

яка проводиться в СКБ мікроелектроніки в приладобудуванні.

1. Любимов Л.И., Форсилова И.Д., Шапиро Е.З. Поверка средств электрических измерений: Спр. Л. 1987. 296 с. 2. А.с. 924615 (СССР). Магазин сопротивлений // Бюл. изобрет., 1979. №16. 3. А.с. 940275 (СССР). Управляемая мера электрического сопротивления // Бюл. изобрет., 1982. №24, 1982. 4. А.с. 1406730 (СССР).

Имитатор управляемой меры электрического сопротивления // Бюл. изобрет., 1988. №24. 5. Бойко О.В., Столярчук П.Г., Яцук В.О. Переносна багатозначна міра опору / Вимірювальна техніка та метрологія. 1999. № 54. С. 39-42. 6. А.с. 1427306 (СССР). Магазин сопротивлений // Бюл. изобрет. 1988. №36. 7. Микийчук М.М. Засоби повірки вторинних пристроїв контактної термометрії на основі активних імітаторів опору / Автореферат дис.к.т.н. Львів, 1998. 18 с.

УДК 534-8

## ЗАСТОСУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКУ ПІКОСЕКУНДНОГО ДІАПАЗОНУ ДЛЯ ВИМІРЮВАНЬ ПАРАМЕТРІВ ШАРІВ У БАГАТОШАРОВИХ СТРУКТУРАХ

© Любомир Паніж\*, Адам Ковальчик\*, Богдан Стадник, 2000

Державний університет "Львівська політехніка", кафедра "Метрологія, стандартизація та сертифікація", вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

\*Ряшівська політехніка, кафедра "Метрологія та вимірювальні системи", Ряшів, Польща

*Розглянуто принципи неруйнівного контролю параметрів багатошарових кремнієвих, напівпровідникових та змішаних структур. Подано схематичні діаграми та результати комп'ютерного моделювання вимірювань за допомогою ультразвуку пікосекундного діапазону. Наведено короткий огляд напрямків практичних досліджень ультразвуку пікосекундного діапазону.*

*Rассмотрены принципы неразрушающего контроля параметров многослойных кремниевых, полупроводниковых и смешанных структур. Поданы схематические диаграммы и результаты компьютерного моделирования измерений с помощью ультразвука пикосекундного диапазона. Приведен краткий обзор направленный практических исследований ультразвука пикосекундного диапазона.*

*Considered principles of nondestructive parameters control of multilayer silicic, semiconducnor and mixed structures. Helped into schematic graphs and results of computer modeling measuring by means picosecond ultrasound. Brought over short areas examination of practical researches picosecond ultrasound.*

Протягом останніх трьох десятиліть людство розвинуло чудове вміння виробляти мініатюрні об'єкти. Найяскравішим прикладом є комп'ютерна мікросхема, що виготовляється з кремнієвої пластини, у яку спеціально вводяться домішки, що утворюють напівпровідникові елементи. Поверхня кожної мікросхеми покрита послідовно металевими плівками та ізоляційними шарами, котрі забезпечують електричний зв'язок між сусідніми транзисторами. Ці плівки можуть бути завтовшки до мільйонної частки сантиметра. Товщина і однорідність цих плівок визначають ефективність роботи мікросхеми і, врешті-решт, комп'ютера, в якому вона встановлена.

Плівка може мати довільну товщину від  $5 \cdot 10^{-9}$  м до  $5 \cdot 10^{-6}$  м. Для найтонших плівок товщина повинна контролюватись з точністю до  $10^{-10}$  м [1, 2, 3]. Вимірювання товщини є надзвичайно складним завданням. Найефективніший метод, який сьогодні існує, це деструктивний: необхідно взяти мікросхему, розрізати її і поглянути на неї збоку. Більшість виробників стикаються з проблемою забезпечення постійної товщини, щохвилини контролюючи кожен аспект процесу виробництва – такий, як температура, вологість і тиск – та перевіряючи розміри кількох мікросхем, які приносяться у жертву.

У 1985 році, під час проведення оптичних експериментів з напівпровідниками у Браунівсь-

кому університеті, Гамфрі Мерісу і його колегам вдалося скерувати короткий імпульс світла на металеву плівку на поверхні взірця [4]. Метою було дослідити реакцію електронів всередині металу. Однак, після того, як спрямували другий імпульс світла, помітили, що коефіцієнт відбиття поверхні змінювався з певною періодичністю. На диво, плівка вібрала, випромінюючи звукові хвилі з хвилинними довжинами хвиль близько  $5 \cdot 10^{-8}$  м. До цього часу ніхто не підозрював, що можна створити звукові імпульси такої високої частоти і, як виявилось, короткої тривалості [5, 6].

З того часу почали розробляти методи застосування цих надзвичайно коротких звукових імпульсів для вимірювання мініатюрних об'єктів, таких, як металеві покриття на мікросхемах. Вловлюючи два окремі луна-сигнали, які відбиваються від верхньої і нижньої поверхонь, можна визначити товщину плівки.

#### Неруйнівне обчислення параметрів поверхонь розділу в зв'язаних структурах кремній на ізоляторі, використовуючи пікосекундну ультразвукову техніку

Пікосекундні надзвукові пристрої використовувалися, щоб генерувати і виявити звукові імпульси в зв'язаних структурах кремній на ізоляторі. За допомогою моделювання форм і амплітуд звукової луни, відбитої від поверхонь розділу Si-SiO<sub>2</sub>, можна характеризувати фізичні якості стиків. Можна спостерігати, як через подальші теплові процеси змінюється якість поверхні розділу погано з'єднаної структури.

З'єднаний кремній є на даний момент технологією, що найбільш стрімко розвивається і називається кремній на ізоляторі (КНІ) [7]. Так, важливим питанням є одержання характеристики якості з'єднаних Si/SiO<sub>2</sub> стиків. Неруйнівні методи містять інфрачервону мікроскопію. Хоч ці пристрої можуть виявити великі дефекти з'єднання, як, наприклад, пустоти, вони не можуть визначити фізичні і механічні якості Si/SiO<sub>2</sub> з'єднання поверхонь. Розглядається застосування пікосекундних ультразвукових пристроїв, щоб визначити якість з'єднання поверхонь. Подано результати, одержані на окремих структурах з'єднаних КНІ (ЗКНІ).

Принцип проведення експерименту показаний схематично на рис. 1. Тонка алюмінієва плівка ( $4 \cdot 10^{-8}$  м) наноситься на верхній кремнієвий шар структури ЗКНІ. Пікосекундний малопотужний імпульс з довжиною хвилі 800 нм вбирається в алюмінієвій плівці. Імпульсна енергія зосереджується навколо 1.3 нДж і коефіцієнт повторення є близько 76 МГц. Через стрімке нагрівання цієї плівки, створюється тепловий натиск й імпульс напруження поширюється в кремнієвий шар. Імпульс напруження розповсюджується через кремнієві шари і частково відбивається на межах розділу всередині структури. Коли відбитий компонент напруження повертається до алюмінієвої плівки – це приводить до малої зміни в оптичному коефіцієнті відбиття. Малопотужним імпульсом ("зондом") вимірюється ця зміна, яка затримується в часі щодо імпульсу спричинення [8, 9].

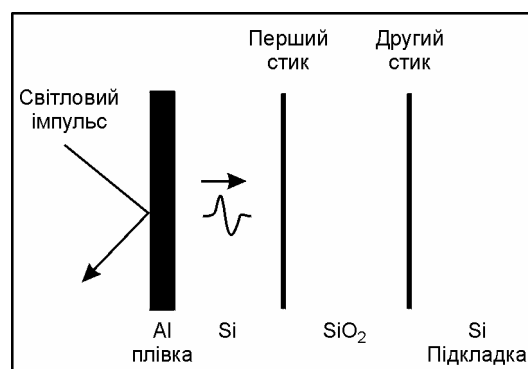


Рис. 1. Схематична діаграма експерименту

Рис. 2. показує дані, одержані від структури ЗКНІ, яка зв'язується в SiO<sub>2</sub>-Si шарах підкладки. Луна А виникає від імпульсу напруження, який

відбивається в першому шарі Si-SiO<sub>2</sub>. Луна В виникає від імпульсу напруження, який зробив два відбиття всередині кремнієвого шару. Луна С

виникає з частини імпульсу напруження, який передається через перший стик і потім відбивається в з'єднанні між  $\text{SiO}_2$  і  $\text{Si}$  структурами. Нарешті, луна D є комбінація двох імпульсів, які приходять в той же час. Один імпульс був відбитий в першому стикі, повернений до A1, і потім відбитий в другому  $\text{SiO}_2$ - $\text{Si}$  з'єднанні. Інший є імпульс, відбитий спершу від другого стикі і потім від першого. Можна аналізувати дані, показані на рис. 2, щоб визначити фізичні і механічні якості структури ЗКНІ. Від моменту входження кожної луни можна робити висновок про товщину верхнього  $\text{Si}$  шару і захованого  $\text{SiO}_2$  (пакет), а результати, які знахо-

дяться, є узгодженими з тими, що одержані спектроскопічною еліпсометрією. Від форм і амплітуд цих лун можна отримати інформацію як про механічні якості стиків, так і товщину пакета. Для ідеального стикі, тобто плоского стикі із досконалим з'єднанням, просто підрахувати коефіцієнт акустичного відбиття щодо щільності і звукові швидкості в двох суміжних шарах. Дефектне з'єднання і нерівномірність стикі вплинуть на коефіцієнт відбиття і можуть бути вивчені через вимірювання і моделювання амплітуд луни. Граничні нерівності також ведуть до модифікацій у формах луни.

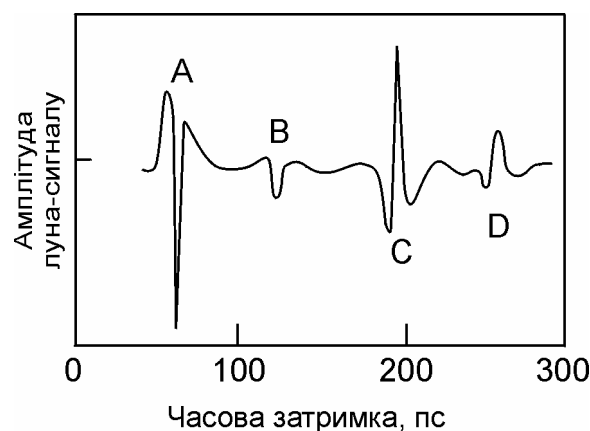


Рис. 2. Типові пікосекундні ультразвукові дані для структури ЗКНІ. Тепловий фон віднятий від первинних даних

Щоб аналізувати експериментальні дані більш якісно, була створена програма емулювання для моделювання експериментального процесу. В емуляції насамперед відділяється структура для вивчення в малому обсязі і підраховується тепло, вкладене в кожному об'ємі, використовуючи оптичні константи в кожному шарі структури. Від цього теплового розподілу, підраховується початкове напруження, накопичене в структурі. Тоді підраховується акустичне відбиття і передавальні коефіцієнти між сусідніми об'ємами і використовується відповідний алгоритм часового розповсюдження імпульсу напруження в структурі. Нарешті, для кожного кроку часу підраховуються вимушені зміни напруження в оптичному коефіцієнті відбиття для зонду від оптичних констант розподілу напруження і похідних констант

оптичної деформації. Послаблення акустичного кванту і нерівність стиків також розглядаються в моделюванні. Моделювання допускає, що послаблення акустичного кванту міняється, як  $w^2$ . Щоб моделювати нерівність стиків, приймається середній результат від ансамбля 100 структур з різною товщиною рівня. У цьому ансамблі товщина кожного рівня вибирається з гауссівського розподілу з характерною шириною  $z$ . Ширина цього розподілу потім асоціюється з нерівністю. Для більшості зразків вивчалась характерна ширина кожного рівня навколо  $2-3 \cdot 10^{-9}$  м [2, 10].

Рис. 3 показує порівняння моделювання з експериментальними даними. Шкала часу вміщує луни В і С. Можна також цим методом визначити місцезнаходження з'єднаних шарів для невідомої структури ЗКНІ.

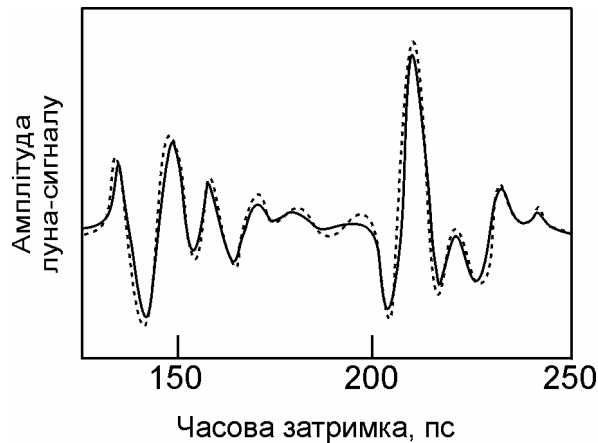


Рис 3. Комп'ютерне моделювання для даних на рис. 2. Суцільна лінія – результат моделювання; пунктирна лінія – експериментальні дані

З розвитком технології багат шарових структур все більш важливими стають точні, швидкі вимірювання параметрів мідних шарів та плівок.

Перспективи використання мідних плівок і 300 нм тонких кристалічних пластин передбачають повторне обмірковування підходів щодо виробництва напівпровідникових плівок. Здатність міді проникати через шари Ti/TiN (бар'єр/з'єднання) передбачає перспективи використання матеріалів, як, наприклад, TaN і WN, вимагаючи нових підходів метрології. Надалі це ускладнюється високою вартістю 300 нм тонких кристалічних пластин кремнію.

Інструментальному засобу в метрології металів, як, наприклад, чотириточковому зонду, що безпосередньо вимірює питомий опір листа, потрібні точні дані щодо товщини, щоб підрахувати масовий питомий опір. Для Ti/TiN бар'єрів, які використовуються для зв'язку алюмінію, щільність плівки дозволяє вимірювати товщину металевих плівок і бар'єрів, та підрахувати масовий питомий опір [10, 11]. Ця методика працює з відрізненими і легко контрольованими плівковими бар'єрами подібно TiN; однак бар'єри для міді не вкладаються з легко передбаченою щільністю. З іншого боку, вимірювання атомної депозитної густини, забезпечують дані про масовий питомий опір і щільність. Це також використовується, щоб

отримати товщину плівки, через те, що пряме вимірювання може вміщувати повільні, руйнівні методи випробування подібно профілометрії. Чотириточковий зонд і вимірювання XRF [6] також звичайно вимагають відображення тонких кристалічних пластин.

Через те, що атомний склад і щільність змінюються з умовами вкладу плівки бар'єра, використання з мідною металізацією, як, наприклад,  $WN_x$  і TaN, вимагатимуть незалежних вимірювань товщини на кристалічних пластинах виробу, зменшуючи або усуваючи потребу відображення тонких кристалічних пластин.

Враховуючи вищенаведені зауваження, технологія пікосекундного надзвукового лазерного сонара ("ІМПУЛЬС") робить можливим одночасне неконтактне вимірювання всього підрівня всередині багат шарового зв'язаного пакета. Оскільки імпульсні вимірювання можуть бути проведені всередині обумовлених метрологічних зон <math><20\text{ м}</math> в діаметрі, це обіцяє вирішення проблеми вимірювання товщини без руйнування багатократних шарів в пакетах металеві плівки, вкладених на тонких кристалічних пластинах виробу. Технологія, створена в Браунівському університеті, була розвинена у виробничий інструментальний засіб (Flanders, N.J.).

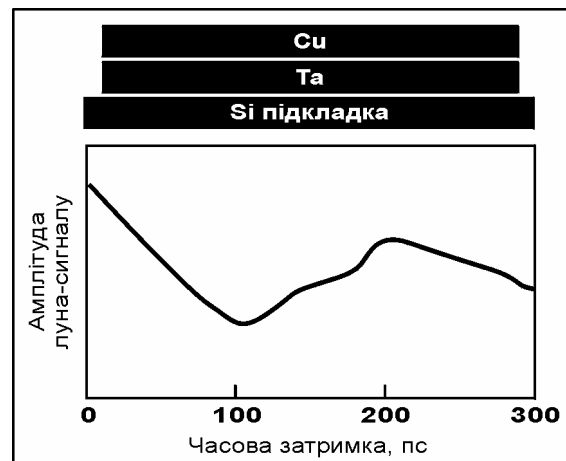


Рис. 4. Луна, вироблена імпульсною технологією для  $4 \cdot 10^7$  м шару Cu і  $3 \cdot 10^8$  м Ta

“ІМПУЛЬС” діє за допомогою спричинення і виявлення звуку в непрозорих (або металевих) плівках, використовуючи лазерні імпульси. Імпульс, тривалістю  $10^{-13}$  с, фокусується на поверхні зразка і частково вбирається, примушуючи поверхневу температуру піднятися на 5-10 °С. Стрімке теплове розширення, що виникає, спонукає звукову хвилю, яка розповсюджується у зразку із швидкістю звуку. Коли вона відбивається від межі між двома шарами або шаром і підкладкою, порція луни повертається назад до поверхні, ледь змінюючи коефіцієнт відбивання матеріалу і дозволяючи оптично виявити момент прибуття. Вимірювання інтервалу часу між звуковою генерацією і луною виявляє товщину шару. Цей метод надійно вимірює товщину плівок від 20 до 5 мм, також забезпечуючи інформацію про еластичність шарів і як щільно вони прилягають один до одного [9].

Через те, що “ІМПУЛЬС” є звуковою технікою, він не чутливий до впливу теплопровідності міді. Звукова хвиля генерується слабким імпульсом, який у певному місці продукує гарячі електрони, що індукують теплове розширення, оскільки вони взаємодіють з металевою структурою в поверхні матеріалу. Це відбувається швидше ніж теплове проникнення.

Коли використано мідь для оброблення, техніка може одночасно виміряти об’єм міді і щільність на додаток до товщини. Вимірювання без руйнування можуть також бути проведені за

допомогою нанесення діелектричних шарів, наприклад нітридів.

Через те, що це безпосереднє вимірювання товщини багат шарових структур в металі, технологія може усунути потребу відображення кристалічних пластин.

“ІМПУЛЬС” поєднує існуючі методи вимірювань питомого опору. Результати можуть бути об’єднані з даними питомого опору, щоб розвинути характеристики плівки для матеріалів, таких, як, наприклад, TaN і WN. Коли їхні результати об’єднані, “ІМПУЛЬС” може точно забезпечити масовий питомий опір. Додатково, коли визначається атомний склад плівки, щільність даних робить аналіз повнішим.

#### Анотація практичних досліджень ультразвуку пікосекундного діапазону (університет Джона Хопкінса)

Джим Спайсер, професор технології та матеріалів, повідомив про свої останні дослідження лазерного ультразвуку, які проводилися в співробітництві з Джейн Спайсер і Робертом Осандером в лабораторії прикладної фізики. Лазерний ультразвук як чутлива технологія обробки матеріалів і контролю, став першим кандидатом для індустріального практичного застосування. Дійсно, в минулому дослідження і розробка технології лазерного ультразвуку в Сполучених Штатах відбувалося перш за все всередині університетів або в інших дослідницьких організаціях. Виявилось, що

ця багатообіцяюча сенсорна технологія започаткувала стадію розвитку, в якій технологія може бути успішно застосована індустріальними споживачами.

Отримано результативні дослідження лазерного ультразвуку протягом минулого десятиріччя. Цей успіх підіймає питання відносно напряму, в якому повинні зосередитися поточні і майбутні дослідницькі зусилля лазерного ультразвуку в університетських лабораторіях. Деякі напрями, в яких поточна робота над проблемою лазерного ультразвуку прогресувала, наведено нижче.

**Гібридні лазерні ультразвукові системи.** У багатьох випадках, можливість використовувати лазерний приймач для ультразвуку не здійснюється легко, внаслідок фізичного стану поверхні матеріалу. Крім цього, багато випадків, де використання лазерного ультразвуку могло би бути вигідним, не виправдовують витрати, які пов'язані з лазерним приймачем. Отже, робота проводиться, щоб оцінити можливості гібридних лазерних ультразвукових систем. Ці системи використовують надзвуковий лазерний передавач, але прийом ультразвуку ведеться, використовуючи електромагнітні акустичні перетворювачі або спарені перетворювачі, які базуються на неконтактному методі передачі.

**Лазерний надшвидкий ультразвук.** Типова лазерна ультразвукова апаратура використовує імпульсний лазер з Q-типом переключення, як надзвуковий передавач. Таке джерело виробляє ультразвук з широким частотним діапазоном від 0 Гц до 50 МГц. Для багатьох випадків наявність високої частоти лазерного ультразвуку дозволяє достатньо точно проводити вимірювання часу, щоб оцінити якості матеріалів в ряді структур. На жаль, цей частотний ряд не є достатнім, щоб виміряти час прольоту в тонких структурах, як, наприклад, шар покриття, що є меншим, ніж 1 нм. Однак, використовуючи лазерні надшвидкі ультразвукові пристрої, ця товщина покриття може бути виміряна. Ці методи вимірювань використовують лазери, які виробляють імпульси з субпікосекундною тривалістю. Ці імпульси генерують надзвукові хвилі з частотами в діапазоні 100 ГГц, які придатні для вимірювання тонких структур. У випадку з тонким покриттям, визначається не

тільки його товщина, але й характеристика зв'язку з підложкою також.

**Метод короткочасного лазерного збудження.** Для багатьох матеріальних систем, ультразвукові послаблюючі обмеження роблять недоцільними використання лазерних ультразвукових методів, щоб характеризувати матеріал. По суті, ультразвук не може розповсюдитись від передавача до одержувача. Однак, потреба визначати еластичні якості матеріалу дистанційно існує. Для цих матеріалів низькочастотні деформації тіла, спричинені лазерним збудженням, можуть використовуватися, щоб характеризувати матеріальну структуру. Методи лазерного удару продукують деформації всього тіла матеріалу тепловим розширенням, що вимірюються іншими приладами. Ці методи дозволяють створювати повну візуалізацію і аналізувати матеріальні деформації. За допомогою реєстрації і аналізування цих деформацій як функції часу після встановлення лазерного нагрівання інформація про структуру матеріалу може бути отримана відносно глибини і місцезнаходження дефектів в структурі. Навіть якщо ці методи не є надзвуковими, вони є дистанційними та неконтактними і можуть надати корисну інформацію про матеріал.

**Вивчення взаємодій матеріалів.** Для багатьох застосувань обробки матеріалів, використання лазерного ультразвуку є бажаним не тільки через дистанційну і неконтактну природу, але також через те, що лазерне джерело виробляє поздовжні і поперечні хвилі одночасно. Отже, інформація про поздовжній і поперечний модулі пружності матеріалу одержується в поодинокому вимірюванні і може використовуватися, щоб оцінити стан мікроструктури матеріалу. Робота на даний момент ведеться в напрямку отримання характеристик взаємодії лазерного ультразвуку з мікроструктурою матеріалу і як допомога в реальному масштабі часу під час контролю властивостей матеріалів.

Очевидно, лазерний ультразвук, узагальнений до деформацій, вимушених лазером, можна розширити, щоб включати пристрої, зв'язані з головним комп'ютером, які забезпечують багато корисної інформації про матеріали в ряді середовищ.

Таким чином, застосування ультразвуку піко-секундного діапазону для вимірювання параметрів багатошарових структур дає такі переваги: неруйнівне вимірювання, точність до  $10^{-10}$  м, час вимірювання до  $10^{-9}$  с (можливість вимірювання швидкоплинних процесів).

У короткому викладі показано, що ультразвукова техніка пікосекундного діапазону може використовуватися як дуже могутній неруйнівний метод для характеристики якості з'єднання структур ЗКНІ. За допомогою використання цього методу, з'ясовано, що можна виявити недосконалість в матеріалах ЗКНІ.

1. Abe T., Nakano M. and Itoh T. *Silicon-on-Insulator Technology and Devices* / Editor D. Schmidt. PV 90-6. P. 61. *The Electrochemical Society Proceedings Series, Pennington, NJ (1990)*. 2. Hovel H.J. *Silicon-on-Insulator Technology and Devices* / Editor S. Cristoloveanu. PV 94-11. P. 133. *The Electrochemical Society Proceedings Series, Pennington, NJ (1994)*. 3. Auld B.A. *Acoustic Fields and Waves in Solids*,

1990. Vol. 1. 2nd ed. P. 129. 4. *Angular Distribution of Rotons Generated by Alpha Particles in Superfluid Helium* / S.R. Bandler, S.M. Brouer, C. Enss, R.E. Lanou, T. More, F.S. Porter, and G.M. Seidel. *Phys. Rev. Lett.* 74. 3169. 1995. 5. *TIME DISPERSIVE EFFECTS IN ULTRASHORT LASER-TISSUE INTERACTIONS* G. Fibich Department of Mathematics UCLA Los Angeles, CA 6. *"Studies of Magnetically Levitated Liquid Helium* / M.A. Weilert, D.L. Whitaker and G.M. Seidel. *Phys. Rev. Lett.* November. 1996. 7. *Liquid Helium at Negative Pressure* // *Proceedings of the 21st International Conference on Low Temperature Physics. Prague. August 1996. Czech. J. Phys., to appear.* 8. Thomsen C., Grahn H. T., Maris H. J. and Tauc J. *Phys. Rev. Lett.* 1986. B. 34. 4129. 9. *Phonon Attenuation in Amorphous Solids Studied by Picosecond Ultrasonics*, Morath C.J. *Phys. Rev. B* 54. 1 1996. 10. *CNDE Summer 1998 Newsletter. Presentations of the Twelfth CNDE Annual Spring Meeting Center for Nondestructive Evaluation at The Johns Hopkins University* 11. *Observation of Exploding Electron Bubbles in Liquid Helium* / J. Classen and C.K. Su). *Phys. Rev. Lett.* 77. 2006. 1996.

УДК 536.532

## МЕТАЛІЗОВАНІ СТЕКЛА І ЕЛЕМЕНТАРНА СТРУКТУРА АМОРФНОГО СТАНУ

© Пилип Скоронад, 2000

Державний Університет "Львівська політехніка", кафедра «Інформаційно - вимірювальна техніка», вул. С. Бандери, 12, 290013, Львів, Україна

***Аналізуються проблеми опису структури металізованих стекол і пропонується застосування елементарних аморфних структур.***

***Анализируются проблемы описания структуры металлических стекол и предлагается применение элементарных аморфных структур.***

***The problems of the description of a structure of metal glasses are analyzed and the application elementary amorphous of structures is offered.***

Автентичність математичних моделей, що застосовуються для інтерпретації експериментальних досліджень структурного стану металізованих стекол визначається, переважно, перш за все їх здібністю репродукувати експериментально отриману функцію радіального розподілу атомів (ФРРА). Проте, існуючі моделі, що базуються на основі хаотичного щільного пакування певних структурних елементів з наступною релаксацією енергії — не цілком задовольняють поставлені вимоги.

Аналізуючи проблеми моделювання металізованих аморфних стопів слід мати на увазі, що при заданих густині та температурі структура визначається парними потенціалами міжчасткової взаємодії, а поблизу температури топлення металів параметри ближнього порядку в твердому та рідкому станах змінюються незначним чином [1]. Для визначення таких параметрів ближнього порядку як міжатомні віддалі та координаційні числа, зважаючи на експериментально зняту криву інтенсивності чи структурний чинник, необхідно функ-