

DOI: 10.35681/1560-9189.2022.24.2.274924

УДК 535.3; 539.213; 539.232; 546.492; 548.3

В. М. Рубіш<sup>1</sup>, С. М. Гасинець<sup>1,2</sup>, М. О. Дуркот<sup>1</sup>, А. І. Макар<sup>1</sup>,  
Р. П. Пісак<sup>1</sup>, В. О. Стефанович<sup>3</sup>, Т. І. Ясінко<sup>1</sup>,  
С. А. Костюкевич<sup>4</sup>, К. В. Костюкевич<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Інституту проблем реєстрації інформації НАН України  
вул. Замкові сходи, 4, 88000 Ужгород, Україна  
center.uzh@gmail.com

<sup>2</sup>Інститут електронної фізики НАН України  
вул. Університетська, 21, 88000 Ужгород, Україна

<sup>3</sup>Ужгородський національний університет  
площа Народна, 3, 88000 Ужгород, Україна

<sup>4</sup>Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова  
Проспект Науки, 41, 03028 Київ, Україна

## Вплив лазерного випромінювання та парів ртуті на структуру аморфних плівок $Se_{100-x}Te_x$

*Методом раманівської спектроскопії досліджено структуру ближнього порядку номінально чистих і витриманих у парах ртуті аморфних плівок  $Se_{100-x}Te_x$  ( $0 \leq x \leq 15$ ). Встановлено, що матриця номінально чистих плівок побудована в основному структурними угрупованнями  $Se_8$  і містить спіральної ланцюжки  $Se_n$  різної протяжності, в яких частина атомів  $Se$  заміщена атомами  $Te$ . Процес заміщення  $Se$  на  $Te$  супроводжується зміщенням смуги при  $236 \text{ см}^{-1}$  в раманівському спектрі аморфної плівки  $Se$  в ділянці  $210\text{--}214 \text{ см}^{-1}$  у спектрах плівок  $Se_{100-x}Te_x$ . При певних режимах лазерного опромінення ( $\lambda_{36} = 532 \text{ нм}$ ) плівки системи селен-телур кристалізуються. Модифікування аморфних плівок  $Se_{100-x}Te_x$  ртуттю призводить до формування в їхній матриці кристалічних включень селеніду ртуті.*

**Ключові слова:** халькогенідні аморфні плівки, раманівські спектри, структура, структурні перетворення, сенсорні елементи.

### Вступ

При дослідженні планарних структур «шар Ni – аморфна плівка Se – шар Ni» було встановлено, що електричний опір  $R$  плівок селену при їхній витримці в парах ртуті зменшується на 4–6 порядків [1–3], причому швидкість переходу з висо-

© В. М. Рубіш, С. М. Гасинець, М. О. Дуркот, А. І. Макар, Р. П. Пісак,  
В. О. Стефанович, Т. І. Ясінко, С. А. Костюкевич, К. В. Костюкевич

коомного стану до низькоомного зростає при збільшенні концентрації ртуті та температури оточуючого середовища. Причиною такого суттєвого зменшення  $R$  модифікованих ртуттю плівок Se, на думку авторів даних робіт, є формування в їхній аморфній матриці кристалічних включень селеніду ртуті (HgSe). Результати досліджень аморфних плівок Se, витриманих у парах ртуті, методами X-променевої дифрактометрії, раманівської спектроскопії і скануючої електронної мікроскопії свідчать про правомірність даного припущення [4, 5]. Різке зменшення  $R$  аморфних плівок Se при їхньому модифікуванні ртуттю свідчить про можливість їхнього використання як чутливих елементів сенсорів наявності ртутних парів у повітрі. Однак, широке використання аморфних плівок селену обмежене досить низькими їхніми температурами розм'якшення  $T_g$  і кристалізації  $T_c$  [6–8]. Підвищити ці параметри плівок і, відповідно, підвищити їхню стабільність, можна шляхом уведення до селену інших елементів, наприклад, телуру, германію, миш'яку, сурми [7, 8]. Перехід від аморфних плівок Se до плівок подвійних систем дозволяє розширити клас матеріалів, які можуть бути використані як чутливі елементи сенсорів ртутних парів.

На даному етапі досліджень за такий елемент був обраний телур, оскільки він є ізоструктурним із селеном, а в системі Se-Te утворюється неперервний ряд твердих розчинів [7, 8]. Використання аморфних плівок системи селен-телур, як чутливих елементів сенсорних систем, потребує всебічного вивчення їхньої структури ближнього порядку та структурних перетворень, які відбуваються в плівках під дією різних чинників, морфології поверхні, електричних та оптичних властивостей.

У даній роботі наведено результати досліджень методом раманівської спектроскопії структури номінально чистих і модифікованих ртуттю аморфних плівок  $\text{Se}_{100-x}\text{Te}_x$  та структурних перетворень, які проходять у них під дією лазерного випромінювання.

## Методика експерименту

Аморфні плівки Se,  $\text{Se}_{100-x}\text{Te}_x$  ( $x = 3, 5, 10, 15$ ) та полікристалічні плівки Te товщиною від 50 до 1000 нм одержували методом вакуумного випаровування склоподібного селену, полікристалічних сплавів  $\text{Se}_{100-x}\text{Te}_x$  та кристалічного Te із квазізамкнених ефузійних комірок на невідігрівані скляні підкладки. Модифікування аморфних плівок здійснювалось у спеціальних герметичних контейнерах шляхом їхньої витримки в парах ртуті протягом 24 год. при температурі 293 К. Дослідження раманівських спектрів аморфних плівок  $\text{Se}_{100-x}\text{Te}_x$  проводилися при  $T_{\text{кімн.}}$  на раманівському мікроскопі Xplora Plus фірми Horiba Scientific ( $\lambda_{\text{зб.}} = 532$  нм). Вимірювання проводилося при різних потужностях лазерного випромінювання та режимах експозиції: PI — (0,1 мВт, 2 с, 5 імп.); PII — (0,1 мВт, 5 с, 2 імп.); PIII — (1 мВт, 2 с, 5 імп.); PIV — (1 мВт, 5 с, 2 імп.); PV — (1 мВт, 12 с, 1 імп.).

## Результати та їхнє обговорення

Дослідження показали, що раманівський спектр аморфної плівки Se, знятий у режимі PI, містить інтенсивну смугу при  $253\text{ см}^{-1}$  і особливості при 87, 115, 135–143 та  $236\text{ см}^{-1}$ , а спектр полікристалічної плівки Te, знятий у режимі PIII, містить

інтенсивні гострі смуги при  $124$  і  $144$   $\text{см}^{-1}$  і ряд менш виражених смуг при  $96$ ,  $105$  і  $271$   $\text{см}^{-1}$  (рис. 1). Подібні особливості було виявлено і в раманівському спектрі полікристалічної плівки  $Te$ , виміряному на спектрометрі Horiba Jobin-Yvon [9]. Для збудження раманівських спектрів у цій роботі використовувалися лазери з  $\lambda_{зб.} = 671$ ,  $532$  і  $475$  нм. Було встановлено, що як за положенням, так і за інтенсивністю спектри плівок телуру добре збігаються. Різниця в положенні смуг, визначених при різних  $\lambda_{зб.}$  складає  $1\text{--}2$   $\text{см}^{-1}$ . Раманівські спектри плівок  $Te$  містять інтенсивні смуги при  $120$  і  $139$   $\text{см}^{-1}$  та низку менш виражених смуг і особливостей при  $81$ ,  $90$ ,  $101\text{--}104$  та  $266\text{--}268$   $\text{см}^{-1}$  [9].

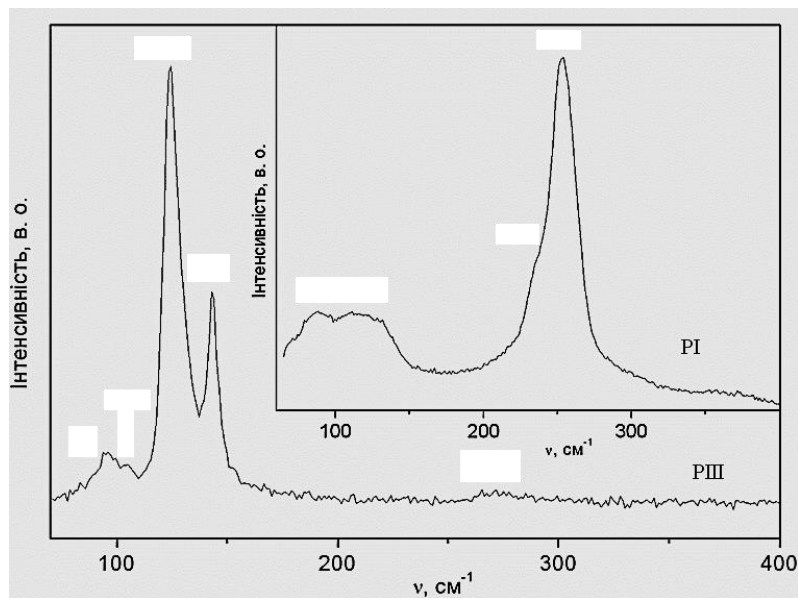


Рис. 1. Раманівські спектри полікристалічної плівки  $Te$  та аморфної плівки  $Se$  (вставка), що зняті в режимах PI і PIII

Знятий при  $\lambda_{зб.} = 671$  нм раманівський спектр полікристалічної плівки  $Se$ , що одержана шляхом відпалу аморфної плівки, містить інтенсивну смугу з максимумом при  $237$   $\text{см}^{-1}$ , менш виражену смугу при  $146$   $\text{см}^{-1}$  і слабку особливість при  $255$   $\text{см}^{-1}$  [10]. Відмітимо, що для тригонального  $Se$  домінуюча смуга в спектрі комбінаційного розсіювання світла знаходиться при  $237$   $\text{см}^{-1}$ , а для  $\alpha$ -моноклінного та склоподібного — при  $250$   $\text{см}^{-1}$ . Крім того, в спектрах  $\alpha$ -моноклінного  $Se$  проявляються смуги при  $80\text{--}89$   $\text{см}^{-1}$ ,  $111\text{--}115$  і  $187\text{--}189$   $\text{см}^{-1}$ , а в спектрах тригонального та склоподібного  $Se$  — смуги при  $143$  та  $140$   $\text{см}^{-1}$ , відповідно [8, 11].

У тригональному селені спіральні ланцюжки з відстанями  $Se\text{-}Se$   $237,3$  пм утворюють кристалічну решітку з параметрами елементарної комірки:  $a = 436$  пм,  $c = 495,8$  пм, валентний кут  $\theta = 103,1^\circ$ , дієдричний кут  $\varphi$ , який характеризує ступінь закручування ланцюжка, досягає  $100,6^\circ$  [8].  $\alpha$ -моноклінний  $Se$  складається з молекул  $Se_8$ , які нагадують корону. Міжатомні відстані складають  $232\text{--}234$  пм. Параметри елементарної комірки  $\alpha$ -моноклінного  $Se$  наступні:  $a = 905,4$  пм;  $b = 908,3$  пм;  $c = 1160$  пм; валентний кут —  $105,9^\circ$ ; дієдричний кут —  $101,0^\circ$  [8].

Телур кристалізується в тому ж структурному типі, що і тригональний селен [8]. Спіральні ланцюжки з відстанями  $Te\text{-}Te$   $287,8$  пм утворюють кристалічну решітку з параметрами елементарної комірки:  $a = 445,1$  пм;  $c = 592,6$  пм; валентний

кут  $\theta = 101,8^\circ$ ; дієдричний кут  $\varphi$ , утворений площиною, в якій лежать 3 атоми Те, і четвертим атомом  $\sim 100^\circ$ . Кожний атом Те, окрім двох атомів, з якими він зв'язаний всередині ланцюжка, зв'язаний ще з чотирма атомами, які знаходяться на відстані 349 пм і належать трьом сусіднім ланцюжкам. Розплави в системі Se-Te, що збагачені селеном, складаються зі спіральних ланцюжків, у яких атоми селену статистично заміщені атомами телуру, з кільцями  $\text{Se}_6\text{Te}_2$  [8].

Аналізуючи раманівський спектр аморфної плівки селену, що наведений на рис. 1, зі спектрами склоподібного, аморфного, полікристалічного, тригонального та  $\alpha$ -моноклінного селену [8, 10–12] можна стверджувати, що смуги при 253, 115 і 87  $\text{см}^{-1}$  можна приписати коливанням у фрагментах  $\text{Se}_8$ , а особливості при 236 і 135–143  $\text{см}^{-1}$  — коливанням атомів у ланцюжкових угрупованнях  $\text{Se}_n$ . Це дозволяє зробити висновок, що матриця аморфної плівки Se побудована в основному структурними угрупованнями  $\text{Se}_8$  і містить спіралевидні ланцюжки  $\text{Se}_n$ .

Раманівські спектри аморфних плівок системи Se-Te наведені на рис. 2 та 3. Спектри плівок, що зняті при низькій потужності лазерного випромінювання (0,1 мВт) (режими PI і PII), містять смуги та особливості:  $\text{Se}_{97}\text{Te}_3$  — інтенсивну смугу при 253  $\text{см}^{-1}$  і плече при 210–212  $\text{см}^{-1}$ ;  $\text{Se}_{95}\text{Te}_5$  — інтенсивну смугу при 252  $\text{см}^{-1}$  і слабо виражену смугу при 214  $\text{см}^{-1}$ ;  $\text{Se}_{90}\text{Te}_{10}$  — інтенсивну смугу при 251  $\text{см}^{-1}$  і слабо виражену смугу при 213  $\text{см}^{-1}$ ;  $\text{Se}_{85}\text{Te}_{15}$  — інтенсивну смугу при 253  $\text{см}^{-1}$ , менш виражену смугу при 211  $\text{см}^{-1}$  і слабку особливість при 84  $\text{см}^{-1}$  (режим I); інтенсивну смугу при 248  $\text{см}^{-1}$ , менш виражену смугу при 214  $\text{см}^{-1}$  і слабку особливість при 176  $\text{см}^{-1}$  (режим II).

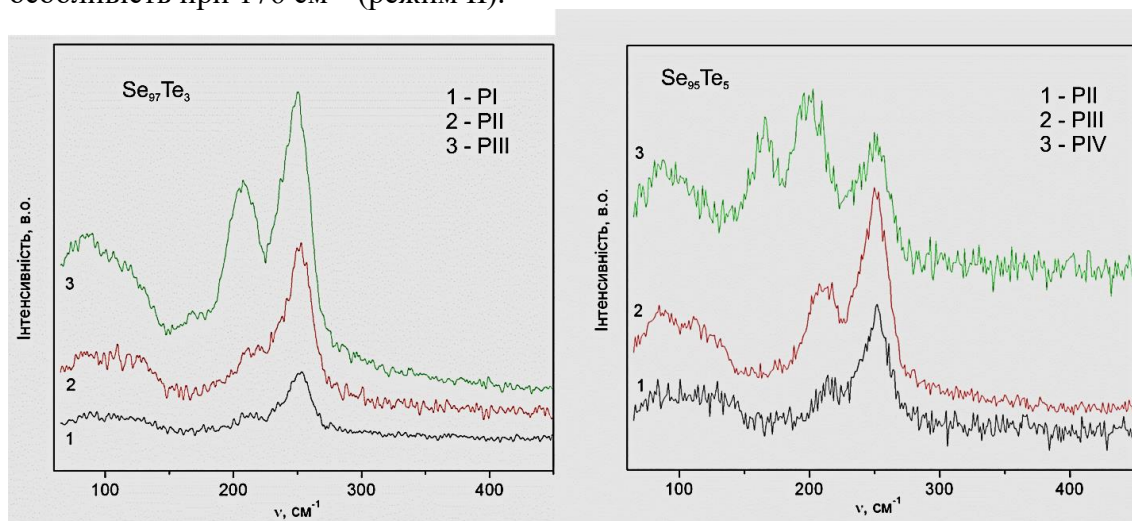


Рис. 2. Раманівські спектри плівок  $\text{Se}_{97}\text{Te}_3$  і  $\text{Se}_{95}\text{Te}_5$ , що зняті в різних режимах

Перехід до більшої потужності лазерного випромінювання (1 мВт) призводить до суттєвої трансформації раманівських спектрів плівок. Спектри плівок містять:  $\text{Se}_{97}\text{Te}_3$  — інтенсивні смуги при 250  $\text{см}^{-1}$  і 207  $\text{см}^{-1}$ , слабку смугу при 84  $\text{см}^{-1}$  і особливість при 168  $\text{см}^{-1}$ ;  $\text{Se}_{95}\text{Te}_5$  — інтенсивну смугу при 251  $\text{см}^{-1}$ , менш інтенсивну смугу при 210–215  $\text{см}^{-1}$ , слабку смугу при 86  $\text{см}^{-1}$  та особливості при 113 і 174  $\text{см}^{-1}$  (режим III); інтенсивні смуги при 200–209, 251  $\text{см}^{-1}$  і 165  $\text{см}^{-1}$  і менш виражену особливість при 88  $\text{см}^{-1}$  (режим IV);  $\text{Se}_{90}\text{Te}_{10}$  — інтенсивні смуги при 205,

248  $cm^{-1}$  і менш інтенсивні смуги при 85 і 170  $cm^{-1}$ ;  $Se_{85}Te_{15}$  — інтенсивні смуги при 204, 247  $cm^{-1}$  і менш інтенсивні смуги при 84 і 169  $cm^{-1}$ .

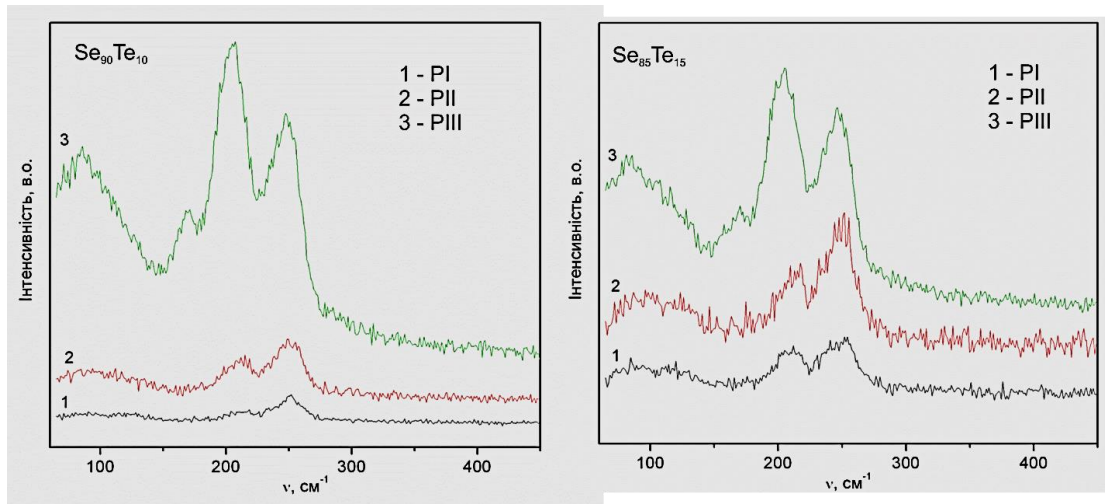


Рис. 3. Раманівські спектри плівок  $Se_{90}Te_{10}$  і  $Se_{85}Te_{15}$ , що зняті в різних режимах

Порівнюючи спектри комбінаційного розсіювання світла плівок  $Se_{100-x}Te_x$  (рис. 2 і 3) зі спектром аморфної плівки Se (рис. 1), знятих при потужностях лазерного випромінювання 0,1 мВт, можна констатувати, що введення Te в Se не призводить до зміни положення основної смуги, обумовленої наявністю в матриці плівок структурних угруповань  $Se_8$ . Це свідчить про те, що в матриці аморфних плівок системи Se-Te структурні фрагменти (кілця)  $Se_6Te_2$ , які присутні в розплавах, не формуються. Особливість при 236  $cm^{-1}$ , яка спостерігається в раманівському спектрі Se і обумовлена наявністю ланцюжків  $Se_n$  в матриці аморфної плівки селену, в раманівських спектрах плівок  $Se_{100-x}Te_x$  проявляється в ділянці спектра 210–214  $cm^{-1}$ . Це означає, що при заміні атомів селену атомами телуру у складі плівок  $Se_{100-x}Te_x$ , атоми Te статистично рівномірно заміщують атоми Se в ланцюжкових фрагментах  $Se_n$  [13]. Особливості при 84–88 та 110–115  $cm^{-1}$  [13], які виявлені в раманівських спектрах аморфної плівки селену, проявляються і в плівках системи селен-телур.

Більш кардинальні зміни раманівських спектрів плівок  $Se_{100-x}Te_x$  спостерігаються при потужності лазерного випромінювання 1 мВт. Найбільш інтенсивні смуги при 251–253 і 210–214  $cm^{-1}$  зсуваються в короткохвильову ділянку спектра на 3–9  $cm^{-1}$ . У деяких випадках спостерігається перекачка інтенсивностей цих смуг (рис. 2, 3). Крім того, в спектрах плівок проявляються добре виражені особливості при 84–88  $cm^{-1}$  та 165–170  $cm^{-1}$ . Одержані результати дозволяють зробити припущення, що при досить значних потужностях збуджуючого випромінювання плівки  $Se_{100-x}Te_x$  кристалізуються [13]. При цьому в аморфній матриці Se формуються кристалічні включення селену як тригональної, так і  $\alpha$ -моноклінної модифікації.

У ряді робіт на основі досліджень структури та морфології поверхні аморфних плівок селену методами X-променевої дифрактометрії, раманівської спектроскопії і скануючої електронної мікроскопії було показано, що витримка плівок у парах ртуті призводить до формування в їхній матриці кристалічних включень селеніду ртуті (HgSe) в кубічній модифікації [4, 5]. У раманівському спектрі ( $\lambda_{зб.} =$

= 671 нм) модифікованої ртуттю аморфної плівки Se були виявлені інтенсивна смуга при  $231\text{ см}^{-1}$ , менш інтенсивна смуга при  $250\text{ см}^{-1}$  і слабкі розмиті смуги при  $168$  та  $194\text{ см}^{-1}$  [5]. У роботі [14] подібні смуги (при  $168$  та  $192\text{ см}^{-1}$ ) були виявлені в раманівському спектрі нанокластерів HgSe, сформованих у майже сферичних порах цеолітового каркасу (Nd-Y). Нанокластери селеніду ртуті були синтезовані в цеолітовій матриці шляхом хімічного осадження парів. Наявність цих смуг у раманівському спектрі структури Nd-Y/HgSe автори даної роботи пов'язують з формуванням у порах цеоліту нанокластерів селеніду ртуті. Крім того, у спектрі також була виявлена слабка розмита смуга при  $238\text{ см}^{-1}$ , що обумовлена наявністю в структурі Nd-Y/HgSe розпорядкованих ланцюжків Se. У цій же роботі наведено результати дослідження раманівського спектра нанокластерів HgSe, сформованих у трубчастих порах цеолітового каркасу (LTL). Раманівський спектр такої структури (LTL/HgSe) містить три інтенсивні смуги при  $180$ ,  $202$  і  $263\text{ см}^{-1}$ . Зауважимо, що смуга при  $263\text{ см}^{-1}$  була виявлена і в раманівському спектрі структури LTL/Se [14].

На рис. 4 та 5 наведені раманівські спектри аморфних плівок  $\text{Se}_{100-x}\text{Te}_x$ , витриманих у парах ртуті протягом однієї доби. Порівнюючи їх зі спектрами номінально чистих плівок тих же складів, можна переконатися, що в основному вони подібні як за положенням смуг, так і за їхньою інтенсивністю. Однак, у спектрах деяких плівок можна виділити деякі особливості, які не спостерігаються в раманівських спектрах номінально чистих плівок. Наприклад, особливості при  $197$  та  $203\text{--}205\text{ см}^{-1}$ ,  $176\text{--}186\text{ см}^{-1}$ ,  $197$  та  $203\text{--}204\text{ см}^{-1}$ .

Положення цих смуг задовільно узгоджується з положенням смуг у раманівських спектрах структур Nd-Y/HgSe та LTL/HgSe. У деяких випадках важко визначити природу смуги в модифікованих ртуттю плівках  $\text{Se}_{100-x}\text{Te}_x$ , оскільки подібна смуга спостерігається і в спектрах номінально чистих плівок. Наприклад, у спектрах номінально чистої плівки  $\text{Se}_9\text{Te}_{10}$  чітко проявляються смуги при  $170$  та  $205\text{ см}^{-1}$ , а в спектрах модифікованої ртуттю плівки цього ж складу при  $168\text{--}169$  та  $201\text{--}202\text{ см}^{-1}$ . Подібні положення смуги, які засвідчують наявність нанокластерів HgSe, спостерігаються в раманівських спектрах структур Nd-Y/HgSe ( $168\text{ см}^{-1}$ ) і LTL/HgSe ( $202\text{ см}^{-1}$ ) [14].

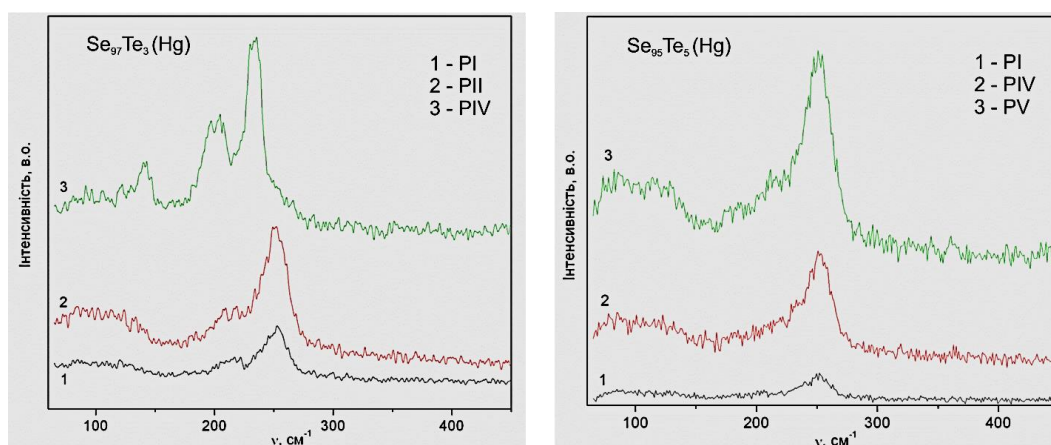


Рис. 4. Раманівські спектри модифікованих ртуттю плівок  $\text{Se}_{97}\text{Te}_3$  і  $\text{Se}_{95}\text{Te}_5$ , що зняті в різних режимах

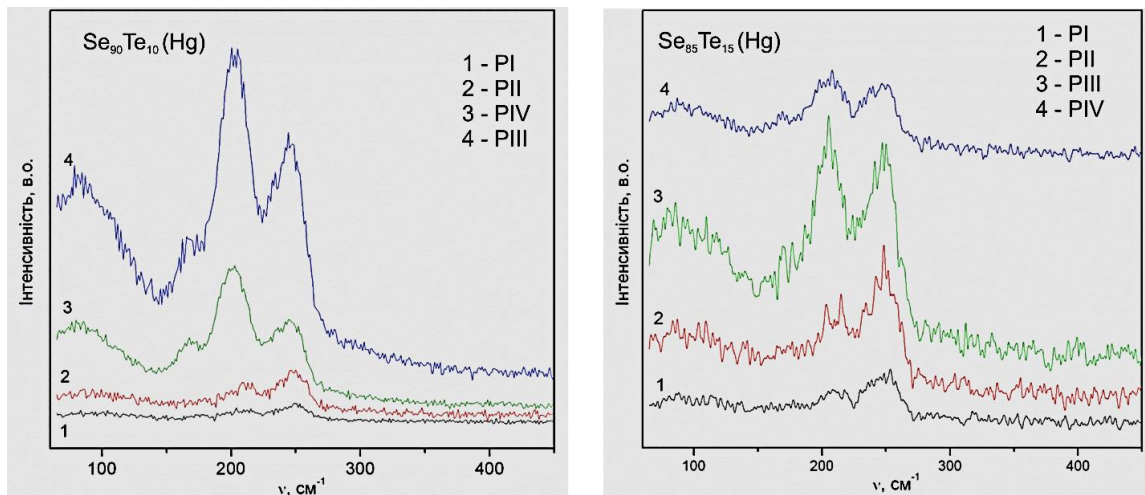


Рис. 5 Раманівські спектри модифікованих ртуттю плівок  $Se_{90}Te_{10}$  та  $Se_{85}Te_{15}$ , що зняті в різних режимах

Одержані дані та наведені порівняння дають нам змогу зробити припущення, що при модифікуванні ртуттю аморфних плівок системи Se-Te в їхній матриці формуються кристалічні включення селеніду ртуті.

## Висновки

Матриця аморфної плівки селену побудована в основному структурними угрупованнями  $Se_8$  і містить спіралевидні ланцюжки  $Se_n$ . При заміні атомів селену атомами телуру в плівках  $Se_{100-x}Te_x$  атоми Te статистично рівномірно заміщують атоми Se у цих ланцюжкових фрагментах. Цей процес супроводжується зміщенням смуги при  $236\text{ см}^{-1}$  в раманівському спектрі аморфної плівки Se в ділянку  $210\text{--}214\text{ см}^{-1}$  у спектрах плівок  $Se_{100-x}Te_x$ . При досить значних потужностях збуджуючого випромінювання (1 мВт) плівки  $Se_{100-x}Te_x$  кристалізуються.

При витримці аморфних плівок  $Se_{100-x}Te_x$  у парах ртуті, в їхній структурній сітці формуються кристалічні включення селеніду ртуті.

1. Kyrylenko V.K., Rubish V.M., Nykuryu L.I., Pisak R.P., Durkot M.O., Zapukhlyak Z.R., Fedelech V.I., Uvarov V.N. Electrical properties of mercury modified amorphous selenium. Mat. Intern. Meeting «Clusters and nanostructured materials (CNM-6)». Uzhgorod, Ukraine. 2020. P. 138–139.

2. Рубіш В.М., Кириленко В.К., Дуркот М.О., Макар Л.І., Тарнай А.А., Никируй Л. Вплив парів ртуті на електричні властивості аморфних плівок селену. Mat. IV Міжнародної наукової конференції «Актуальні проблеми фундаментальних наук (АПФН-2021)». (01–05 червня 2021, м. Луцьк). Луцьк, 2021. С. 96–97.

3. Rubish V.M., Kyrylenko V.K., Durkot M.O., Makar L.I., Pisak R.P., Yasinko T.I., Nykuryu L.I., Zapukhlyak Z.R. The influence of mercury concentration and temperature on the electrical resistance of Hg modified amorphous films. Proc. XVII Freik Intern. Conf. «Physics and technology of thin films and nanosystems (ICPTTFN-XVIII)». Ivano-Frankivsk, Ukraine. 2021. P. 190.

4. Makar L.I., Mudry S., Nykuryu L., Pisak R.P., Rubish V.M., Shtablayvi I., Bepalov S.A., Solomon A.M., Yavorskyi R.S. Formation of HgSe nanocrystalline inclusions in the matrix of amorphous selenium films. Mat. Intern. Meeting «Clusters and nanostructured materials (CNM-6)». Uzhgorod, Ukraine, 2020. P. 267–269.

5. Грещук О.М., Юхимчук В.О., Макар Л.І., Рубіш В.М., Поп М.М., Ясінко Т.І., Бендзо Ю.В., Заяць Т.М. Дослідження модифікованих ртуттю аморфних плівок Se методом раманівсь-

кої спектроскопії. Матеріали школи-конференції молодих вчених «Сучасне матеріалознавство: фізика, хімія, технології (СМФХТ – 2021)». Ужгород, Україна, 2021. С. 211–213.

6. Гасинець С.М., Горіна О.В., Козусенок О.В., Риган М.Ю., Рубіш В.М., Попович К.О., Шпирко Г.М., Бишук Д.А. Вплив термічної передісторії на процеси неізотермічної кристалізації склоподібного та аморфного селену. *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*. 2010. Т. 8, № 3. С. 521–533.

7. Виноградова Г.З. Стеклообразование и фазовые равновесия в халькогенидных системах. Двойные и тройные системы. Москва: Наука, 1984. 176 с.

8. Фельц А. Аморфные и стеклообразные неорганические твердые тела. Москва: Мир, 1986. 556 с.

9. Рубіш В.М., Пісак Р.П., Ясірко Т.І., Соломон А.М., Грещук О.М., Юхимчук В.О., Беспалов С.А., Уваров В.М. Структурні дослідження модифікованих парами ртуті плівок телуру. Мат. IV Міжнародної наукової конференції «Актуальні проблеми фундаментальних наук (АПФН-2021)». Луцьк, 2021. С. 98–100.

10. Рубіш В.М., Грещук О.М., Дуркот М.О., Макар Л.І., Поп М.М., Юркін І.М., Юхимчук В.О., Ясірко Т.І. Структурні дослідження фоточутливих композитів «НЧ Au/плівка селену» // *Рестрація, зберігання і оброб. даних*, 2020. Т. 22. № 4. С. 12–18. DOI: <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2020.22.4.225889>.

11. Айвазов А.А., Будагян Б.Г., Вихров С.П., Попов А.И. Неупорядоченные полупроводники. Москва: Из-во МЭИ, 1995. 352 с.

12. Мешалкин А., Паюк А.П., Ревуцкая Л.А., Акимова Е., Стронский А.В., Присакарь А., Тридих Г., Абашкин В., Корчевой А., Горонескуль В.Ю. Прямая запись поверхностного рельефа дифракционных решеток с использованием слоев селена как регистрирующих сред. *Оптоэлектроника и полупроводниковая техника*. 2018. В. 53. С. 240–247.

13. Рубіш В.М., Гасинець С.М., Пісак Р.П., Стефанович В.О., Тарнай А.А., Ясірко Т.І. Лазерно-індуковані структурні перетворення в аморфних плівках системи селен-телур. Мат. міжнар. конф. «Ужгородська школа з атомної фізики та квантової електроніки» (до 100-річчя від дня народження проф. І.П. Запісочного). Ужгород, 2022. С. 230–232.

14. Abeykoon A.M.M., Castro-Colin M., Anokhina E.V., Iliev M.N., Donner W., Brunelli M., Jacobson A.J., Moss S.C. X-Ray scattering studies of HgSe nanoclusters in zeolite. *Metallurgical and materials transactions A*. 2008. Vol. 39 A. P. 3179–3183.

Надійшла до редакції 15.06.2022