electronic losses.