

Міністерство освіти України  
Львівський державний університет імені Івана Франка

*На правах рукопису*

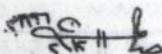
**Салах Ель-Дін Махмуд Мохамед Сальман**

**СТРУКТУРА, ЕЛЕКТРИЧНІ І ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ  
АМОРФНИХ ПЛІВОК InSb-Ge**

01.04.10 - Фізика напівпровідників та діелектриків

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук



Львів - 1996

621.315.59+  
534.226

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00754268 (W)

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Львівському державному університеті  
імені Івана Франка Міністерства освіти України

Наукові керівники: доктор фізико-математичних наук,  
професор Романюк Микола Олексійович,  
кандидат фізико-математичних наук,  
професор Миколайчук Олексій Гордійович

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,  
професор Набитович Йосип Дмитрович,  
кандидат фізико-математичних наук,  
доцент Біленький Богдан Філімонович

Провідна організація: Ужгородський державний університет

Захист відбудеться 13 березня 1996 року о 1515 год. на засіданні  
Спеціалізованої вченої ради Д.04.04.08 при Львівському державному  
університеті імені Івана Франка за адресою: 290005 м.Львів вул.Кирила  
і Мефодія 8.

З дисертацією можна ознайомитись в Науковій бібліотеці  
університету (290005 м.Львів вул.Драгоманова 5).

Автореферат розісланий "12" лютого 1996 року

Ім. В. Стефаника  
АН України

Вчений секретар  
Спеціалізованої вченої ради,  
доктор фізико-математичних наук

Л.В.Василь

Блажиевський Л.Ф.

АВ - 34.040

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.

**Актуальність теми.** Останнім часом спостерігається підвищена увага до фізичних проблем аморфних напівпровідників, унікальні властивості яких забезпечують їх використання у фото- і термоперетворювачах, перемикачах струму, елементах оптичного запису та зберігання інформації та ін. Встановлено, що фізичні властивості некрystalічних напівпровідникових матеріалів суттєво залежать від їх структури, домішок та дефектів, які визначають густину та енергетичне положення локалізованих станів у "хвостах" зон та в околі рівня Фермі, тому інтенсивність наукових досліджень по впливу технологічних, домішкових, радіаційних та інших факторів на атомну та електронно-дефектну підсистему аморфних напівпровідників постійно зростає. Значним проривом у цьому плані можна вважати фундаментальні дослідження аморфного кремнію та германію, які дозволили знайти унікальний метод керування густиною та енергетичним положенням локалізованих станів в псевдощільні конденсатів (постгідрогенізаційний ефект) і ефективно їх легувати. На жаль, метод гідрогенізації виявився малоефективним для інших аморфних напівпровідників, тому пошук інших методів управління властивостями аморфних твердих тіл продовжується. Позитивним у цьому напрямку можна вважати роботи по використанню методу "модифікування" склоподібних та аморфних матеріалів важкими металічними домішками (наприклад, вісмутом).

Вагоме місце серед аморфних матеріалів групи  $A_3B_5$  займають тонкоплівкові конденсати  $InSb$ , структура яких є проміжною між тетраедричними (аморфні  $Ge$  ( $Si$ )) та халько-генідними неупорядкованими матеріалами (аморфний  $Se$  та ін.). У зв'язку з викладеним актуальним є вивчення залежності структури ближнього порядку, кінетики кристалізації, фізичних властивостей аморфних плівок  $InSb-Ge$  від умов одержання, вивчення впливу на ці процеси релаксації структури  $InSb$  в сторону збільшення вмісту тетраедрично зв'язаних структурних фрагментів та їхнього впливу на особливості електронного перенесення та оптико-спектральні властивості. Проведені в роботі дослідження дозволяють розширити уявлення про фізико-хімічні процеси, які протікають в аморфних матеріалах на основі сполук  $A_3B_5$ .

Доцільність вибору об'єктів дослідження зумовлено надійними даними по дослідженню структури і фізичних властивостей аморфних германію та антимоніда індія, що дає можливість прослідкувати їх зміну в системі InSb-Ge.

Вибір тонкоплівкових матеріалів і вивчення оптичних властивостей визначається замовленням єгипетської сторони при відрядженні автора у Львівський університет.

**Мета роботи** - дослідити вплив умов одержання та хімічного складу на структуру, електричні та оптичні характеристики конденсатів InSb-Ge.

**Наукова новизна:**

- вперше вивчено структуру ближнього порядку аморфних конденсатів InSb-Ge і її трансформація в залежності від  $T_D$  і температурного відпалу;
- досліджено електропровідність та оптичні властивості в широкому інтервалі енергій фотонів (0.1-22 eV) і встановлена кореляція між структурними, електрофізичними та оптичними властивостями.

**Наукова цінність роботи:**

- досліджено структуру ближнього порядку аморфних плівок системи InSb і встановлено, що її можна описати в рамках сплавної моделі, в якій параметри ближнього порядку поступово змінюються від тетраедричного оточення до потрійної координації в розподілі найближчих сусідів для InSb;
- показано, що в усьому інтервалі концентрацій відбувається гетерогенна кристалізація аморфних сплавів з виділенням спочатку фази InSb, яка зароджується рівномірно по всьому об'єму в аморфній матриці германію;
- встановлена концентраційно-температурна залежність зміни механізмів провідності аморфних плівок InSb. Показано, що температура переходу, при якій відбувається зміна механізмів провідності від стрибкового до активаційного росте із збільшенням концентрації InSb, порохована густина станів біля рівня Фермі та енергія активації;
- проміряно оптичні спектри поглинання (відбивання) в області 0.1-22 eV та розраховано спектри оптичних функцій InSb-Ge при кімнатній температурі;
- простежено еволюцію спектрів при переході до зразків, отриманих на підкладках при різних температурах осадження і підтверджено висновки про структуру відповідних конденсатів.

### Практична цінність роботи:

- встановлені оптимальні умови одержання аморфних і кристалічних плівок InSb-Ge;

- знайдено хімічний склад конденсатів з максимальною термічною стійкістю;

- показана можливість створення композиційних аморфно-кристалічних матеріалів термовідпаду;

- отримано спектри оптичних функцій InSb-Ge корисні для ідентифікації конденсатів.

### Положення, що виносяться на захист:

1. Структура ближнього порядку і кінетика кристалізації аморфних конденсатів InSb-Ge.

2. Особливості електропереносу в аморфних конденсатах.

3. Загальна характеристика спектрів поглинання та оптичних функцій InSb-Ge та їх залежність від умов напilenня.

Апробація роботи. Основні результати роботи доповідались на 4 наукових конференціях: Четвертій Міжнародній конференції з фізики та технології тонких плівок (м.Івано-Франківськ, 1992), Першій Українській конференції "Структура і фізичні властивості неупорядкованих систем" (м.Львів, 1993), Першій міжнародній конференції по халькогенідних і алмазоподібних напівпровідниках (м.Чернівці, 1993), П'ятій міжнародній конференції з фізики і технології тонких плівок (м.Івано-Франківськ, 1995).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 7 робіт: три статті та 4 тези доповідей, які перелічені в авторефераті. У спільних публікаціях дисертантові належить отримання плівок відповідних хімічних складів при різних температурах підкладки, дослідження структури, кінетики кристалізації, температурної залежності електропровідності та оптичних функцій конденсатів.

Структура та об'єм дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу та п'яти оригінальних розділів, висновків та списку цитованої літератури. Загальний об'єм роботи становить 161 сторінки, рисунків 49, таблиць 5. Бібліографія складає найменувань 134.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ.

У вступі обговорена актуальність досліджень, визначена мета роботи, її наукова новизна та практична цінність, сформульовані основні положення, що виносяться на захист, описана апробація роботи, публікації автора, об'єм і структура дисертації.

У першому розділі описана методика електронографічного і електронномікроскопічного дослідження структури конденсатів. Приведений огляд робіт по дослідженню структури ближнього порядку в аморфному германії і антимоніді індію. На основі аналізу літературних джерел зроблено висновок про тетраедричне розміщення атомів в аморфному германії. Структуру аморфного германію на основі аналізу кривих радіального розподілу атомів (КРРА), можна описати за допомогою кластерної моделі, яка передбачає в своїй основі тетраедри з атомів германію, які з'єднані між собою різними способами, що в кінцевому варіанті приводить до алмазоподібної ґратки або структури типу в'юрциту. Деяка частина тетраедрів утворює п'ятикутні кільця, із яких не можна побудувати будь-яку ґратку з тетраедричним кутом  $109^\circ$ .

Розглядаються і інші структурні моделі розташування атомів в аморфному германії, зокрема, мікрокристалічна, в якій вважається, що структура аморфного германію складається з дрібних кристаликів (10-15 Å), які розділені міжкристалічними прошарками. В багатьох роботах запропонована модель неупорядкованої сітки.

Згідно з деякими роботами аморфний InSb описується тетраедричною координацією атомів, яка характерна для кристалу, однак в останніх роботах вказується на потрібну координацію атомів. Такі розбіжності зумовлені, насамперед, метастабільністю аморфних конденсатів і можливістю існування в них декількох метафаз, особливо, це проявляється в багатокомпонентних системах, а по-друге, методикою одержання і аналізу КРРА.

Тому в роботі приділена увага методиці дослідження структури ближнього порядку. В цьому розділі приведені теоретичні розрахунки структурного фактору та методика обчислення КРРА для однокомпонентних систем. Проаналізовані фактори, які впливають на форму КРРА та точність визначення координаційних чисел і міжатомних віддалей. Вказується, що

застосування експозиційного сектору з кутом розкриття  $1/ECi f_2(3)$  ( $C_i$  - концентрація і -компоненти,  $f_i$  - атомний фактор і -компоненти) дає можливість одержати структурні амплітуди розсіювання при великих  $S=15 \text{ \AA}^{-1}$ .

Описана кінетика кристалізації плівок Ge та InSb. У випадку германію вона проходить при сталій температурі вибухово. Для InSb характерний невеликий температурний інтервал, який пов'язується з гетерофазними флюктуаціями складу. Температурні залежності електропровідності свідчать про те, що кристалізація плівок, одержаних при низьких температурах  $T_n < 80 \text{ K}$ , проходить через проміжні металічні фази з утворенням мікрозародків цих фаз. Встановлено, що енергія кристалізації залежить від методу одержання плівок і складає  $E=1.39 \text{ eV/атом}$  для плівок, одержаних катодним розпиленням.

В оригінальних параграфах цього розділу описується методика одержання плівок Ge, InSb, InSb-Ge дискретним випаровуванням у вакуумі  $P=10^{-4} \text{ Па}$ . Для структурних досліджень конденсація здійснювалася на сколи монокристалів NaCl, KCl, або на скляні пластинки, на яких попередньо вакуумним випаровуванням наноситься шар NaCl. Температура підкладок під час напилення складала 300-600 K. Структура плівок досліджувалась в електронному мікроскопі УЭМВ-100К та електроннографі ЭГ-100А.

Приведені оригінальні результати по дослідженню структури, термічної стійкості і кінетики кристалізації вихідних компонентів Ge, InSb та InSb-Ge.

Структура плівок InSb залежить від багатьох технологічних параметрів. На неорієнтованих підкладках плівки однакової товщини в залежності від  $T_n$  були аморфними або кристалічними. Суцільні плівки ( $d > 100 \text{ \AA}$ ) мали кристалічну структуру при  $T_n > 360 \text{ K}$ , при нижчих температурах плівки були аморфними. В острівкових плівках ( $d < 100 \text{ \AA}$ ) зародки мають аморфну структуру при  $T_n < 470 \text{ K}$ , температура кристалізації залежить від розміру кристалів. Розміри і густина зародків визначаються температурою і розмірами підкладки та її структурою. Температура переходу аморфних плівок Ge і InSb в кристалічні, осаджених на монокристалічні підкладки, є нижчою ніж на аморфних підкладках (при однакових умовах).

Аморфні частинки InSb і Ge добре декорують поверхні сколи монокристалів, що вказує на високу рухливість атомів при осадженні. Це

вказує на те, що утворення аморфної фази не пов'язане з малою дифузією, а є наслідком міжатомної взаємодії у вказаних матеріалах.

Кінетика кристалізації Ge, InSb та плівок  $(\text{InSb})_{0.79}\text{Ge}_{0.21}$ ,  $(\text{InSb})_{0.71}\text{Ge}_{0.29}$ ,  $(\text{InSb})_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ ,  $(\text{InSb})_{0.3}\text{Ge}_{0.7}$ ,  $(\text{InSb})_{0.1}\text{Ge}_{0.9}$  товщиною  $d=500$  Å вивчалася безпосередньо в електронному мікроскопі з використанням приставки ПРОН-2. Встановлено, що термічна стійкість аморфних плівок максимальна для аморфного Ge знижується зі збільшенням концентрації InSb. У плівках InSb-Ge кристалізація має гетерогенний характер. Первинною фазою є кристаліти InSb, які ростуть рівномірно в аморфній матриці Ge. Для пояснення цього явища зроблено припущення про утворення в аморфній матриці гетерофазних флюктуацій складу із збагаченими областями InSb та Ge. Цей процес носить складний характер і проходить через проміжні метестабільні фази.

При конденсації InSb-Ge на гарячі підкладки  $T_{\text{п}} > T_{\text{к}}$  ( $T_{\text{к}}$  - температура кристалізації для даного складу) встановлено утворення твердих розчинів заміщення в концентраційному інтервалі на основі сфалеритної ґратки ( $\text{C} < 6$  моль% Ge<sub>2</sub>), а також формування кристалів InSb гексагональної структури.

При осадженні на сколи монокристалів NaCl при  $T_{\text{п}} > T_{\text{к}}$  формуються текстуровані плівки, причому текстуруються тільки кристаліти InSb з віссю текстури  $\langle 100 \rangle$ , а кристаліти германію розміщені хаотично, без будь-якої орієнтації. Це пов'язується з геометричним фактором співмірності ґраток NaCl, InSb і Ge.

Результати дослідження структури ближнього порядку аморфних плівок германію, антимоніду індію і плівок системи InSb-Ge описані в останньому параграфі і підсумовані в таблиці 1.

Із табл.1 видно, що аморфна структура Ge має тетраедричне розміщення атомів. Для InSb характерна потрійна координація. Для плівок InSb-Ge спостерігається лінійне зменшення міжатомної віддалі від 2.82 - для InSb до 2.45 Å - для Ge. В той час перше координаційне число різко зростає від 3 для InSb до 4 при концентрації 20 моль% Ge. Це вказує на те, що Ge індукує і стабілізує тетраедричну конфігурацію атомів в аморфних плівках InSb-Ge.

Таблиця 1.

Положення максимумів на нормованих інтерференційних функціях  $i(S)$  і кривих радіального розподілу  $R_i$ , першого координаційного числа  $n$  та температури кристалізації  $T_K$  для плівок різного складу системи InSb-Ge.

Склад плівки	$i(s), \text{Å}^{-1}$			$R_i, \text{Å}$			n, ат.	$T_K, \text{К}$
	1	2	3	1	2	3		
InSb	1.85	3.03	4.80	2.82	4.41	6.83	3.06	390
(InSb) <sub>0.88</sub> (Ge) <sub>0.22</sub>	1.86	3.08	4.88	2.77	4.36	6.73	3.8	465
(InSb) <sub>0.60</sub> (Ge) <sub>0.44</sub>	1.88	3.18	5.03	2.70	4.27	6.55	4.0	520
(InSb) <sub>0.40</sub> (Ge) <sub>0.54</sub>	1.91	3.25	5.15	2.61	4.20	6.38	4.0	540
Ge	1.95	3.44	5.45	2.45	4.00	6.00	4.0	550

У другому розділі приведені теоретичні роботи по явищах перенесення в аморфних напівпровідниках і оригінальні результати по дослідженню температурно-концентраційної залежності електропровідності аморфних конденсатів InSb-Ge. Із аналізу цих залежностей зроблений висновок, що домінуючим механізмом електропровідності аморфних плівок InSb-Ge при температурах вище кімнатної є активаційний. Енергія активації змінюється в залежності від складу в межах 0.17-0.4 eВ.

При низьких температурах для плівок всіх складів притаманна стрибова провідність по локалізованих станах навколо рівня Фермі. Мінімальна густина локалізованих станів  $N(E_f) = 3.2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3} \text{ eВ}^{-1}$  спостерігається в аморфних плівках германію. Температура переходу від стрибокового до активаційного механізму провідності зміщується в область вищих температур з ростом концентрації германію.

У третьому, оглядовому розділі описано оптичні спектри кристалічних напівпровідників та кристалів Ge і InSb, зокрема. Розглянемо різні області довжин хвиль, особливості та походження смуг поглинання, прояв у спектрах домішкових центрів і вільних носіїв, міжзонних та внутрішніх переходів. Ці матеріали використовуються при аналізі експериментальних результатів. Описано спектри германію та InSb і зроблено висновок, що досліджувані у роботі сполуки InSb-Ge у цьому плані не вивчені.

У четвертому розділі описана методика експериментальних досліджень оптичних спектрів та розрахункових прийомів, використаних у

роботі. Використані стандартні спектральні прилади, перекривають область спектру від вакуумному ультрафіолету (до 22 еВ) до інфрачервоної ділянки (0.07 еВ) - спектрограф ДФС-5, спектрофотометри КСВУ-23, UR-20 та ИКС-14. Прилади і стандартні прийоми їх використання описані дуже стисло, більш повно - методика отримання та обробка спектрограм і джерело світла для вакуумного спектрографа. На одну плівку довжиною ~60 см фотографували спектр відбивання від зразка та два спектри порівняння. Експозиції підбирались так, щоби почорніння плівки на усіх спектрах лягало на лінійну ділянку характеристичної кривої фотоплівки (плівка Шумана, тип УФ-4). Шуканий коефіцієнт відбивання R розраховували за формулою

$$R = \frac{I_1}{I_2} \exp \left\{ \frac{S - S_1}{S_2 - S_1} \ln \frac{I_2}{I_1} \right\}$$

де S - почорніння у спектрі відбивання зразка, S<sub>1</sub> та S<sub>2</sub> - почорніння у спектрах порівняння, сфотографованих на цю ж плівку з експозиціями t<sub>1</sub> і t<sub>2</sub> (на практиці - числа спалахів джерела). Використання двох спектрів порівняння дало можливість автоматично врахувати спектральну залежність коефіцієнта контрастності плівки та її можливу просторову неоднорідність.

Використання похилого падіння світла на зразок (~70°) давало високу ступінь поляризації у відбитому пучку без використання поляризаторів.

Описано співвідношення і спосіб, які дають можливість розрахувати компоненту відбитого світла R<sub>s</sub>, покращуючи дещо ступінь поляризації, сформовану за рахунок відбивання під кутом, близьким до кута Брюстера.

Розділення установки з врахуванням робочих характеристик спектрографа, джерела світла та зернистості фотоплівки становить 0.1 еВ, 0.2 еВ, 0.4 еВ та 1 еВ відповідно в областях енергій 7-8 еВ, 10еВ, 15еВ та 20-22 еВ. Відносна похибка визначення коефіцієнта відбивання становить ~5%. Фотометрування фотоплівки проведено за допомогою двопроменевого мікрофотометра МФО-451.

У проміжній області спектру використано спектрометр КСВУ-23. Для дослідження спектрів відбивання було виготовлено приставку, яка дозволяла орієнтувати зразок на лаві приладу перед вхідною циліндрою. Інші операції виконувались з використанням ЕОМ, що входить у комплект спектрального комплексу КСВУ-23.

У довгохвильовій ділянці спектру використовувались спектрометри UR-20 та ИКС-14. При роботі на ИКС-14 швидкість сканування спектру становила  $12 \text{ см}^{-1}$  на хвилину. За спектрами відбивання розраховано оптичні функції ( $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$ ,  $n$ ,  $k$ ,  $\epsilon_{\text{оef}}$ ,  $N_{\text{еф}}$  та  $I_{\text{те}}^{-1}$ ), використовуючи метод Крамерса Кронінга, модифікований для великих кутів падіння. Дані про спектр відбивання вводились через 0.05 eВ в області 1...5 eВ і через 0.1 eВ - в області 5...22 eВ, що дозволило добре відтворити структуру спектра. Розрахунки виконано за наявної програмою на комп'ютері IBM PC/AT-386, програма написана на мові Фортран. Оскільки у програмі використовувалась процедура послідовних наближень, то критерієм закінчення ітераційного процесу було зменшення різниці сусідніх ітераційних значень коефіцієнта відбивання до величини абсолютної похибки експерименту.

Розрахунок однієї групи оптичних функцій вимагав 10-12 ітерацій, і тривав 5-6 хвилин.

Коефіцієнти відбивання  $R_0$  в області 0...1 eВ визначались за значенням показника заломлення в області 1 eВ (вимірюємого за допомогою еліпсометра). В області енергій, вищих за 22 eВ частотна залежність коефіцієнта відбивання описувалась експоненціально затухаючою функцією, а характерна стала у показнику експоненти вибиралась, виходячи з закономірності зміни коефіцієнта відбивання напівпровідників у плазмовій області спектра.

У п'ятому розділі описано оптичні спектри плівок InSb-Ge, напилених на скляні і кристалічні підкладки, які в момент напилення мали температуру 300, 400, 450 і 500 K. Встановлено, що досліджувані зразки  $\text{InSb}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$  мають високі коефіцієнти відбивання  $R$  в області 1...5 eВ, виявлено значне зменшення  $R$  в області 5.5 eВ і мале відбивання при вищих енергіях фотонів (>6 eВ). Найбільш чітка структура спектрів спостерігалася в області 1-5 eВ, характерні максимуми при 1.2, 1.7 та 5 eВ спостерігалося на зразках, напилених при різних температурах підкладки. Крайні ділянки спектру відбивання з ростом температури підкладки монотонно зміщувалася в сторону росту  $R$ , в області 2-5 eВ таких монотонних змін немає. Для зразка з температурою підкладки 500 K в області широкого максимуму відбивання при 4.5-5.5 eВ виникає замітна структура (табл. 2).

В цілому спектри InSb-Ge суттєво відрізняються від спектрів плівок чистих Ge та Sb за числом та положенням максимумів, тобто досліджувані зразки не є простою суперпозицією вихідних сполук.

Таблиця 2.

Значення енергій максимумів у спектрі відбивання плівок InSb-Ge для різних температур підкладки, в дужках вказані коефіцієнти відбивання R.

300 K	400 K	450 K	500 K
1.2(0.38)	1.2(0.42)	1.2(0.45)	1.2(0.47)
1.66(0.53)	1.66(0.57)	1.61(0.6)	1.66(0.62)
	2.95(0.55)	2.91(0.54)	1.59(0.63)
			3.6(0.56)
			4.41(0.65)
			4.71(0.80)
4.9(0.68)	4.88(0.71)	4.9(0.74)	4.9(0.78)
			5.13(0.74)
		6.8(0.25)	6.85(0.24)
	7.49(0.18)		
9.45(0.16)	11.15(0.16)	11.9(0.2)	
11.2(0.16)	12.1(0.17)		
	14.0(0.17)	16.0(0.22)	

Порівняння  $\sqrt{\varepsilon_{0e}\phi} \cong 3.6$  у районі 12 еВ з показником заломлення у районі 1 еВ ( $n=3.8$ ) свідчить загалом про коректність проведених розрахунків методом Крамерса-Кронінга.

Максимум функції електронних втрат лежить в області 5.2 еВ, ефективне число електронів  $N_{ef}$  для 12 еВ рівне 7, а в області плазмової частоти  $N_{ef}=3.2$ . Величини дійсної  $\varepsilon_1$  та уявної  $\varepsilon_2$  частини діелектричної проникливості близькі до аналогічних характеристик монокристалів Ge та InSb.

Спектри оптичних сталей  $K$ ,  $I_{me}^{-1}$  та  $N_{ef}$  для досліджуваних груп кристалів загалом подібні між собою, лише плазмова частота для зразка з температурою підкладки 500 K зростає на 20%. Спектри оптичних функцій  $n$  і  $k$  плівок зміщені у сторону менших енергій порівняно з спектрами кристалів, що може свідчити про наявність у плівках аморфної фази і узгоджується з відомими розрахунками та експериментальними результатами для германію.

Із порівняння  $\epsilon_{\text{оef}}$  та  $N_{\text{ef}}$  для Ge та InSb виходить, що в області енергій ( $\omega < 4$  eV) більш активними є переходи в InSb, в області  $\omega > 4$  eV - навпаки.

Зміщення смуг поглинання при рості температури підкладки якісно пояснюється ступенем взаємного впливу атомів Ge на зв'язки InSb і навпаки з врахуванням ступеня іонності (і далекодії) зв'язків In-Sb та Ge-Ge.

Врахування різниці ступеня іонності (ковалентності) хімічних зв'язків в окремих матеріалах (Ge та InSb) дозволяє пояснити основні особливості спектрів плівок InSb-Ge в області збудження валентних електронів.

Отримані результати узгоджуються із висновками структурних досліджень, згідно з якими при низьких температурах підкладки конденсати InSb-Ge мають аморфну (сплавну) структуру, при підвищенні цієї температури в аморфній фазі германію утворюються мікроскопічні включення кристалічного InSb, а при  $T > 450$  K плівки мають полікристалічну структуру з сумішшю кристалів InSb та Ge.

З даним висновком узгоджуються дослідження інфрачервоних спектрів, положення головних максимумів, яких наведено у таблиці 3 для зразків, осаджених на підкладках при різних температурах.

Таблиця 3.

Розраховані із спектрів відбивання плазмові частоти для плівок InSb-Ge, одержаних при різних  $T_{\text{п}}$ .

T, K	300	400	450	500
eV	5.23	5.31	5.34	5.44

Поглинання в області  $\omega > 0.48$  eV пов'язується з плазмовим поглинанням в германії ( $E_{\text{g}} \sim 0.6$  eV), в області 0.1-0.3 eV з міжзонними переходами в InSb ( $E_{\text{g}} \sim 0.18$  eV). Це свідчить про наявність певної долі чистої фази одної та другої компоненти.

Робиться, крім того, висновок, що у досліджуваних плівках існують вільні носії зарядів, утворені, зокрема, домішками компонент Ge, In та Sb, які не прореагували. Розрахований показник частотної залежності коефіцієнта поглинання плівок змінюється для різних плівок у межах 1.4...1.8, що загалом характерне для частотної залежності коефіцієнта поглинання світла вільними носіями концентраційного порядку  $10^{16} \dots 10^{18}$  см<sup>-3</sup>.

Оптичні дослідження, таким чином, подали незалежну інформацію про можливу структуру і склад плівок InSb-Ge.

### Основні результати та висновки.

1. Методом дискретного випаровування у вакуумі отримано тонкі конденсати системи InSb-Ge при різних температурах підкладки ( $T_{\text{п}}=300-600$  К).

2. Електронографічними дослідженнями підтверджено, що в кристалічних та аморфних плівках германію зберігається тетраедрична міжатомна координація з найближчою міжатомною віддалю  $2.45 \text{ \AA}$ .

3. Виявлено значну залежність структури ближнього порядку аморфних плівок InSb від температури підкладки. Структура ближнього порядку аморфних плівок, осаджених на підкладках, які знаходились при кімнатній температурі, характеризується значним процентом "неправильних" зв'язків, тобто зв'язків між односортними атомами. У відпалених аморфних плівках InSb, на відміну від тетраедричної координації кристалів, спостерігається потрійна координація в розміщенні найближчих сусідів. Атом одного сорту, в основному, ковалентно пов'язаний з трьома атомами другого сорту на віддалі  $R_1=2.82 \text{ \AA}$ .

4. Встановлено, що на підкладках, які знаходились в процесі конденсації при кімнатній температурі, формуються для всіх складів системи InSb-Ge аморфні плівки. При рості концентрації InSb найближча міжатомна віддаль зростає від  $R_{\text{Ge}}=2.45 \text{ \AA}$  до  $R_{\text{InSb}}=2.82 \text{ \AA}$ , що свідчить про формування "сплавної" структури. Введення Ge трансформує структуру аморфних плівок до тетраедричної.

5. Термічна стійкість аморфних плівок системи InSb-Ge, визначена при неперервному нагріві плівок, знижується з ростом концентрації InSb, а процес кристалізації завершується формуванням двофазних полікристалічних плівок з фазами Ge і InSb.

6. Виявлено значні зміни в структуроутворенні плівок при осадженні їх на підігрітій підкладці. Первинними фазами кристалізації є кристаліти твердих розчинів  $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Ge})_x$  та кристаліти гексагонального InSb. Кристалізація завершується формуванням двофазних полікристалічних плівок з фазами InSb і Ge. При температурах вище  $600 \text{ К}$  на монокристалічних підкладках формуються текстуровані та епітаксіальні плівки.

7. Домінуючим механізмом електропровідності аморфних плівок InSb-Ge при температурах вище кімнатної є активаційний механізм. Енергія активації

процесу провідності в залежності від складу плівок змінюється в межах 0.17-0.4 eВ.

8. При низьких температурах спостерігається лінійна залежність питомої електропровідності в моттівських координатах, що вказує на стрибкову провідність по локалізованих станах навколо рівня Фермі. Мінімальна густина локалізованих станів  $N(E_f) = 3.2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3} \cdot \text{eВ}^{-1}$  спостерігається в аморфних плівках германію. З ростом вмісту InSb вона збільшується.

9. Температурна межа переходу від стрибкового механізму провідності по локалізованих станах навколо рівня Фермі до активаційного механізму провідності зміщується в область вищих температур з ростом концентрації Ge в аморфних плівках.

10. Оптичні спектри дзеркального відбивання в області 1.0-22 eВ плівок InSb-Ge, напилених на скляні підкладки методом термічного вакуумного розпилення суміші  $\text{Ge}_{0.5}(\text{InSb})_{0.5}$ , суттєво відрізняються від відповідних спектрів монокристалічних Ge та InSb.

11. Методом дисперсійних співвідношень Крамерса-Кроніга розраховані спектри оптичних постійних для плівок InSb-Ge.

12. Показано, що при збільшенні температури підкладки плівок InSb-Ge в області 300..500 К максимум функції електронних втрат  $I_{\text{me}}^{-1}$  і відповідна плазмова частота  $\omega_p$  зміщується в область високих енергій на 0.2 eВ, що свідчить про утворення аморфних плівок при низьких температурах і полікристалічних - при високих.

13. Спектри оптичних сталих плівок InSb-Ge зміщені в область низьких енергій відносно спектрів InSb та Ge, що свідчить про наявність аморфних форм.

14. У спектрах оптичних сталих плівок InSb-Ge є максимуми, характерні для Ge та InSb. На основі залежності цих максимумів від температури підкладки у момент напилення плівки, запропонована модель формування плівки InSb-Ge, яка враховує залежність ступеня дальньої хімічних зв'язків від ступеня їх іонності і узгоджується з даними структурних досліджень про первинну кристалізацію InSb порівняно з Ge при рості температури підкладки.

15. За отриманими спектрами поглинання плівок InSb-Ge в області 0.05-1.2 eВ виявлено особливості, характерні для крайового поглинання кристалів InSb та Ge, що свідчить про наявність цих фаз у плівках.

16. Встановлено поглинання світла вільними носіями у плівках InSb-Ge, розраховані показники ступеневі залежності коефіцієнта поглинання від енергії фотонів. Зроблено висновок, що у досліджуваних плівках є не лише чисті фази InSb та Ge, але й відповідні фази з домішками окремих атомів Ge, In та Sb.

**Основні результати дисертації викладені в наступних роботах:**

1. Миколайчук О.Г., Луцик Н.Ю., Дуцяк І.С., Макаренко С.В., Романюк Р.Р., Сальман С.М.М. Структура та властивості тонкоплівкових конденсатів антимоніду індію // Вісник Львів. ун-ту, сер. фізична. "Фізика матеріалів з керованими властивостями". -1995. вип.27. -С.61-65.
2. Сальман С.М.М., Андрієвський Б.В., Вахулович В.Ф., Курляк В.Ю. Оптичні спектри плівок (InSb)<sub>0.95</sub>Ge<sub>0.5</sub> в області збуджень валентних електронів // Там же. С.66-70
3. Миколайчук О.Г., Дуцяк І.С., Луцик Н.Ю., Макаренко С.В., Романюк Р.Р., Сальман С.М.М. Вплив технології одержання на структуру і фізичні властивості плівок InSb-Ge // Журнал фізичних досліджень. -1996. -т.1. (В друці).
4. Сальман С.М.М., Луцик Н.Ю. Термічна стійкість та кінетика кристалізації аморфних плівок системи InSb-Ge // Тез. доп. І Української конференції "Структура і фізичні властивості неупорядкованих систем". Львів, ЛДУ ім. І.Франка, 1993. -т.2. -С.58.
5. Миколайчук О.Г., Сальман С.М.М., Луцик Н.Ю. Структурні перетворення в плівках системи InSb-Ge // Матеріали IV Міжнародної конференції з фізики і технології тонких плівок. Івано-Франківськ, ПУ ім. В.Стефаника, 1993. -С.75.
6. Миколайчук О.Г., Сальман С.М.М., Луцик Н.Ю. Структурні перебудови в плівках метастабільних твердих розчинів систем Al<sub>III</sub>V-Ge // Abstract Booklet. The First International Conference on Material Sci. of Chalcog. and Diamond-Structure Semiconductors, Chernivtsi. Yu. Fedkovich Chernivtsi State University, 1994. -С.79.
7. Сальман С.М.М., Миколайчук О.Г., Луцик Н.Ю. Структура ближнього порядку аморфних плівок системи InSb-Ge // Матеріали V Міжнародної конференції з фізики і технології тонких плівок, Івано-Франківськ, ПУ ім. В.Стефаника, 1995. -С.134.

**Salman S.M.M. Structure, electrical and optical properties of amorphous films InSb-Ge.**

*Thesis on search of the scientific degree of candidate of physical and mathematical sciences, speciality 01.04.10 - physics of semiconductors and insulators. I. Franko State University, Ministry of Education of Ukraine, Lviv, 1996.*

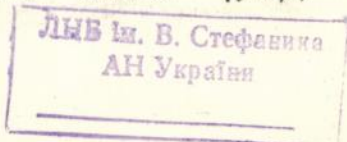
The seven scientific work containing results concerning investigations of regimes of obtaining, microstructure, electric conductivity and optical function spectra of InSb-Ge system are defendet it has been found that at the condensation on the cool substrate (300 K) there arise the amorphous films of different contents within the system InSb-Ge and at hot substrate (500 K) the two phase polycrystalline films of InSb and Ge grow. At low temperature the jump conductivity is more pronounced, where as at high temperatures the activation conductivity becomes important. These data are confirmed by spectra of optical functions ( $T$ ,  $R$ ,  $n$ ,  $k$ ,  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$ ,  $\epsilon_0$ ,  $N_{эфф.}$ ,  $I_{m\epsilon^{-1}}$ ) in the region of 0.1-22 eV, which testify also to the availability of In, Sb, Ge components as doping.

**Сальман С.М.М. Структура, електрические и оптические свойства аморфных пленок InSb-Ge.**

*Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников и диэлектриков. Львовский государственный университет имени И.Франко Министерство образования Украины, Львов, 1996.*

Защищается 7 научных работ, содержащих результаты исследования режимов получения, микроструктур, электропроводимости спектров оптических функций системы InSb-Ge. Установлено, что при конденсации на холодные подложки (300 K) возникают аморфные пленки всех составов системы InSb-Ge, при высоких (500 K) -двухфазные поликристаллические пленки InSb и Ge. При низких температурах преобладает прыжковая электропроводимость, при высоких- активационная. Эти данные подтверждены спектрами оптических функций в области ( $T$ ,  $R$ ,  $n$ ,  $k$ ,  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$ ,  $\epsilon_0$ ,  $N_{эфф.}$ ,  $I_{m\epsilon^{-1}}$ ) 0.1-22 эВ, которые свидетельствуют также о наличии компонент In, Sb, Ge в форме примесей.

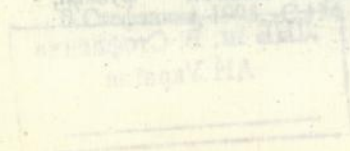
Ключові слова: *напівпровідникові плівки, оптичні функції, електропровідність, микроструктура.*



24  
S.M. Stetsko, electrical and optical properties of anisotropic films  
The seven scientific work containing results of researches of  
obtaining microstructure electric conductivity and optical function spectra of  
On system is described in last part of work, and in the introduction on the  
system (300 K) there are the anisotropic films of 4-nitrophenol within the  
system (300 K) the two phase polycrystalline films of  
and Ge grow. At low temperatures the high conductivity is more pronounced  
where as at high temperatures the anisotropic conductivity becomes isotropic. These  
was are confirmed by spectra of optical function  $\epsilon_1$  and  $\epsilon_2$  in the region of 0.1-2.2 eV, which testify also to the availability of a 2p-Ge  
component in a donor

С.М. Стетко, електричні та оптичні властивості анізотропних плівок  
Висвітлено результати досліджень семи наукових праць, присвячених  
отриманню мікроструктури електричної провідності та оптичних функцій спектра  
У останній частині роботи описано систему, а в вступі на цю тему  
система (300 К) наведено анізотропні плівки 4-нітрофенолу в межах  
система (300 К) двох фаза полікристалічних плівок  
і Ge виростає. При низьких температурах виражена висока провідність, а при високих температурах анізотропія провідності зникає. Це  
визначено спектрами оптичних функцій  $\epsilon_1$  та  $\epsilon_2$  в області енергій 0,1-2,2 еВ, що свідчить про наявність компонента 2p-Ge  
в донорі

Підписано до друку 9.02.96. Формат 60x84/16. Папір друк. №1.  
Друк. офсети. Умови друк. арк. I, O. Умови, фарб. відб. I, O.  
Обл. вид. арк. I, I. Тираж 100. Зам. 28.  
Машинно-офсетна лабораторія Львівського держуніверситету  
Ім. І.Фраька. 290602 Львів, вул. Університетська, I.



ARZ.HO.A

442981

AB 34.040