

УДК 539.218

А.П. Оксанич, к.т.н., проф.
Кременецький інститут економіки та нових технологій

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ЩІЛЬНОСТІ ДИСЛОКАЦІЙ У КРЕМНІЄВИХ ЕПІТАКСІЙНИХ СТРУКТУРАХ

Розглянутий метод і апаратура контролю середньої щільності дислокацій на площі структури поляризаційно-оптичним методом. Оцінювання середнього значення параметра здійснюється за допомогою моделі розподілу, що запропонована уперше.

1. Вступ

Напівпровідникові пластини з інтегральними структурами в конструктивному відношенні являють собою багатошарові системи, які складаються з підложки і різного роду шарів, що істотно відрізняються один від одного своїми фізико-механічними характеристиками. Необхідно виділити такі характерні шари: напівпровідникові; леговані дифузією або іонним упродовженням; напівпровідникові епітаксійні; діелектричні; захисні. Структурна досконалість перерахованих шарів, їхні фізико-механічні характеристики залежать від застосованих матеріалів, методів та режимів утворення шарів і видів наступних обробок.

Структурні недосконалості напівпровідникових кристалів, що виділяються у вигляді розподілу напружень і деформацій у пластинах з інтегральними структурами, залежать від сукупності конструктивних та технологічних факторів. Розподіл внутрішніх напружень у багатошаровій системі, що являє собою пластину з інтегральними структурами, має суцільний характер і при перевищенні деяких параметрів призводить до руйнування напівпровідникових приладів.

Теорія [1] припускає, що в напівпровідниках обов'язково існують мікротріщини, які є концентраторами напружень. Вони викликають збільшення рівнів однорідних макронапружень σ_1 і σ_2 у навколишніх локальних об'ємах. Початкові мікротріщини зароджуються в місцях скопчення дислокацій, поблизу внутрішніх та поверхневих дефектів (структурних недосконалостей).

Результатом великого скопчення структурних дефектів стають поля статичних внутрішніх напружень, у кожному з яких є визначене число мікродефектів. Сукупність цих полів призводить до інтенсивного розвитку механічних порушень у локальних областях поблизу концентраторів напружень. У результаті в приповерхневому шарі кристала, шарах діелектриків, електропровідних і захисних шарах розвиваються мікротріщини, що призводять до катастрофічних відмов напівпровідникових структур. У ряді випадків, високі внутрішні напруження призводять до катастрофічного крихкого руйнування матеріалу. Для оцінки ступеня небезпеки напружено-деформаційних станів у пластинах і кристалах напівпровідників необхідно мати локальні, які не руйнують структуру, методи контролю структурних недосконалостей. Цим методам, підвищенню їхньої точності і присвячена дана стаття.

2. Обґрунтування запропонованого методу контролю середньої щільності дислокацій

Сутність методу вимірів полягає в наявності зв'язку між щільністю дислокації N_d і різницею головних напружень $\sigma = \sigma_1 - \sigma_2$ в обмеженій області напівпровідникової структури. В основі методу виміру різниці головних напружень лежить метод фотопружності. Основою інформації у фотопружності є інтерференційна картина, яка описується відповідними рівняннями інтенсивності світла. Інтерференційну картину можна реєструвати різними методами, а в ряді випадків і спостерігати візуально. Основи методу описані в літературі [1, 2, 3, 4] і тут не розглядаються. Найбільше поширення отримав фотоелектричний метод реєстрації як найбільш точний, універсальний та об'єктивний. Фотоелектричні поляризаційно-оптичні установки можуть бути розділені на два принципово різних типи:

1. Ті що використовують інформацію, яка міститься в інтенсивності світла. У цьому випадку світлова характеристика фотоприймача є робочою і повинна бути лінійною та стабільною. Ті ж вимоги пред'являються і до підсилювального тракту.

2. Ті що використовують інформацію, яка міститься в інтенсивності світла. У цьому випадку фотоприймач разом з підсилювальним трактом використовується тільки як нуль-індикатор. Основна вимога до фотоприймача та підсилювального тракту – висока чутливість.

Із зазначених причин другий тип поляризаційно-оптичних установок забезпечує більш високу точність вимірів. Установка подібного типу була розроблена автором для контролю середньої щільності дислокації в кремнієвих одношарових епітаксійних структурах.

Оснoву установки складає схрещений плоский полярископ (рис. 1), який складається з джерела випромінювання (напівпровідниковий лазер) із довжиною хвилі $\lambda = 1,3$ мкм, поляризатора (2) і аналізатора (3). Перед аналізатором встановлено кварцовий компенсатор (4). Досліджувана пластина встановлюється між поляризатором і компенсатором. У відсутності оптичної різниці ходу, внесеної компенсатором, інтенсивність світла падаючого на фотоприймач (6) складає:

$$I_+ = I_0 \sin^2 2\beta \sin^2 Cd \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2\lambda}, \quad (1)$$

де $C = 1,69$ см²/кГ – коефіцієнт, що характеризує чутливість кремнію до внутрішніх напружень;

d – товщина пластини;

β – кут між напрямком одного з напружень і напрямком поляризації випромінювання після поляризатора.

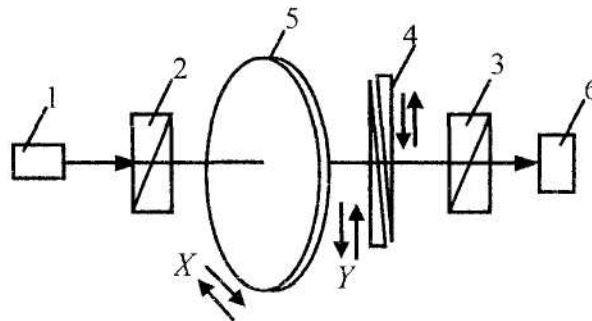


Рис. 1. Схема розташування елементів установки

Поворотом оптичних вузлів установки навколо оптичної осі до одержання максимальної інтенсивності світла за аналізатором досягається $\beta = \pi/4$. У цьому випадку (1) зводиться до:

$$I_+ = I_0 \sin^2 Cd \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2\lambda}. \quad (2)$$

Далі включається електропровід компенсатора, і відбувається компенсація двопронепереломлення, яке наведене різницею головних напружень відповідно до (2). Точній компенсації відповідає мінімальна інтенсивність світла за аналізатором. Інформація про вимірювану величину двопронепереломлення знімається з багатооборотного резистора, механічно сполученого з приводом компенсатора. Найявніший гострий мінімум синус-квадратної функції (2), з одного боку дозволяє одержати високу точність вимірів, а з іншого – вимагає високої чутливості фотоприймача та електронних вузлів.

Для узгодження широкого динамічного діапазону електричних сигналів із виходу фотоприймача з можливостями АЦП обмеженої розрядності (12 біт) застосовано підсилювач, що логарифмує сигнали обох полярностей.

Інформація про інтенсивність світла за аналізатором у вигляді коду надходить в ЕОМ, де піддається подальшій обробці. ЕОМ керує приводами компенсатора, поворотом оптики навколо оптичної осі та скануючого пристрою. Інформація про наведене двопронепереломлення в ЕОМ поступає у вигляді коду, пропорційного куту повороту привода компенсатора.

Аналіз великої кількості експериментальних даних за радіальним розподілом параметрів напівпровідникових матеріалів, вирощених в осесиметричних умовах, таких як час життя неосновних носіїв заряду, щільність дислокацій тощо, дозволив розробити аналітичну модель радіального розподілу параметрів, що являє собою суперпозицію детермінованої та випадкової складової.

При експериментальних дослідженнях, коли стоїть завдання найбільш точного визначення середнього значення параметра за площею епітаксійної структури, звичайно проводять максимально можливу кількість вимірів у перерізі (так зване суцільне сканування або «поле до поля»). Середнє значення параметра визначають як середнє арифметичне за результатами вимірів:

$$\bar{Z} = \left(\sum_i^n Z_i \right) / n,$$

де \bar{Z} – середнє значення параметра, яке прийняте за істинне; Z_i – результат одиничного виміру параметра; n – кількість вимірів.

Очевидно, що даний експеримент (сканування) можна здійснювати за будь-яким планом, який передбачає охоплення всієї площі перерізу. Це можуть бути вимірювання на доріжках, що розташовані паралельно одному з діаметрів перетину, або виміру за концентричними колами (кільцями), які щільно прилягають одне до одного. В останньому випадку можна визначити середнє значення параметра на кожному концентричному колі:

$$\bar{Z}_j = \left(\sum_{i=1}^n Z_{ij} \right) / n, \tag{3}$$

де \bar{Z}_j – середнє значення параметра на j -тому концентричному колі; Z_{ij} – i -тий вимір на j -тому концентричному колі; n – кількість вимірів на j -тому концентричному колі.

Середнє значення параметра \bar{Z} можна визначити як середнє арифметичне із середніх значень за колами, які помножені на коефіцієнт k_j , пропорційний довжині j -того кола (площі кільця):

$$\bar{Z} = \left(\sum_{j=1}^m Z_j k_j \right) / m,$$

де m – кількість концентричних кіл (кільць).

Очевидно, що вираз (3) дає не що інше, як значення детермінованої складової розподілу параметра на даному колі. Звідси видно, що величина випадкової складової розподілу параметра істотно не впливає на оцінку середнього за перерізом значення параметра. Таким чином, розв'язання задачі пошуку середнього значення параметра, максимально наближеного до істинного середнього, можна здійснити, виходячи з аналізу тільки детермінованої складової.

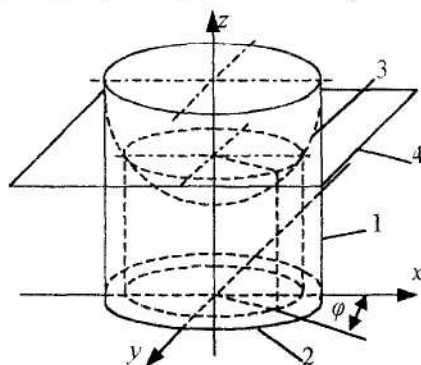


Рис. 2. Тривимірний модель V-образного радіального розподілу параметра, де ϕ, r – полярні координати точки на зразку, Z – значення параметра в даній точці; 1 – циліндричне тіло; 2 – основа циліндричного тіла (розглянутий перетин монокристалічного злитка); 3 – поверхня обертання; 4 – січна площина

Для прикладу розглянемо V-образну криву розподілу (рис. 2). Геометричним місцем точок значень параметра в перетині кристала, який перпендикулярний осі вирощування, є поверхня, утворена обертанням кривої розподілу навколо осі, що проходить через центр симетрії та є віссю симетрії.

У даному випадку мається на увазі параболоїд обертання четвертого ступеня, який у циліндричних координатах описується виразом:

$$Z = ar^2 + br^4 + c. \tag{4}$$

При цьому, Z – апліката крапки поверхні, $0 < r < 1$ і $0 < \phi < 2\pi$ – полярні координати проекції даної точки на площину перетину (рис. 2).

Сукупність усіх значень параметра на зразку являє собою об'єм вертикального циліндричного тіла 1, побудованого на основі 2, що є досліджуваним перетином кристала, і обмеженого зверху описаною вище поверхнею обертання 3.

Очевидно, що за середнє значення параметра варто взяти висоту прямокутного циліндра, що стоїть на тій же основі 2 з обсягом розглянутого циліндричного тіла:

$$\bar{Z} = \left(\int_0^{2\pi} \int_0^1 rZ(r, \varphi) dr d\varphi \right) / (\pi r^2) = \left(2\pi \int_0^1 r(ar^2 + br^4 + c) dr \right) / (\pi r^2) = (1/2)a + (1/3)b + c. \quad (5)$$

Вираз (5) правильний для будь-яких знаків a і b , тобто визначає середнє значення для будь-якої детермінованої складової із запропонованої формули (4). Отже, при відомих коефіцієнтах апроксимації визначення середнього значення параметра не викликає ніяких складностей. Необхідно зазначити, що і визначення самих коефіцієнтів не є складною задачею, тому що значення параметра в центрі: $Z_{r=0} = c$, а значення параметра на краю: $Z_{r=1} = a + b + c$.

Для розв'язання даної системи досить знати ще одне проміжне значення параметра. З виразу (5) можна вирахувати істинне середнє значення параметра, однак для забезпечення промислового контролю якості матеріалу такий підхід не годиться, тому що коефіцієнти a , b і c заздалегідь не відомі і можуть змінюватися від зразка до зразка, а визначення їх у процесі контролю – неперспективне.

З іншого боку, вираз $Z = \bar{Z}$ в геометричній моделі являє собою площина 4 (рис. 2), яка перпендикулярна осі обертання. Перетинання цієї площини з поверхнею обертання являє собою коло, радіус якого можна визначити, розв'язавши рівняння (4) щодо виразу (5), звідки:

$$r_2 = \sqrt{\left(-a \pm \sqrt{a^2 + 2ab + 1.333b^2} \right) / 2b} = \sqrt{\left(-K \pm \sqrt{K^2 + 2K + 1.333} \right) / 2}, \quad (6)$$

де a/b – коефіцієнт, який визначає крутизну кривої розподілу.

Як бачимо, радіус кола, на якому знаходиться середнє значення, не залежить від вільного члена c та коефіцієнтів a і b , а залежить тільки від їхнього співвідношення. У даному випадку для V і A -подібних кривих розв'язання (4) – єдине; причому при зміні коефіцієнта K від 0 до ∞ (при $b = 0$) значення r_2 змінюється від 0,76 до 0,71 радіуса.

У практиці випадки крайніх значень коефіцієнтів ($a = 0$ чи $b = 0$) також дуже рідкісні. Таким чином, можна зробити висновок, що для зразків діаметром 100 мм коло, що відповідає середньому значенню параметра, знаходиться на відстані $36,65 \pm 1,25$ мм від центру.

Відстань, на якій знаходиться середнє значення параметра, мало залежить від крутизни кривої розподілу. Таким чином, немає необхідності визначати значення коефіцієнта K , а варто проводити вимірювання в одній точці, а при наявності випадкової складової в розподілі параметра – на одному колі, що знаходиться на відстані 0,71– 0,76 R від центру.

Запропонована геометрична модель розподілу параметра дає можливість вирахувати систематичну похибку для будь-якої обраної оцінки, що характеризує середнє значення параметра. Так, вимір в одній точці у середині зазначеного інтервалу дасть значення параметра:

$$\bar{Z} = 0,5476a + 0,3b + c.$$

Якщо дане значення брати за середнє значення параметра, то абсолютна систематична похибка оцінки середнього буде дорівнювати:

$$\Delta Z_{abc} = Z - \bar{Z} = 0,5476a + 0,36 + c - (0,5a + 0,333b + c) = 0,016a - 0,033b,$$

а відносна систематична похибка:

$$\Delta Z_{\text{отн}} = \Delta Z_{abc} / Z = (0,0476a - 0,0333b) / (0,5a + 0,333b + c). \quad (7)$$

Вираз (7) незручний для аналізу, тому що в нього входять абсолютні значення розмірних коефіцієнтів, тому скористаємося наступними міркуваннями та перетвореннями.

Співвідношення значень параметра при $r = 0$ і $r = 1$ для розглянутих кривих є показником неоднорідності такого параметра. Однією з розповсюджених оцінок неоднорідності є оцінка:

$$(Z_{\max} - Z_{\min}) / (Z_{\max} + Z_{\min}) \leq \Delta,$$

де Z_{\max} , Z_{\min} – відповідно максимальне та мінімальне значення параметра на зразку; Δ – припустиме значення неоднорідності, яке приводиться в технічних вимогах до матеріалу.

Відповідно до розглянутої моделі для випадку, наприклад, V -подібної кривої розподілу, маємо:

$$(Z_{\max} - Z_{\min}) / (Z_{\max} + Z_{\min}) = (a + b) / (a + b + 2c) \leq \Delta.$$

Звідси:

$$c \geq 0,5[(1/\Delta) - 1](a + b) = q(a + b), \quad (8)$$

де $q = 0,5[(1/\Delta)]$.

Підставивши вираз (8) у вираз (7) і розділивши чисельник і знаменник на b , отримаємо:

$$\Delta Z_{\text{отн}} = \frac{0,0476K - 0,033}{0,5K + 0,333 + q(K + 1)}. \quad (9)$$

Із виразу (9) видно, що систематична погрішність даної оцінки залежить від крутизни кривої розподілу та від його неоднорідності. При $\Delta = 0,5$ (50 %) і $q = 0,5$ похибка складає від 4 % до 4,7 %, причому при $K_0 = 1$, тобто при досить ймовірному виді розподілу вона становить не більше 1 %.

3. Визначення середньої щільності дислокації за допомогою моделі розподілу параметра

Вимірювання різниці головних напружень проводиться в 24 областях, рівномірно розташованих на колі зазначеного радіуса, і знаходилося середнє значення $\bar{\sigma}$:

$$\bar{\sigma} = \sum_{i=1}^{3-1} \sigma_i. \quad (10)$$

Залежність

$$\bar{N}_d = f(\sigma) \quad (11)$$

визначалася експериментально за допомогою регресивного аналізу. При цьому значення \bar{N}_d визначалася за допомогою мікроскопа підрахунком числа ямок травлення. Отримана залежність описується співвідношенням:

$$\bar{N}_d = K\bar{\sigma}, \quad (12)$$

де $K = 6,04 \text{ кГ}^{-1}$.

При цьому поріг чутливості установки за щільністю дислокації складає величину, меншу за 1 см^{-2} , а похибка визначення \bar{N}_d у діапазоні від 10^2 до $5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$ не перевищує ± 20 %. Це дозволяє ефективно використовувати дану методику для контролю якості малодислокаційних структур. Основною перевагою методу є його неруйнуючий характер, що дозволяє організувати суцільний 100 %-й контроль епітаксійних структур.

4. Висновок

Розглянуто схему поляризаційно-оптичної установки, що дозволяє здійснювати неруйнуючий контроль як різниці головних напружень, так і середньої щільності дислокації в кремнієвих епітаксійних структурах. Неруйнуючий характер вимірів дозволяє здійснювати 100 %-й контроль на різних етапах технологічного процесу виробництва напівпровідникових приладів. Експериментально встановлена залежність між середнім значенням різниці головних напружень та середньою щільністю дислокації. Застосування як датчика внутрішніх напружень полярископа в режимі нуль-індикатора дозволило знизити поріг чутливості на середній щільності дислокації – до менш ніж 1 см^{-2} .

ЛІТЕРАТУРА:

1. Мильвидский М.Г., Освенский Б.В. Структурные дефекты в монокристаллах полупроводников. – М.: Металлургия, 1984. – 256 с.
2. Дюрелли А., Райли У. Введение в фотомеханику. – М.: Мир, 1970.
3. Под общ. ред. Стрельчука Н.А. и Хесина Г.Л. Метод фотоупругости. В трех томах. Т. 2. – М.: Стройиздат, 1975.
4. Оксанич А.П., Вдовиченко Н.Д. Метод контроля искусственной оптической анизотропии в полупроводниковых материалах с различной кристаллографической ориентацией. – М.: Эл. техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. Вып. 3. – 1988. – С. 194.
5. Генкина Р.И., Холодный Л.П. Метрология. – 1984. – № 4. – С. 58–63.

ОКСАНИЧ Анатолій Петрович – кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри “Комп’ютеризовані системи автоматики” Кременчуцького інституту економіки та нових технологій.

Наукові інтереси:

- метрологія та вимірювання;
- твердотільна електроніка.

Тел. 3-62-95

E-mail: ksa@ient.poltava.ua