

ЗМІСТ

Вступ	6
Розділ 1. Особливості морфології та структури кристалів CdTe, HgTe, CdHgTe	11
1.1. Спайність. Фрактографічні дослідження.....	11
1.2. Нестехіометрія і природа іншої фази.....	15
1.3. Двійникування в монокристалах	23
1.4. Межа подрібнення кристалів $A^{II}B^{VI}$ та $A^{III}B^V$	38
Розділ 2. Фізичні закономірності пластичного деформування одноосьовим стискуванням і згинанням	44
2.1. Випробування одноосьовим стисненням.....	44
2.2. Випробування згинанням	59
2.3. Природа “зуба” плинності і пластичної плинності.....	68
2.4. Геометрія ковзання і структурні дослідження деформованих кристалів.....	72
2.5. Релаксація механічних напружень.....	84
2.6. Вплив деформації на фізичні властивості кристалів	92
Розділ 3. Дослідження фізико-механічних властивостей методом мікротвердості	104
3.1. Анізотропія мікротвердості	104
3.2. Залежність мікротвердості від складу і концентрації домішок	114
3.3. Температурні залежності мікротвердості	122
3.4. Закономірності повзучості в процесі мікроіндентування.....	125
3.5. Крихка міцність	132
3.6. Про можливість методу неперервної ресстрації діаграм заглиблення індентора (метод кінетичної мікротвердості)	145
3.7. Визначення модуля Юнга.....	146
3.8. Втрати гістерезису і ефект Баушінгера в процесі індентування.....	155
3.9. Фізична модель масштабного ефекту в процесі індентування.....	158

Розділ 4. Термоактиваційний аналіз процесу пластичного деформування	164
4.1. Метод релаксації напружень у процесі одноосового стискування	173
4.2. Визначення термоактиваційних параметрів методом ступінчастої зміни температури і швидкості деформування.....	181
4.3. Енергія активації повзучості.....	186
4.4. Визначення термоактиваційних параметрів за методикою Трефілова–Мільмана.....	188
4.5. Визначення активаційного об'єму методом кінетичної мікротвердості.....	191
4.6. Швидкість дислокацій і механізми пластичної деформації.....	194
Розділ 5. Вплив зовнішніх чинників на фізико-механічні властивості	207
5.1. Вплив середовища на мікротвердість і повзучість у процесі інденування	207
5.2. Ефект поверхневої фотопластифікації.....	216
5.3. Фотопластичний ефект	219
Розділ 6. Протяжні дефекти і напруження в епітаксійних плівках і гетероструктурах	229
6.1. Пружні властивості і дефекти гетероструктур CdHgTe/CdTe.....	229
6.2. Пружні характеристики межі розділу виділення телуру/матриця в кристалах CdTe, HgTe, CdHgTe і гетеросистемах на їх основі.....	240
6.3. Вплив виділень Hg і Te на механічні властивості кристалів CdTe, HgTe, Cd _x Hg _{1-x} Te і гетероструктур на їх основі.....	246
6.4. Гетероструктури CdHgTe/(Si, GaAs), отримані методом молекулярно-променевої епітаксії: структура, напруження.....	251
6.5. Перехідні шари в гетероструктурах на основі CdHgTe.....	260
6.6. Двійниковання в епітаксійних плівках	277
6.7. Дефекти кристалічної структури тонких плівок CdHgTe, вирощених методом імпульсного лазерного осадження.....	285
6.8. Зміни морфології і структури мішеней у процесі лазерного імпульсного осадження тонких плівок CdHgTe	291
6.9. Вплив режимів післяростового охолодження на структуру і властивості плівок CdHgTe	297
Список літератури	306

Список скорочень

АО – анодний оксид

ДЕВЕВ – дифракція електронів високих енергій на відбиття

ДЕВЕП – дифракція електронів високих енергій на проходження

ЕП – епітаксійна плівка

ізоПФЕ – ізотермічна парофазна епітаксія

ЛЮ – імпульсне лазерне осадження

МОС – парофазне хімічне осадження з металоорганічних сполук

МПЕ – молекулярно-променева епітаксія

РЕМ – растрова електронна мікроскопія

РФЕ – рідинно-фазова епітаксія

ПЕМ – провітлювальна електронна мікроскопія

ТКЛР – термічний коефіцієнт лінійного розширення

ФП – фотопровідність

ФМЕ – фотомеханічний ефект

ФПЕ – фотопластичний ефект

ЕВІС (англ.) (Electron Beam-Induced Current) – струм, наведений електронним пучком (СЕМ в ЕВІС-режимі)

ВСТУП

Монографію присвячено важливим у практичному аспекті напівпровідниковим сполукам $A^{II}B^{VI}$ – телуридам кадмію, ртуті і цинку, а також твердим розчинам кадмій–ртуть–телур.

Найбільш широке застосування зазначені матеріали знайшли в оптоелектроніці, елементну базу якої становлять приймачі і джерела випромінювання, модулятори, хвилеводи, лазерні вікна тощо. Унаслідок вдалого поєднання низки параметрів CdTe, наприклад, став вельми перспективним матеріалом для створення сонячних батарей. Крім того, його використовують в акусто- і електрооптичних модуляторах інфрачервоного випромінювання, які, своєю чергою, застосовують у лазерній техніці, для створення високо-ефективних спектрометрів гамма-квантів, здатних працювати за кімнатних температур. Детектори ядерного випромінювання знайшли широке застосування в геології, медицині, металургії, атомній промисловості, освоєнні космічного простору та інших галузях. Слід зазначити перспективність CdTe для створення генераторів Ганна, елементів пам'яті, а також використання в апаратурі теплопеленгації.

На цей час увагу вчених та інженерів привертають напівпровідники з вузькими забороненими зонами, зокрема безщілинні напівпровідники, які виділено в окремий клас речовин. Чутливі до легування, температури, а також дії випромінювань, тиску, магнітного і електричного полів, вони проявляють типові напівпровідникові властивості ще більшою мірою, ніж такі класичні напівпровідники, як германій і кремній.

Особливу увагу приділяють застосуванню вузькощілинних напівпровідників для створення ГЧ-приймачів пасивного отримання

зображення, а також діодних лазерів для спектроскопії високої роздільної здатності, зокрема для контролю за забрудненнями повітря та захисту довкілля.

Іншою сферою застосування вузькощілинних напівпровідників є перетворення теплової енергії на електричну в пристроях термоелектричного, термомагнітного охолодження тощо.

Перспективним матеріалом для виготовлення плівкових давачів є HgTe. Перевагою давачів Холла і магніторезисторів, в яких використовується принцип зміни опору в магнітному полі, є їх швидкодія, малі габарити і відсутність рухомих частин.

Магніторезистори з вузькощілинного напівпровідника $Cd_{0,1}Hg_{0,9}Te$ не тільки не поступаються, але і за деякими параметрами перевершують кращі прилади на основі InSb.

Серед вузькощілинних напівпровідників особливо вирізняються тверді розчини $Cd_xHg_{1-x}Te$, в яких можна плавно регулювати ширину забороненої зони. Фотоприймачі на основі цього матеріалу вже зайняли домінуюче положення в тепловізійній техніці, системах лазерної локації у зв'язку з використанням CO_2 -лазерів. Розроблено приймачі для діапазону спектра 3–8 мкм, що працюють за температури 200 К з термоелектричним охолодженням. Починаючи з 80-х років, було створено різну оптикоелектронну апаратуру для роботи у “вікні прозорості” земної атмосфери 8–14 мкм.

Монокристали цієї сполуки – матеріал, придатний для створення фотоприймачів лазерного випромінювання у зв'язку з можливістю регулювати склад і тим самим змінювати максимум спектральної чутливості під необхідну довжину хвилі лазера. У одно- і малоелементних приймачах досягнуто теоретичної межі виявлюваної здатності. Розроблено приймачі на основі твердого розчину в комбінації із зінтегрованими схемами, що забезпечує можливість опрацювання сигналів безпосередньо у фотоприймачах. Починаючи з 1978 року, з'явилися відомості про створення на основі $Cd_xHg_{1-x}Te$ приймачів із зарядовим зв'язком.

Розроблено двовимірні матриці з електронним скануванням. Можливість зміни в широких межах спектральних характеристик приймачів використовується для створення багатоколірних прий-

мачів для апаратури розпізнавання і самонаведення. Створено двовимірні ланцюжки з інтегрованим опрацюванням сигналів у фокальній площині ІЧ оптичної системи.

Створено гібридну схему – поєднання детекторної структури зі зчитувальним пристроєм на вузькощілинному напівпровіднику. Розроблено технологію отримання МДН-структур з 32-ма регістрами зсуву із зарядовим зв'язком. Виготовлено детектор на довжину хвилі близько 1 мкм, що функціонує на гарячих носіях заряду. Тверді розчини $Cd_xHg_{1-x}Te$ можна використовувати як резонатори, для яких ґрунтується на магнітоплазмових хвилях.

Останніми двома десятиліттями створено нове покоління приладів фотоелектроніки для теплобачення, тепlopеленгації, лазерної локації і зв'язку в ІЧ-діапазоні спектра¹. Створена і розвивається нова елементна база ІЧ-оптикоелектроніки (багатоелементні матричні фокальні площини, SPRITE-елементи, надрешітки, варизонні структури тощо).

До недавнього часу широко і ґрунтовно досліджено електрофізичні і оптичні властивості вказаних матеріалів. Результати таких досліджень узагальнено у низці монографій та оглядів. Проте значно менше уваги приділялося дослідженню фізико-механічних властивостей $CdTe$, $HgTe$, $Cd_xHg_{1-x}Te$, а також $ZnTe$. Актуальність вивчення цих властивостей, зокрема пластичності, процесів деформування сполук $A^{II}B^{VI}$, визначається, по-перше, їх широким застосуванням в електроніці, де пластична деформація немінуча в процесі виготовлення робочих елементів та їх експлуатації, а по-друге, відкриттям різних фізичних явищ, які супроводжують пластичне деформування (фотопластичний і електропластичний ефекти, деформаційна люмінесценція, дислокаційні струми і збудження електропровідності в процесі руху дислокацій).

Немало невіршених проблем залишилися і в галузі технології отримання кристалів і плівок високої структурної доскона-

¹ Пономаренко В.П. Теллурид кадмія–ртути і нове покоління приборів інфрачервоної фотоелектроніки // Успехи физ. наук. – 2003. – Т. 173, № 6. – С. 649–665; Antoni Rogalski. Infrared detectors at the beginning of the next millenium // Proc. of SPIE. – 2001. – Vol. 4413. – P. 307–322.

лості. Кристали і плівки, отримані в різних лабораторіях, часто відрізняються своїми фізичними параметрами, що ускладнює зіставлення даних щодо їх фізико-механічних властивостей.

Під час вирощування кристалів і плівок, а також їх подальшої термообробки відбувається пластичне деформування. Тому вивчення процесів пластичного деформування, механізмів, які контролюють процес зміни форми, відіграє важливу роль у вирішенні проблеми отримання кристалів і плівок із заданими властивостями.

Знання фізико-механічних параметрів досліджуваних матеріалів важливе також у зв'язку з тим, що прилади, створені на їх основі, можуть використовуватися у вельми жорстких умовах (високі і низькі температури, вібрація, радіація, коливання температури тощо). У монографії розглянуто питання впливу середовища і зовнішніх чинників на фізико-механічні властивості досліджуваних кристалів, причому використано дані, отримані авторами вперше.

Монографія повинна заповнити прогалину, що значною мірою утворилася в дослідженні фізико-механічних властивостей телуридів кадмію, ртуті і цинку. Узагальнено обширний оригінальний матеріал щодо дослідження морфології, структури і фізико-механічних властивостей названих матеріалів, викладений у численних наукових публікаціях, зокрема авторів монографії.

Під час підготовки масивних зразків для досліджень немінуче пошкоджуються підповерхневі шари, у монографії наводяться дані щодо плівок, отриманих на необроблених поверхнях.

Ураховуючи особливу роль поверхні кристалів і плівок у процесі пластичного деформування, у монографії багато уваги приділено дослідженню фізико-механічних властивостей підповерхневих шарів матеріалів. Для цього використано вперше розроблену в ІМЕТ ім. А.А. Байкова АН СРСР (Москва) нову методика мікромеханічних випробувань – кінетичну мікротвердість, засновану на неперервній реєстрації процесу заглиблення індентора в підповерхневі шари матеріалів. Ця методика відкриває якісно новий етап в розвитку випробувань мікроіндентуванням і, по суті, відкри-

ває новий напрям в галузі теорії, методології та апаратури визначення фізико-механічних властивостей матеріалів. Найбільший ефект вона дає під час дослідження і контролю поверхні і специфічних змін в підповерхневих шарах, викликаних різними технологічними процедурами (шліфування і полірування, нанесення покриттів, окисування, дифузія тощо). Оскільки цей метод набуває важливого науково-практичного значення в сучасному матеріалознавстві, у монографії стисло описано можливості нової методики мікромеханічних випробувань матеріалів. Уперше для досліджуваних матеріалів наводяться результати щодо визначення модуля Юнга одночасно з невідновленою і відновленою мікротвердостями, характеристик міцності, повзучості і релаксації напружень, параметра гістерезних втрат, ефективної поверхневої енергії, питомого внеску пружної і пластичної деформації тощо.

Отримані результати покликані зробити певний внесок у розвиток фізики міцності і пластичності напівпровідникових матеріалів, а також напівпровідникового матеріалознавства, багато питань яких ще далекі від остаточного вирішення.