

*“ФІЗИКА НЕВПОРЯДКОВАНИХ СИСТЕМ”*

*(Львів, 16 жовтня 2018 року)*

*“PHYSICS OF DISORDERED SYSTEMS”*

*(Lviv, October 16, 2018)*

## ЯРОСЛАВ ДУТЧАК: ТАЛАНТ, ПРАЦЯ ТА ІНТУЇЦІЯ

*Степан Мудрий*

Львівський національний університет імені Івана Франка, кафедра фізики металів

Ярослав Йосипович Дутчак був надзвичайно талановитою людиною і мав велике бажання працювати. Він міг стати не тільки фізиком, а й математиком чи хіміком, міг бути добрим митцем чи кваліфікованим лікарем. Маючи добре розвинуте почуття гумору, він швидко знаходив контакт з людьми, що давало йому добрі шанси успішно працювати в різних професійних колективах. Він 1956 року успішно закінчив Львівський університет і скерований на роботу на фізичний факультет університету.

Так сталося, що серед наявних на ту пору наукових напрямків Ярослава Йосиповича найбільше зацікавив рідкий стан речовини. Теоретичне вивчення структури рідин було предметом досліджень і професора Глаубермана А. Ю., декана фізичного факультету, який був ініціатором створення нових наукових напрямків. У межах квазікристалічної теорії рідких металів був розроблений метод “розмиття” кристалічної ґратки для розрахунку функції атомного розподілу, відомий як метод Принса–Глаубермана. Ярослав Йосипович застосував цей метод до інтерпретації своїх результатів із розсіяння X-променів рідкими металами.

Основні наукові результати, отримані на кафедрі рентгенометалофізики під керівництвом проф. Дутчака Я. Й. дістали світове визнання, про що свідчать численні цитування в багатьох періодичних виданнях та монографіях відомих учених. Також додатковим свідченням є те, що в Ярослава Йосиповича учнями були крім наших аспірантів, й аспіранти з інших країн. Його запрошували на закордонні конференції не лише для виступу з доповіддю, але також як члена оргкомітету.

Найбільше уваги проф. Дутчак Я. Й. приділяв вивченню структури та фізичних властивостей рідких металів і багатокомпонентних металевих розплавів. Результати дифракційних досліджень таких розплавів були отримані в той час, коли фізика рідкого стану починала бурхливо розвиватися як у теоретичному, так і практичному напрямках. Саме тоді узагальнення зі структури рідких металів з різним типом кристалічної будови, які Ярослав Йосипович репрезентував, були використані для встановлення закономірностей формування структури і прогнозування особливостей атомного впорядкування за зміни термодинамічних параметрів (тиск, температура, зовнішні впливи).

Іншою важливою ділянкою в цьому науковому напрямку було вивчення структури подвійних і потрійних евтектик.

Систематичні дослідження такого типу розплавів були вперше проведені у Львівському університеті, що дало змогу говорити про створення наукової школи з вивчення евтектичних систем. Ця школа має значний доробок і продовжує успішно розвиватися й досі. Актуальність досліджень, проведених протягом 60–80 рр. минулого століття, посилилась в наші дні. Зокрема, поняття кластера як структурної одиниці розплаву стало важливим елементом структури сучасної нанофізики та технологій. Результати з вивчення легкоплавких подвійних та потрійних евтектичних розплавів почали використовуватися під час створення нових сплавів для паяння, плавких запобіжників, матриць для рідинних нанокомпозитів, магнітних рідин, нових ливарних сплавів тощо.

Також відзначимо намагання проф. Дутчака Я. Й. застосувати комп’ютерні методи для вивчення структури розплавів, незважаючи на те, що в ті часи фактично не було широкого використання потужних комп’ютерів. Зазначимо його високу інтуїцію в застосуванні комп’ютерних методів (молекулярна динаміка, метод Монте Карло, обернений метод Монте Карло) до вивчення структури рідин. Результати, отримані завдяки використанню цих методів, широко застосовують тепер, зокрема і науковці кафедри фізики металів.

## ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВІВ $\text{Sn}_{96,5}\text{Ag}_3\text{Cu}_{0,5}$ У ДІЛЯНЦІ ПЛАВЛЕННЯ–КРИСТАЛІЗАЦІЯ

*О. Ткач*

Львівський національний університет імені Івана Франка

Ділянку плавлення–кристалізації нанокмпозитних сплавів  $\text{Sn}_{96,5}\text{Ag}_3\text{Cu}_{0,5}$  з незначними домішками вуглецевих нанотрубок (від 0,005 до 0,03 мас. %) досліджено за результатами вимірювання питомого електричного опору чотиризонним методом. Зразки були виготовлені у вигляді тонких стрічок методом швидкого загартування з розплаву. На кривих температурної залежності електричного опору виявлено гістерезис між кривими нагрівання та охолодження в діапазоні температури плавлення і кристалізації, зумовлений нерівноважною кристалізацією, в умовах якої плавлення і кристалізацію не можна вважати повністю зворотними процесами.

Проаналізовано вплив умісту вуглецевих нанотрубок на значення питомого електроопору. Встановлено, що додавання вуглецевих нанотрубок до сплаву  $\text{Sn}_{96,5}\text{Ag}_3\text{Cu}_{0,5}$  у досліджуваному діапазоні концентрацій не погіршує електричних властивостей а отже, не повинно мати негативного впливу на функціональні характеристики цих сплавів, що є базовими матрицями для безсвинцевих припоїв.

## СТРУКТУРНА МІКРОГЕТЕРОГЕННІСТЬ ЕВТЕКТИКИ Ga–Sn

*С. І. Мудрий, Р. М. Білик*

Львівський національний університет імені Івана Франка, кафедра фізики металів

Цікавість до евтектичних сплавів зумовлена фундаментальним і практичним інтересом. Сфера їх використання є доволі широкою. Це пояснюється як і давньою історією їх досліджень, так і специфічними структурою та фізичними властивостями порівняно з іншими сплавами. Наприклад, для деяких з них характерні низькі температури плавлення, аномальна зміна свого об'єму після плавлення/кристалізації, а також широкий інтервал існування в рідкій фазі.

Евтектики завдяки їхнім структурним особливостям можна застосовувати як припої. Особливо актуальне це питання тепер з огляду на поступову заміну свинцевих припоїв, які широко використовувались донедавна. Як свідчать літературні дані, більшість евтектичних розплавів характеризуються мікрогетерогенною структурою, що формується мікрообластями атомів одного сорту. Тобто в евтектиках енергія взаємодії односортних атомів більша за енергію взаємодії різносортних.

У цій роботі досліджено евтектичний сплав системи Ga–Sn. Вона утворена елементами, ступінь мікронеоднорідності яких у рідкому стані досить високий.

Методом дифракції X-променів отримано структурний фактор цієї системи за температури 293 К. Незважаючи на переважання умісту галію в розплаві, структурний фактор евтектики суттєво зміщений у бік положення структурного фактора олова. Також структурний фактор дослідженого розплаву має наплив на правій вітці, положення якого збігається з аналогічним напливом для рідкого галію. Положення 1-го максимуму займає проміжне значення стосовно аналогічних параметрів рідких компонент. Отже можна стверджувати, що структура розплаву є мікронеоднорідною й залишкові ковалентні зв'язки, що існують у рідких Ga та Sn, зберігаються і в розплавленій евтектиці.

## ЧАСОВА СТАБІЛЬНІСТЬ G-ІНДУКОВАНИХ ЗМІН КРАЮ ПОГЛИНАННЯ АМОРФНИХ ПЛІВОК GeSe

*Р. Р. Романюк<sup>1</sup>, О. Г. Миколайчук<sup>2</sup>, В. І. Присяжнюк<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Західний науковий центр НАН України і МОН України, Львів

<sup>2</sup>Львівський національний університет імені Івана Франка

Невпорядковані матеріали, які використовують для створення електронних пристроїв, часто піддаються цілеспрямованим чи неконтрольованим зовнішнім впливам. Це — додаткова обробка з метою досягнення оптимальних властивостей (посттехнологічна модифікація), а також тривала експлуатація (старіння). Тому викликає зацікавленість вивчення часової стабільності радіаційно-індукованих ефектів.

Об'ємні сплави GeSe отримували у кварцових ампулах синтезом вихідних компонент високого класу чистоти за  $T = 1000^\circ\text{C}$  протягом 10 год з використанням стандартної методики перемішування розплаву й загартування в холодній воді. Плівкові конденсати отримували на установці ВУП-5 методом дискретного термічного випаровування на підкладки із ситалу та кварцу за температури

$T_p = 293$  К з наступним відпалом у вакуумі за  $T = 350$  К. Товщину плівок (0.3–1.2 мкм) визначали з використанням оптичного інтерферометра. Структурні дослідження плівок проводили рентгенодифракційним методом на ДРОН-4-07 (схема фокусування за Бреггом–Брентано,  $\text{Cu}_{k\alpha}$ -випромінювання). Вимірювали оптичні спектри пропускання й відбивання в спектральному діапазоні 500–1200 нм. Плівки GeSe опромінювали  $\gamma$ -квантами ізотопу  $^{60}\text{Co}$  (1.25 MeV) потужністю 25 Гр/с поглинутими дозами  $D = 10^2 - 10^6$  Гр. Спектроскопічні дослідження плівок GeSe проведено через місяць, рік і два роки після впливу радіації.

Унаслідок опромінення  $\gamma$ -квантами із середньою енергією 1.25 MeV аморфних плівок GeSe зміни оптичних властивостей наступають за поглинених доз  $D = 10^4 - 10^6$  Гр і супроводжуються низькоенергетичним зміщенням краю фундаментального поглинання та зменшенням оптичної щільності  $E_0$  на 0.06–0.14 eV. Спостережувані радіаційно-індуковані ефекти на краю фундаментального оптичного поглинання нестабільні в часі й частково згасають протягом року зберігання в нормальних умовах. Рентгенодифрактографічні дослідження плівок свідчать про структурне впорядкування плівок у ближньому оточенні атомів з часом.

Рентгенодифрактограми неопромінених і  $\gamma$ -опромінених плівок GeSe характеризуються дифузним дифракційним максимумом складної форми, який свідчить про структурні кореляції на проміжних відстанях. За дози опромінення  $10^6$  Гр зростає інтенсивність цього максимуму, що вказує на збільшення структурної кореляції на відстані 10–14 Å. На отриманій через рік дифрактограмі від неопромінених плівок  $a$ -GeSe на фоні широкого дифузного максимуму за  $2\theta = 29.6^\circ$  проявляється неінтенсивний гострий дифракційний пік, який може вказувати на процеси структурного впорядкування у ближньому оточенні атомів з часом. На дифрактограмах плівок, які опромінені  $\gamma$ -квантами  $10^4 - 10^6$  Гр, після витримки протягом року наявний інтенсивніший пік, що свідчить про більшу схильність  $\gamma$ -опромінених плівок до структурного впорядкування під час старіння.

Радіаційно-стимульовані зміни фізичних властивостей аморфних конденсатів  $a$ -GeSe пояснюються деструкційно-полімеризаційними перетвореннями в структурі плівок.

## СТРУКТУРНІ ПЕРЕБУДОВИ В ТОНКИХ ПЛІВКАХ НА ОСНОВІ GaSb

*Н. Луцук, О. Миколайчук*

Львівський національний університет імені Івана Франка, Україна, кафедра фізики металів

Методами електронографії та просвітлювальної електронної мікроскопії вивчено термічну стійкість та кінетику кристалізації аморфних плівок систем GaSb–Sn, GaSb–Sb та GaSb–Ga. Плівки товщиною близько 500 Å отримували методом дискретного випаровування у вакуумі. Підкладками слугували сколи лужно-галоїдних монокристалів, скло та ситал. Електропровідність аморфних плівок систем досліджували в температурному діапазоні 100–600 К.

Як показали електронографічні дослідження, зі збільшенням концентрації Sn у системі GaSb–Sn термічна стійкість аморфних плівок знижується. Причому найбільш різкий спад термічної стійкості спостерігається за високих концентрацій Sn. У системі GaSb–Sn аморфні плівки, осаджені за кімнатної температури, формуються лише в концентраційному діапазоні 0–50 ат.% Sn (0–33 моль.% Sn<sub>2</sub>). Первинною фазою кристалізації в системі GaSb–Sn є кристаліти  $\beta$ -Sn. При цьому на електронограмах на фоні дифузних “гало” чітко фіксуються найбільш інтенсивні лінії  $\beta$ -Sn ( $d_{200} = 2.916$  Å;  $d_{101} = 2.793$  Å;  $d_{211} = 2.017$  Å). На концентраційно-температурній залежності термічної стійкості аморфних плівок системи GaSb–Sn виявлено широку зону існування напіваморфних плівок, які становлять собою напівпровідникову аморфну матрицю на основі GaSb з включеннями металевих кристалітів  $\beta$ -Sn. Залежно від складу плівок, а також температури і швидкості нагріву виявляється можливим формувати напіваморфні плівки з густиною й розмірами влючень  $\beta$ -Sn у широких межах ( $\rho = 5 \cdot 10^8 - 10^{11}$  см<sup>-2</sup>,  $d = 50 - 2000$  Å). Причому зі збільшенням швидкості неперервного нагріву зростає густина влючень мікрокристалітів  $\beta$ -Sn, а зі збільшенням умісту Sn і підвищенням температури зростають розміри мікрокристалітів  $\beta$ -Sn.

На залежностях стагічної електропровідності аморфних плівок системи GaSb–Sn від оберненої температури лише за високих температур спостерігаються лінійні ділянки. Лінійна залежність питомої електропровідності в моттівських координатах у доволі широкому температурному інтервалі вказує на стрибкову провідність по локалізованих станах навколо рівня Фермі. Для аморфних плівок системи GaSb–Sn мінімальна густина локалізованих станів  $N(E_F) = 4.08 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>eV<sup>-1</sup> спостерігається для плівок GaSb. Зі збільшенням умісту Sn в аморфних плівках спостерігається значне збільшення густини локалізованих станів на рівні Фермі ( $8.51 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>eV<sup>-1</sup> для (GaSb)<sub>0.75</sub>(Sn<sub>2</sub>)<sub>0.25</sub>). У цій системі температурна межа переходу від стрибкового механізму провідності по локалізованих станах навколо рівня Фермі до активаційного механізму провідності зміщується в зону нижчих температур зі збільшенням концентрації Sn в аморфних плівках. Енергія активації процесу електропровідності аморфних плівок GaSb–Sn змінюється зі складом від 0.32 eV для GaSb до 0.26 eV для