

УДК 621, 535.21

Кособуцький П.С., Данилов А.Б., Прокопчук О.Л.

ДУ “Львівська політехніка”, кафедра фізики

РОЗРАХУНОК ПРОФІЛІВ ПОКАЗНИКІВ ЗАЛОМЛЕННЯ НЕОДНОРІДНИХ ШАРІВ НА ПОВЕРХНІ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ КРИСТАЛІВ, ОПРОМІНЕНИХ ЛАЗЕРОМ

© Кособуцький П.С., Данилов А.Б., Прокопчук О.Л., 2000

Проаналізовано поверхневий шар монокристалів GaAs, опроміненіх лазерами інфрачервоного діапазону. Проаналізовано результати застосування різних моделей розрахунку параметрів плівки. На підставі проведеного аналізу визначено профіль показника заломлення та товщини поверхневих шарів.

Вступ

Неоднорідним шаром в еліпсометрії називають шар, оптичні характеристики якого змінюються із товщиною. Такі шари виникають внаслідок різних видів фізико-хімічного впливу на поверхню: механічної обробки, хімічного травлення, імплантації тощо. Їх утворення зумовлене відмінностями об'ємних та поверхневих властивостей матеріалів, градієнтними значеннями макропараметрів, що характеризують зовнішні впливи на досліджувану систему та іншими чинниками.

Еліпсометричні дослідження поверхні арсеніду галію та оксидної плівки на ній розпочались ще в 60-х роках [1]. Проте досі здебільшого під час визначення параметрів поверхневих шарів розглядали спрощені моделі без врахування неоднорідності шарів по поверхні та товщині, шорсткостей поверхонь та границь розділення середовищ.

Еліпсометричні дослідження неоднорідних шарів сьогодні розвиваються у двох напрямках. Обернену задачу для такого шару розв'язують або методом секціонування або математичним моделюванням неоднорідного шару (неруйнівний метод) [2, 3]. У першому випадку досліджувану систему ділять на частини і для кожної частини визначають поляризаційні кути. Причому система або синтезується від чистої підкладки пошарово, або так само пошарово стравлюється. Разом з очевидними перевагами щодо визначення кутів ψ та Δ цей підхід має і недоліки. Основні з них: вимога однорідності стравлених (синтезованих) шарів та неадекватність секціонованої та реальної систем. Цих недоліків можна позбутись, застосувавши неруйнівний метод аналізу неоднорідного поверхневого шару.

Експеримент

На еліпсометрі ЛЕФ-3М досліджували поверхню монокристалів арсеніду галію, опроміненіх лазерами ІЧ-діапазону. Як джерела лазерного випромінювання використовували CO₂ та YAG-Nd лазери. Густина потужності підбирали нижчою від порогів руйнування кристалів арсеніду галію. Кути падіння лазерного скануючого променя в еліпсометрі змінювались в межах від 60 до 77° через кожні два градуси. Поляризаційні кути визначали

за чотиризонним методом для ділянок поверхні в центрі області лазерної дії, на периферії та в неопроміненій області. Оскільки вимірювання виконувались в атмосферних умовах, то показник заломлення середовища $n_1=1$. Комплексний показник заломлення підкладки визначався до лазерного впливу з еліпсометричних вимірювань при різних кутах падіння і становив $N_2=3.88-0.21i$.

Внаслідок лазерної дії поверхні кристалів (як фронтальна, так і задня) оплавилась та потемніла. Зона видимих поверхневих змін мала неправильну форму та різні відтінки забарвлення, що вказує на неоднорідність поверхневого шару в радіальному напрямку.

Розрахунки та результати експерименту

Розрахунок профілю показника заломлення поверхневої плівки здійснювали за такою схемою:

1. Аналіз залежності показника заломлення від кута падіння для чистої підкладки, об'ємні значення оптичних констант якої визначали під час вимірювань.
2. Розв'язок прямої та оберненої задач еліпсометрії для системи: середовище – прозора однорідна плівка – підкладка.
3. Розв'язок прямої та оберненої задач еліпсометрії для системи: середовище – поглинаюча однорідна плівка – підкладка.
4. Розв'язок прямої та оберненої задач, для системи: середовище – неоднорідна плівка, що моделюється однорідними шарами – підкладка (а), та системи: середовище – неоднорідна плівка, яка моделюється неоднорідними шарами з відомими профілями показника заломлення – підкладка (б).
5. Порівняння отриманих результатів із експериментальними значеннями поляризаційних кутів при різних кутах падіння і визначення величин показника заломлення та товщини плівки шляхом мінімізації цільової функції помилок

$$Y = \sum_i \sqrt{(\psi_i^t - \psi_i^e)^2 + (\Delta_i^t - \Delta_i^e)^2 + (\text{Im } d_i)^2}, \quad (1)$$

де підсумовування виконується для різних кутів падіння, верхні індекси t та e позначають значення, розраховані теоретично та отримані під час вимірювань. В основне рівняння еліпсометрії

$$\rho = \text{tg } \psi e^{i\Delta} = \frac{R_p}{R_s}, \quad (2)$$

що встановлює зв'язок між експериментально виміряними параметрами ψ та Δ та оптичними характеристиками та товщинами поверхневих шарів, входять коефіцієнти відбиття, які для неоднорідного шару можна записати у вигляді двох доданків

$$R_{p,s} = R_{0p,s} + \delta R_{p,s}, \quad (3)$$

де перший доданок відповідає узагальненому коефіцієнтові Френеля для р- або s-поляризації при відбитті світла від чистої підкладки, а другий є поправкою, зумовленою поверхневим шаром. Записавши поправку для тонкого j-го шару завтовшки Δz_j на глибині z_j у вигляді

$$\delta R_{p,s} = -2ikA_{p,s}R_{0p,s}\Delta N_j z_j e^{-2ikN_2 z_j \cos \varphi_1}, \quad (4)$$

де $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, φ_1 – кут заломлення, і перейшовши до границі $\Delta z_j \rightarrow 0$ і відповідно від ΔN_j до $\Delta N(z)$ з врахуванням (2) отримуємо рівняння, що зв'язує поляризаційні параметри ψ та Δ з оптичними характеристиками неоднорідного шару

$$\rho = \rho_0(1 - 2ikA_0 \int_0^d \Delta N(z) e^{-2ikN_2 z \cos \varphi_1} dz), \quad (5)$$

де, ρ_0 – відношення коефіцієнтів відбиття для р- та s-компонент електричного вектора при відбитті світла від чистої підкладки, $\Delta N(z)$ – відхилення значення показника заломлення в поверхневому шарі на глибині z від значення в об'ємі, d – товщина неоднорідного шару,

$$A_0 = A_p - A_s = \frac{2N_2 n_1 \sin^2 \varphi_0 \cos \varphi_0}{N_2^2 \cos^2 \varphi_0 - n_1^2 \sin^2 \varphi_0}, \quad (6)$$

n_1 – показник заломлення середовища, φ_0 – кут падіння світла. Ввівши позначення

$$E = \operatorname{Re}\left(\frac{\operatorname{tg} \psi}{\operatorname{tg} \psi_0} e^{i(\Delta - \Delta_0)} - 1\right) \quad D = \operatorname{Im}\left(\frac{\operatorname{tg} \psi}{\operatorname{tg} \psi_0} \sin(\Delta_0 - \Delta)\right), \quad (7)$$

отримуємо вирази для поляризаційних кутів

$$\Delta = \Delta_0 - \operatorname{arctg} \frac{D}{E + 1} \quad \psi = \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{tg} \psi_0 D}{\sin(\Delta_0 - \Delta)} \right). \quad (8)$$

Задаючи різний тип модельного профілю, а в нашому випадку використаний однорідний, лінійний, експоненціальний, логарифмічний та з екстремумом всередині профілю, визначали кути ψ та Δ . Для однорідного профілю $\Delta N = \pm(N_2 - N_1)$, для лінійного $\Delta N = \pm(N_2 - N_1)(1 - z/d)$, для експоненціального $\Delta N = \pm(N_2 - N_1) \exp(-\frac{bz}{d})$, логарифмічного $\Delta N = \pm(N_2 - N_1) \ln(\frac{bz}{d})$, екстремального $\Delta N = \pm(N_2 - N_1) \frac{z}{d} \exp(-\frac{bz}{d})$, де N_1 – показник заломлення шару на глибині z , b – числовий коефіцієнт, що визначає вигляд профілю. Оскільки кожен профіль має власну залежність еліпсометричних кутів від кута падіння, показника заломлення, товщини, то максимальний збіг експериментальних та теоретичних результатів забезпечували комбінуванням різних типів профілів і контролювали мінімізацією значення функції помилок. Наведені формули справедливі і у випадку, коли кількість неоднорідних шарів є більшою. Тоді величина $N_2 + \Delta N(d)$ відіграє роль комплексного показника заломлення підкладки для другого шару.

У загальному випадку для j середовищ узагальнені коефіцієнти відбиття визначають за формулою Скендона–Балеріні [2, 3]

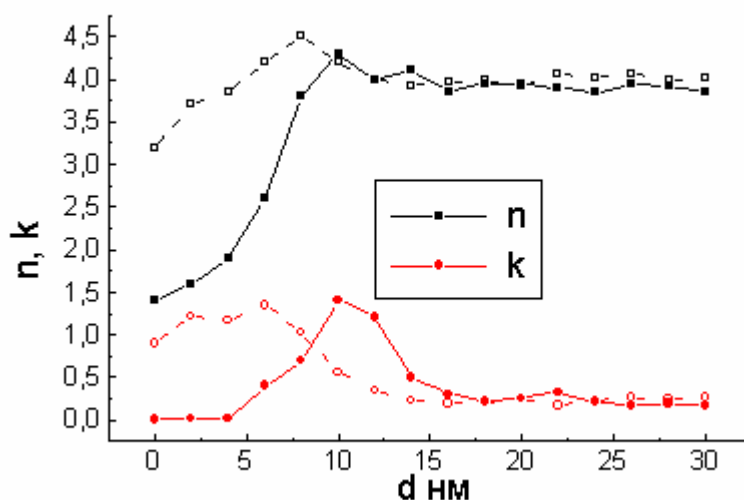
$$R_{j,0} = \frac{r_{j+1,j} + R_{j-1,0} e^{-2i\delta_j}}{1 + r_{j+1,j} R_{j-1,0} e^{-2i\delta_j}}, \quad (9)$$

де $\delta_j = (2\pi/\lambda)N_j d_j \cos \varphi_j$, $r_{j+1,j}$ – коефіцієнт Френеля для границі розділу $j+1$ та j -го середовищ.

Вимірювання та розрахунки показали, що в неопроміненій області та на периферії зони лазерної дії на поверхні напівпровідника присутня оксидна плівка завтовшки декілька нанометрів, що не є суцільною (особливо в неопроміненій зоні). Експериментальні дані, зняті в цій області, добре узгоджуються із розрахунками за методом Холмса [4] для однорідних прозорих плівок.

У центральній області лазерної дії експериментальні дані значно відрізняються від розрахованих для перших трьох систем. Тому для визначення значення оптичних сталих та товщин плівки моделювався розв'язок для системи: неоднорідна плівка на однорідній підкладці. Зміною значень комплексного показника заломлення плівки N_1 та товщин шарів d при застосуванні різних типів модельних профілів $\Delta N(d)$ підбирали значення, які дозволяли отримати мінімальну функцію помилок.

Результати розрахунків для кристалів, опромінених упродовж 10 хв при допорогових потужностях CO_2 лазером неперервної дії та імпульсним лазером ГОС 1001, зображено на рисунку.



Профілі показника заломлення та коефіцієнта поглинання для кристалів, опромінених CO_2 лазером неперервної дії (суцільні лінії та символи) та імпульсним лазером ГОС 1001 (переривчасті лінії та порожні символи).

Обговорення результатів

На поверхні кристалів, опромінених CO_2 лазером згідно з отриманими результатами утворилась плівка, показник заломлення якої майже монотонно зростає від 1.4, що відповідає показнику заломлення сесквіоксиду галію, до 4.2, приймаючи максимальне значення при товщині близько 100 Å. Профіль коефіцієнта поглинання проходить через максимум при тих же товщинах. Отримана залежність дає певні підстави твердити, що внаслідок дії CO_2 лазера поверхня напівпровідникового кристала металізується, далі відбувається взаємодія атомів металу з атмосферним киснем і утворюється окисна плівка, яка відзначається неоднорідністю як по поверхні, так і по товщині. Очевидно, високі значення оптичних сталих на товщині ~ 100 Å зумовлені тим, що реакція окислення мала місце на границі розділення середовище – плівка, а перебіг такої ж реакції на границі плівка – підкладка лімітувався швидкістю переносу кисню через утворену плівку. Тому в цій області включення металевої компоненти в окисну плівку є особливо сильними і поглинання високим. На товщині 150 Å оптичні константи плівки починають дорівнювати оптичним константам підкладки.

Згідно з отриманими результатами, поверхня кристалів, що зазнали впливу імпульсного лазера модифікувалася на товщину до 90 Å. Високі значення n та k поверхневого шару

можуть свідчити про утворення внаслідок імпульсної лазерної дії композитної плівки, в склад якої входять власні оксиди, галій та арсенід галію. Вміст оксидів у цій плівці стає незначним уже на глибині ~ 20 Å. Опромінення спричиняє швидке нагрівання і розклад бінарного напівпровідника. При цьому, продукти реакції не встигають окислитись. На товщині 100 Å оптичні константи плівки починають дорівнювати оптичним сталим підкладки. Треба зауважити, що при імпульсній лазерній дії більш імовірним є утворення різкої границі розділення: підкладка – поверхнева плівка. Тому, незважаючи на мінімальне значення функції помилки необхідні додаткові незалежні вимірювання, що могли б підтвердити доцільність застосування моделі неоднорідного шару.

[1] Zaininger K.H., Revecz A.G. Ellipsometric investigations of oxide on GaAs // J. de Physique. 1964. 25. P.208.

[2] Пшеницын В.И., Абаев М.И., Лызлов Н.Ю. Эллипсометрия в физико-химических исследованиях. Л., 1986.

[3] Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М., 1981.

[4] Горшков М.М. Эллипсометрия. М., 1974.

УДК 535.36

Микитюк З.М., Сушинський О.Є., Черпак В.В., Іваницький В.Г.

ДУ “Львівська політехніка”, кафедра електронних приладів

РОЗСІЮВАННЯ СВІТЛА НА КОНФОКАЛЬНИХ ДОМЕНАХ В ІНДУКОВАНИХ ХОЛЕСТЕРИКАХ

Микитюк З.М., Сушинський О.Є., Черпак В.В., Іваницький В.Г., 2000

Досліджено розсіювання світла на конфокальних доменах індукованих холестериків під час холестерико-нематичного переходу. Представлена фізична модель зразка індукованого холестерика при накладанні електричного поля. Показано характер зміни доменної структури та вплив розмірів доменів на інтенсивність розсіювання. Експериментальні результати добре узгоджуються з математичною моделлю на основі теорії Релея-Ганса.

The light scattering on confocal domains of induced cholesterics in process of cholestreric-nematic transition was investigated. The physical model of induced cholesterics under the action of electric field was proposed. The transformations of domain structure and influence of domain size on scattering intensity was shown. The experimental results are in a good agreement with mathematical model based on theory Reley-Gans.