

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 Скоропад, 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-

цію радіального розподілу атомів, що пов'язано з рядом труднощів. В першу чергу – з обмеженістю експериментальної інформації про інтенсивність розсіювання рентгенівських променів та неоднозначністю результатів розрахунку координаційних чисел, що значною мірою залежать від вибору методики та інтерпретації ФРРА [2, 3].

Беручи до уваги складність розрахунків структурних характеристик аморфних систем, яка значно збільшується при спробі переходу до полікомпонентних, з метою спрощення цієї процедури пропонується такий модельний підхід до визначення структури аморфного стану.

Припустимо, що структурний стан аморфної системи, при відсутності теплових коливань, в околицях абсолютного нуля – поняття суто статичне і зводиться до того, що інтегральна сила, яка діє на  $i$ -ий атом дорівнює нулеві. Тоді, в наближенні парної взаємодії, запишемо:  $\vec{F}_i = \sum_j \vec{F}_{i-j}$ , де  $\vec{F}_i$  та  $\vec{F}_{i-j}$  - відповідно, інтегральна та діюча на  $i$ -ий атом, з боку решти атомів, сили. Якщо парний міжатомний потенціал  $\psi(r)$  має вигляд:

$$\psi(r) = A \cdot r^{-D}, \quad (1)$$

то трансформування координат  $\vec{r} \rightarrow V \cdot \vec{r}$  спричиняє зміну всіх парних потенціалів у  $V^{-D}$  разів, а сил міжатомної взаємодії – в  $V^{-(D+1)}$  разів. Оскільки і в цьому випадку  $\vec{F}_i = 0$ , то аморфна система залишається рівноважною.

Якщо  $N$  – кількість частинок, а  $V$  – їх об'єм – питомий об'єм однієї можна подати через параметр  $d$ :

$$d^3 = V/N, \quad (2)$$

а  $\rho$  в цьому випадку виражається так:  $\rho = 1/d$ .

Враховуючи наведені вище викладки, можна стверджувати, що для структури аморфної системи при заданих потенціалі та значенні  $D$  парна кореляційна функція  $g(\rho)$  та структурний чинник  $Q(k')$ , де  $k' = kd$  - інваріантні відносно густини. Отже, згадані вище структури можна трактувати як елементарні структури аморфного стану (ЕЛСТРАС) з визначником  $D$  та застосовувати їх як базові.

Запишемо вираз для потенціальної енергії  $U_n$  аморфної системи:

$$U_n = 2\pi N \frac{N}{V} \int_0^\infty \psi(r)g(r)r^2 dr = 2\pi N \int_0^\infty \psi(\rho d)g(\rho)\rho^2 d\rho. \quad (3)$$

Якщо  $g(\rho) = g_D(\rho)$  оптимізація потенціальної енергії системи за густиною дає змогу встановити значення визначника  $D$ , що оптимально апроксимує дійсну та рівноважну густину.

Застосуємо ЕЛСТРАС для апроксимування структурного стану металізованих стекел для випадку, коли система описується парним потенціалом Леннарда – Джонса:

$$\psi(r) = \varepsilon \left[ \left( \frac{r_0}{r} \right)^{12} - 2 \left( \frac{r_0}{r} \right)^6 \right], \quad (4)$$

тут  $\varepsilon$  – глибина потенціальної ями,  $r_0$  – координата її мінімуму.

Переважно, при розрахунках як методами молекулярної динаміки, так і статичної релаксації, доводиться відтнути радіус дії потенціалу і  $\rho_{\text{відс}} = r_{\text{відс}}/r_0$ , а отже, в тракці релаксування в (3) верхня межа сягає лише значення  $r_{\text{відс}}$ . Таким чином, знайдена за (3) потенціальну енергію  $U$  слід доповнити доданком  $\Delta U$ , що визначається як:

$$\Delta U = 2\pi N \int_{\rho_{\text{відс}}}^\infty \psi(\rho d)g(\rho)\rho^2 d\rho. \quad (5)$$

Вираз (5) розкладається на суму двох:  $\Delta U_1$  - від  $\rho_{\text{відс}}$  до  $\rho_{\text{max}}$  та  $\Delta U_2$  - від  $\rho_{\text{max}}$  до  $\infty$ . Тут  $\rho_{\text{max}}$  – максимальна віддаль, до якої визначена функція  $g(\rho)$ , що приблизно становить половину максимальної довжини ребра основного куба. Слід додати, що  $\Delta U_2$  можна лише оцінити за умови  $g(\rho) = 1$ , оскільки функція  $g(\rho)$  при  $\rho > \rho_{\text{max}}$  невідома.

З метою апроксимування структури аморфної системи з потенціалом Леннарда – Джонса за допомогою ЕЛСТРАС визначаємо відношення  $U/N\varepsilon$ , використовуючи як  $g(\rho)$  парні кореляційні функції, отримані методом статичного релаксування для розмаїтих значень визначника  $D$ . Для всіх значень  $r_0$  відношення  $U/N\varepsilon$  має мінімум при  $D = 15 \dots 16$ . Для реальної аморфної структури з потенціалом Леннарда – Джонса та густиною  $85.49$  атом/нм<sup>3</sup> (основний куб з ребром  $2.002$  нм; кількість атомів –  $686$ ) і апроксимованої за допомогою ЕЛСТРАС – розходження значень структурних параметрів не перевищує  $0.5\%$  (див. таблицю).

**Параметри реальної аморфної структури з потенціалом Леннарда – Джонса та апроксимованої за допомогою ЕЛСТРАС**

Структурні характеристики				
r <sub>0</sub> , нм	Система з потенціалом Леннарда – Джонса	Система, апроксимована за допомогою ЕЛСТРАС		
	- U/Nε	Значення визначника D	- U/Nε	Δ U/Nε, %
0.250	7.6265	15.51	7.6591	-0,427
0.255	7.7779	15.49	7.7970	-0,245
0.260	7.7738	15.45	7.7558	0,231

Функції парного розподілу для цих двох випадків також достатньо добре узгоджені у всьому інтервалі віддалей.

Оскільки лише за самою ФРРА не можна мати повної уяви про локальне впорядкування в системі, слід вдатися до статистико–геометричного аналізу неупорядкованих систем, базуючись на теоретичних засадах багатогранників Вороного [4].

Так, нехай маємо множину точок N<sub>1</sub>...N<sub>n</sub> в тривимірному просторі E. В такому випадку багатогранник Вороного V<sub>i</sub> для даного центра N<sub>i</sub> визначається сукупністю точок в просторі E, котрі є ближче до N<sub>i</sub>, ніж до N<sub>j</sub> [5]:

$$V_i = \{x \in E : R(x, N_i) \leq R(x, N_j), j = 1, 2, \dots, n\}, \quad (6)$$

де R – відстань між точками. Оскільки багатогранники випуклі, то простір E розбивається єдиним чином. Отже, сукупність багатогранників Вороного, що відповідає певній конфігурації, однозначно її визначає та дає статистичний опис.

Для випуклого багатогранника, що має відповідно певну кількість вершин, граней та ребер (N<sub>v</sub>, N<sub>r</sub>, N<sub>p</sub>), справджується залежність Ейлера: N<sub>v</sub>+N<sub>r</sub> = N<sub>p</sub>+2. Для аморфних систем імовірність сходимості у вершині даного багатогранника Вороного більше трьох ребер – незначна, оскільки такі композиції нестійкі відносно малих зміщень ближніх сусідів (при зміщенні будь-якої грані вершина розчленовується на кілька таких, де сходяться по три ребра). Враховуючи, що N<sub>p</sub> = (3/2)N<sub>v</sub>, N<sub>r</sub> = Σ<sub>i</sub>n<sub>i</sub>, N<sub>v</sub> = (1/3)Σ<sub>i</sub>in<sub>i</sub> та залежність Ейлера, отримаємо n<sub>i</sub> – кількість граней з i вершинами:

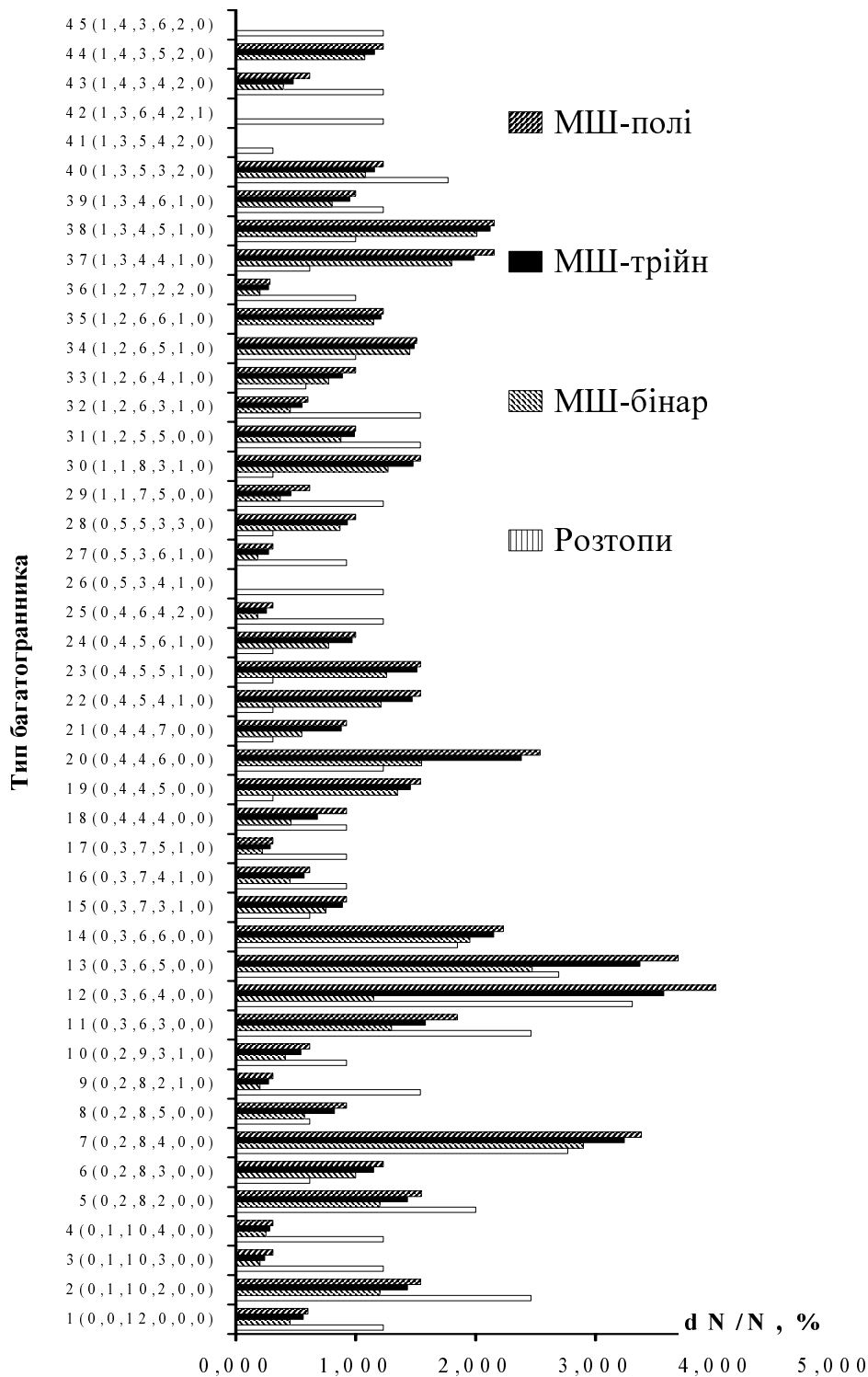
$$n_i = 12 / \left( \sum_i (6 - i) \right). \quad (7)$$

Проаналізувавши статистичний розподіл багатогранників за набором індексів (n<sub>3</sub>, n<sub>4</sub>, n<sub>5</sub>, n<sub>6</sub>, ..., n<sub>8</sub>) для рідких та аморфних систем (див. рисунок), слід

відзначити, що в рідких системах найчастіше зустрічаються такі типи багатогранників: (0,3,6,4), (0,2,8,4), (0,3,6,5), (0,1,10,2), (0,4,4,6), частка яких при пониженні температури зростає. Прикметним є те, що в обох системах наявна значна кількість багатогранників типу (0,3,6,5), (0,4,4,6), (0,3,6,6), (0,4,4,7), що характерні для ГЦК ґратки, спотвореної тепловими флуктуаціями. Також цікавим є факт відсутності в аналізованих системах багатогранників типу (0,6,0,8), що описують ОЦК ґратку.

При описі структури важливою є ідентифікація ближчих сусідів. Переважно, такими вважають атоми, що знаходяться ближче певного лінійного параметра, але це визначення не зовсім конкретне. Використовуючи засади теорії багатогранників Вороного, маємо змогу однозначно визначити ближчих сусідів. Для цього введемо поняття суміжних атомів: пари атомів N<sub>i</sub>-N<sub>j</sub>, що мають спільну грань багатогранника. Два атоми, суміжні даному – ребро багатогранника, всі точки якого перебувають на однаковій віддалі від всіх трьох суміжних точок, а вершина – на однаковій віддалі від чотирьох суміжних точок. Отже, ближчими сусідами атома є всі йому суміжні. Очевидно, що сума індексів n<sub>k</sub> багатогранника i-го атома, визначає кількість його ближчих сусідів чи локальне геометричне координаційне число (не слід ототожнювати зі статистичним координаційним числом, яке визначається з отриманих експериментально ФРРА).

Слід також відзначити, що важливим фактом при дослідженні структурного стану рідких та аморфних систем статистичними методами – є виявлена, в результаті кореляційного аналізу, структурна подібність багатоконпонентних і потрійних металізованих стекел та розтопів, оскільки чинник кореляції для них відповідно становить R<sub>6</sub> = 0.4934 та R<sub>3</sub> = 0.4684, а для подвійних - R<sub>2</sub> = 0.3118.



*Відносна частка найпоширеніших типів структурних елементів, що зустрічається в розтопах, а також в подвійних, потрійних та полікомпонентних металізованих стеклах*

Виявлена кореляція, в свою чергу, добре узгоджується із теоретично та експериментально визначеними характеристиками стабільності аморфних

систем. Так, найбільш структурно стійкими є багатоконпонентні та потрійні аморфні системи, а, відповідно, найменш – однокомпонентні, оскільки

останні взагалі проблематично отримати в аморфному стані.

Отже, проведені дослідження аморфних систем ще раз підтверджують важливу гіпотезу їх структурної подібності з розтопами, що має як суто теоретичне, так і прикладне значення.

1. Ватолин Н.А., Пастухов Э.А. Дифракционные исследования строения высокотемпературных расплавов. М.: Наука, 1980. 189 с. 2. Межчастичное

взаимодействие в жидких металлах / Ухов В.Ф., Ватолин Н.А., Гельчинский Б.Р. и др. М.: Наука, 1979. 195 с. 3. Пинге С. В кн.: Физика простых жидкостей. Экспериментальные исследования. М.: Мир, 1973. С.9 – 66. 4. Collins R. Melting and statistical geometry of simple liquids. // Phase transition and critical phenomena. New York. 1972. № 2. P.271 – 303. 5. Brostow W., Dussault J. - P., Bennet L.F. Construction of Voronoi polyhedra. // J. Comput. Phys. 1978. 29. №1. P. 81-92.

УДК 621.317.39

## ЗМЕНШЕННЯ ВПЛИВУ АДТИВНИХ ЗАВАД ПРИ ВИКОРИСТАННІ ІНТЕГРУЮЧОГО КОМПАРАТОРА (ІК) У ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ ФАЗА-КОД

© Наталія Гоц, Віктор Засименко, 2000

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

*У статті розглядається метод підвищення завадостійкості перетворювачів фаза-код. Подана структурна схема та принцип роботи перетворювача. Розглянута математична модель і показана ефективність цього методу порівняно з існуючими.*

*В статье рассматривается метод повышения помехоустойчивости преобразователей фаза-код. Представлена структурная схема и принцип работы преобразователя. Рассмотрена математическая модель и показана эффективность этого метода по сравнению с существующими.*

*In this article was considered method to rising noise immunity of phase-code transfers. A structural scheme and principle of doing transfer is represented. A mathematical model was considered and shown effectiveness of this method on comparison with being.*

Перетворювачі фаза-код широко використовуються в пристроях для вимірювання кутових та лінійних переміщень.

Метод перетворення фазового зсуву в код, заснований на виділенні пропорційного інтервалу часу, має низьку завадостійкість до адитивних завад. Цей недолік зумовлений використанням компараторів миттєвого значення напруги (КН) для фіксації моменту переходу досліджуваного сигналу через нульовий рівень [1]. При наявності сигналу завади  $U_3(t)$  тільки по одному каналу похибка визначення зсуву фаз  $\Delta\varphi$  визначається як [2]:

$$\Delta\varphi = \arcsin \frac{A_3}{A_1} \approx \frac{A_3}{A_1}, \text{рад} \quad (1)$$

де  $A_3$  – амплітуда сигналу завади;  $A_1$  – амплітуда вхідного сигналу.

Підвищити завадостійкість перетворення фазового зсуву в код при збереженні швидкодії можливо при визначенні моменту переходу основної гармоніки досліджуваного сигналу через нульовий рівень, як координати центру її непарної симетрії на визначеному інтервалі часу [3].

Структурна схема пристрою для реалізації цієї функції, інтегруючого компаратора (ІК), зображена на рис.1. [4].

Рівняння функціонування ІК має вигляд

$$\int_{t_1}^{t_2} [U_1(t) + U_3(t)] dt = 0 \quad (2)$$

де  $U_1(t)$  – сигнал напруги основної гармоніки;  $\omega$  – частота;  $t_2 - t_1 = T_i$  – час інтегрування.