

# РОЗДІЛ I

## Фізика твердого тіла

УДК 621.315.592

**Г. Є. Давидюк** – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри фізики твердого тіла Волинського національного університету імені Лесі Українки;

**Г. Л. Мирончук** – кандидат фізико-математичних наук, старший викладач кафедри фізики твердого тіла Волинського національного університету імені Лесі Українки;

**О. В. Парасюк** – кандидат хімічних наук, провідний науковий співробітник кафедри загальної та неорганічної хімії Волинського національного університету імені Лесі Українки;

**М. В. Шевчук** – викладач кафедри загальної та неорганічної хімії Волинського національного університету імені Лесі Українки;

**О. В. Якимчук** – аспірант кафедри фізики твердого тіла Волинського національного університету імені Лесі Українки;

**С. П. Данильчук** – аспірант кафедри фізики твердого тіла Волинського національного університету імені Лесі Українки

### Структурні параметри і деякі фізичні властивості монокристалів $\text{AgGaGe}_2\text{S}_2\text{Se}_4$

*Роботу виконано на кафедрі фізики твердого тіла ВНУ ім. Лесі Українки*

Досліджено монокристали твердих розчинів 50 %мол.  $\text{AgGaGeS}_4$  + 50мол.%  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8$ . Внаслідок статистичного розміщення у вузлах кристалічної ґратки атомів Ga і Ge, а також наявності вузлів, не заповнених атомами Ag, тверді розчини проявляють властивості неупорядкованих напівпровідників з максимальною щільністю локалізованих енергетичних станів біля середини забороненої зони. Встановлено оптичну й термічну ширину забороненої зони та їх температурну залежність ( $E_g \approx 2,30\text{eV}$  при  $T \approx 300\text{K}$ ). Монокристали розчину  $\text{AgGaGe}_2\text{S}_2\text{Se}_4$  виявилися фоточутливими напівпровідниками *p*-типу провідності з положенням рівня Фермі біля середини забороненої зони. Досліджено особливості електропровідності та спектрального розподілу фотопровідності зразків розчину. Запропоновано несуперечливу фізичну модель, яка дає змогу пояснити експериментально одержані результати.

**Ключові слова:** халькогеніди, неупорядковані системи, електричні і оптичні властивості.

#### Мирончук Г. Л., Давидюк Г. Е., Парасюк О. В., Шевчук Н. В., Якимчук Е. В., Данильчук С. П. Структурные параметры и некоторые физические свойства монокристаллов $\text{AgGaGe}_2\text{S}_2\text{Se}_4$ .

Исследуются монокристаллы твердых растворов 50 мол.%  $\text{AgGaGeS}_4$  + 50 мол.%  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8$ . Вследствие статистического распределения атомов Ga и Ge по узлам кристаллической решетки и наличия не заполненных атомами Ag узлов твердые растворы обладают свойствами неупорядоченных полупроводников с максимальной плотностью локализованных энергетических состояний вблизи середины запрещенной зоны. Определена термическая и оптическая ширина запрещенной зоны и её температурная зависимость ( $E_g \approx 2,30\text{eV}$  при  $T \approx 300\text{K}$ ). Монокристаллы твердого раствора  $\text{AgGaGe}_2\text{S}_2\text{Se}_4$  фоточувствительны и обладают *p*-типом проводимости с положением уровня Ферми вблизи середины запрещенной зоны.

© Давидюк Г. Є., Мирончук Г. Л., Парасюк О. В., Шевчук М. В., Якимчук О. В., Данильчук С. П., 2011

Исследуются особенности электропроводимости и спектрального распределения фотопроводимости образцов раствора. Предлагается непротиречивая физическая модель, которая объясняет экспериментально полученные результаты.

**Ключевые слова:** халькогениды, неупорядоченные системы, электрические и оптические свойства.

**Myronchuk G. L., Davudyuk G. E., Parasyuk O. V., Shevchuk N. V., Yakumchuk O. V., Danylchuk S. P.** The Electrical and Optical Properties of the Single Crystal  $\text{AgGaGe}_2\text{S}_2\text{Se}_4$ . Single crystals of the solid solution of 50 mol.%  $\text{AgGaGeS}_4$  + 50 mol.%  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8$  were investigated. Due to the statistical distribution of Ga and Ge atoms in their sites and the existence of the vacancies in Ag sites, the solid solution exhibits the properties of disordered semiconductors with the maximum density of localized energy states near the middle of the band gap. Optical and thermal bandgap energy and their temperature dependence were determined ( $E_g=2.30$  eV at 300 K).  $\text{AgGaGe}_2\text{S}_2\text{Se}_4$  single crystals were photosensitive p-type semiconductors with the Fermi level near the middle of the band gap. Peculiarities of the conductivity and the spectral distribution of the photoconductivity of the samples were investigated. A non-contradictory physical model is suggested which explains the experimental results.

**Key words:** solid chalcogenide solutions, defects, disordered semiconductors, electric and optical properties.

**Постановка наукової проблеми та її значення.** На сьогодні одними із найбільш поширених матеріалів для параметричної генерації світла середнього ІЧ-діапазону є монокристали тернарних сполук  $\text{AgGaS}_2$  і  $\text{AgGaSe}_2$ . Основні споживачі параметричних кристалів – потужні CO- і CO<sub>2</sub>-лазери. Тетрарні сполуки  $\text{AgGaGeS}_4$  і  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8$  є аналогами  $\text{AgGaS}_2$  і  $\text{AgGaSe}_2$  і були знайдені при спробі покращити параметри тернарних фаз шляхом додавання дихалькогенідів германію. Поряд із вдвічі більшою стійкістю до дії лазерного випромінювання у них зростає величина двопронезаломлення, збільшується область прозорості, а також зменшується температура плавлення тетрарних сполук, що позитивно впливає на технологію одержання якісних кристалів. Монокристали  $\text{AgGaGe}_2\text{S}_2\text{Se}_4$  є частиною неперервного твердого розчину складу 50 мол.%  $\text{AgGaGeS}_4$  + 50 мол.%  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8$ . Вони належать до нових маловивчених (за винятком рентгеноструктурних досліджень) напівпровідників, які є перспективним матеріалом елементів сучасної оптоелектроніки і нелінійної оптики.

**Мета** – експериментально дослідити електричні, оптичні й фотоелектричні властивості монокристалів  $\text{AgGaGe}_2\text{S}_2\text{Se}_4$ .

**Завдання** – визначити ширину забороненої зони, характер розподілу енергетичних станів, обумовлених дефектами і розупорядкованістю кристалічної ґратки, енергетичне положення в забороненій зоні оптично активних центрів у монокристалах  $\text{AgGaGe}_2\text{S}_2\text{Se}_4$ .

**Матеріали й методи.** Монокристали  $\text{AgGaGe}_2\text{S}_2\text{Se}_4$  одержано й досліджено методом рентгеноструктурного аналізу в лабораторіях кафедри загальної та неорганічної хімії; дослідження електричних, оптичних та фотоелектричних властивостей проводилося в лабораторіях кафедри фізики твердого тіла Волинського національного університету імені Лесі Українки.

**Методика й техніка фізичного експерименту.** Для експериментальних досліджень виготовляли зразки у формі паралелепіпедів розмірами  $0,15 - 0,4 \times (-2) \times (-7) \text{ мм}^3$ . Як матеріали електричних контактів використовувалась галій – індієва евтектика, нанесена на торець і поверхню зразка методом втирання. У деяких випадках контакти виготовляли з використанням електропровідного клею. Омичність контактів зберігалась у широкому інтервалі температур і напруг та перевірялася в кожному конкретному випадку перед експериментальними дослідженнями. Обробку поверхні зразків проводили методом механічної шліфовки з використанням алмазних паст різної зернистості. Для оптичних досліджень поверхню зразків додатково протравлювали в розчині декількох кислот з подальшою промивкою з дистильованою водою та спиртом.

Оптичні та фотоелектричні вимірювання здійснювали з використанням добре апробованих стандартних методик. Як спектрограф використовувався монохроматор МДР-208 з комп'ютерною системою управління і обробки результатів експерименту. При дослідженні спектрів поглинання світла використовували кремнієві  $0,00 - 1100 \text{ нм}$  та  $\text{PbS}$   $0,00 - 3000 \text{ нм}$  фотоприймачі. Оптичні дослідження в області краю смуги власного поглинання проводились на плоскопаралельних пластинках з поверхнями оптичної якості товщиною  $\sim 0,08 - 0,1 \text{ мм}$ .

**Виклад основного матеріалу та обґрунтування отриманих результатів досліджень.**

**Технологія одержання монокристалів і рентгеноструктурні дослідження.**

$\text{AgGaGeS}_4$  і  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8$  є ізоструктурними та утворюють неперервний ряд твердих розчинів (НРТР) [9]. Фаза  $\text{AgGaGe}_2\text{S}_2\text{Se}_4$  є частиною цього НРТР із вмістом 50 мол.%  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8$ . Для росту її кристалів ми використовували метод Бріджмена-Стокбаргера. Температура зони росту двозонної

печі становила 1170 К, а зони відпалу – 750 К, які створювали градієнт температур на фронті кристалізації 3 К/мм. Відпал кристалу тривав 200 год, після якого проводилося його охолодження до кімнатної температури зі швидкістю 5 К/год. Одержані таким способом монокристали були світло-червоного кольору. Їх середні розміри становили 35 мм в довжину та 9 мм в діаметрі.

Рентгеноструктурні дослідження показали, що кристали фази  $\text{AgGaGe}_2\text{S}_2\text{Se}_4$  належать до просторової групи  $Fdd2$ ;  $a = 1,22746(5)$  нм,  $b = 2,3541(1)$  нм,  $c = 0,70539$  нм. У структурі атоми сульфуру та селену займають три шістнадцятикратні позиції  $16b$  у співвідношенні 1:1. Причому, в такій же позиції, яка зайнята на 56,3%, розміщено атоми Ag. Атоми Ga і Ge статистично розміщуються у двох кристалографічних позиціях  $8a$  та  $16b$ , кожна з яких зайнята на 37,5 % і 62,5 % ними відповідно. Статистичний розподіл атомів Ga і Ge в кристалічній ґратці твердого розчину  $\text{AgGaGe}_2\text{S}_2\text{Se}_4$  веде до випадкової флуктуації електричного потенціалу й наближає його до неупорядкованого стану [1].

#### Електричні, оптичні та фотоелектричні дослідження

Монокристали  $\text{AgGaGe}_2\text{S}_2\text{Se}_4$  належать до високоомних речовин із темною питомою електропровідністю ( $\sigma$ ) при кімнатній температурі ( $T \approx 293\text{K}$ ) рівною  $\sigma \approx 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ . Малі значення коефіцієнта термо-е.р.с. ( $\alpha \approx 10\text{--}20 \text{ мкВ/К}$ ) і  $\sigma$  свідчать про глибоке положення рівня Фермі ( $E_F$ ), а саме: біля середини забороненої зони розчинів з близькими внесками в  $\alpha$  електронного і діркового складника [7]:

$$\alpha = \frac{\alpha_p \mu_p p - \alpha_n \mu_n n}{\mu_p p + \mu_n n}, \quad (1)$$

де  $\mu_p, \mu_n$  – рухливості дірок і електронів в зонах,  $n, p$  – концентрація дірок і електронів,  $\alpha_p, \alpha_n$  – парціальні коефіцієнти термо-е.р.с.

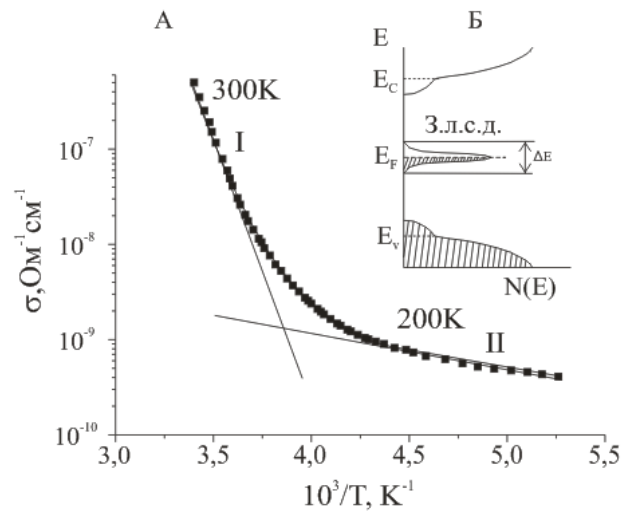
Оскільки для більшості напівпровідникових матеріалів  $\mu_p$  менше  $\mu_n$ , то невелике додатне значення  $\alpha$ , що свідчить про  $p$ -тип провідності  $\text{AgGaGe}_2\text{S}_2\text{Se}_4$ , зумовлене, очевидно, деякою перевагою концентрації дірок над концентрацією електронів.

На рисунку 1 представлена температурна залежність темної питомої електропровідності  $\sigma T$  монокристалів  $\text{AgGaGe}_2\text{S}_2\text{Se}_4$ . Як видно із рисунка,  $\sigma T$  в різних температурних інтервалах (I і II) можна представити експоненційною залежністю, що характерно для неупорядкованих напівпровідників [4]:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_A}{kT}\right). \quad (2)$$

Визначена із залежності (2) енергія активації електропровідності в області I ( $T > 270\text{K}$ ) становить  $E_{AI} \approx (1,14 \pm 0,03)$  еВ.

У дефектних кристалах внаслідок випадкового розподілу потенціалу електричного поля, зумовленого статистичним розподілом атомів Ga і Ge в вузлах кристалічної ґратки розчину і флуктуацією концентрації заряджених структурних дефектів, виникають хвости щільності електронних станів, які примикають до країв зон дозволених енергій і створюють зони дефектних локалізованих станів у забороненій зоні з настільки високою щільністю станів, що закріплюють рівень Фермі [4] (рис. 1Б). Значення передекспоненційного множника (у формулі (2)) при  $T \geq 270\text{K}$  виявилось рівним  $\sigma_{0I} \approx 5 \cdot 10^2 - 10^3 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$  для різних кристалів, що свідчить, згідно з моделлю електронних станів неупорядкованих систем [4], про термозбудження дірок із рівнів, які лежать близько рівня  $E_F$ , в нелокалізовані стани валентної зони. Вважаючи положення рівня Фермі близьким до середини забороненої зони (рис. 1Б), що впливає, як зазначалося вище, із малого значення  $\alpha$  і низької електропровідності зразків (компенсовані), можна оцінити термічну ширину забороненої зони, яка виявилася рівною  $E_{gT} \approx 2E_{AI} = (2,28 \pm 0,03)$  еВ.



**Рис. 1.** А – температурна залежність питомої електропровідності монокристалів  $\text{AgGaGe}_2\text{S}_2\text{Se}_4$ ; Б – модель розподілу електронних дефектних станів в невпорядкованому напівпровіднику (за Девісом і Моттом):  $E_c$  і  $E_v$  – граничні енергії, які розділяють локалізовані і нелокалізовані стани, з.л.с.д. – зона локалізованих домішкових станів

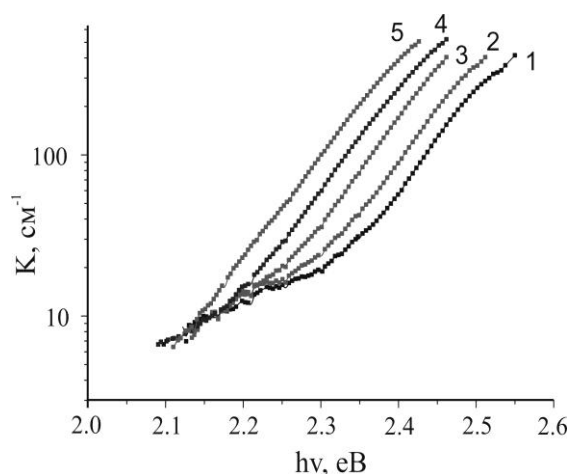
На низькотемпературній ділянці  $T < 200\text{K}$  (II) енергія активації електропровідності має значення  $E_{AII} \approx (0,07 \pm 0,03)\text{eV}$ , при цьому передекспоненційний множник становив  $\sigma_{oII} \ll \sigma_{oI}$ . Така залежність  $\sigma$  характерна для стрибкової провідності між найближчими сусідами по домішковій дефектній зоні, яка закріплює  $E_F$ . Енергія активації перескоків  $E_{AII}$  має значення, рівнонаближене половині ширини зони локалізованих дефектних станів  $\Delta E \approx 2E_{AII} \approx 1,4\text{eV}$ , що добре узгоджується з моделлю Мотта [4].

Важливу інформацію про дефектний стан напівпровідника дає дослідження частотної залежності коефіцієнта поглинання ( $K(\nu)$ ) на краю смуги власного поглинання світла (КП) (рис. 2). Як видно із рисунка 2,  $K(\nu)$  в області КП добре описується експоненційною залежністю, яку часто називають правилом Урбаха [1]:

$$K \sim \exp\left(-\frac{E_g - h\nu}{\Delta_0}\right). \quad (3)$$

Виконання залежності (3) свідчить, що оптичні переходи в області краю власного поглинання світла формуються з участю хвостів щільності станів (зумовлених дефектністю кристала), які примикають до країв дозволених зон [2].

Розрахована з експоненційної залежності (3) характеристична енергія  $\Delta_0$ , яка відповідає за ступінь розупорядкування кристалічної ґратки, становила  $\sim 0,07\text{eV}$  (як в аморфних напівпровідниках [4]) і не змінювалась в температурному інтервалі  $\sim 77\text{--}300\text{K}$ , що зумовлює паралельне зміщення КП (обумовлене зміною  $E_g$ ) без зміни нахилу при зміні температури зразка (рис. 2). Велике значення  $\Delta_0$  і його температурна незалежність свідчать про значну дефектність монокристалів  $\text{AgGaGe}_2\text{S}_2\text{Se}_4$ , зумовлену структурними технологічними дефектами статичного характеру. Вважаючи домішкові центри однозарядними і використовуючи експериментально визначене значення  $\Delta_0$ , а також теоретичні формули, представлені в роботі [1] ( $\Delta_0 = 2,2 \left(\frac{a_B^3}{a_B^3}\right)^{2/5} E_B$ ), ми оцінили концентрацію однозарядних точкових дефектів, відповідальних за розмиття смуги власного поглинання. Вона виявилася рівною  $n_t \approx 10^{18} \text{--} 2 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$ . При цьому вважалось, що ефективна маса електрона в зоні провідності  $m_c \approx 0,2m_0$  ( $m_0$  – маса вільного електрона), що має місце для багатьох бінарних халькогенідних напівпровідників.



**Рис. 2.** Спектри оптичного поглинання світла в монокристалах  $\text{AgGaGe}_2\text{S}_2\text{Se}_4$  при температурах: 1 – 100 K; 2 – 150 K; 3 – 200 K; 4 – 250 K; 5 – 300 K

Тверді розчини  $\text{AgGaGe}_2\text{S}_2\text{Se}_4$  належать до монокристалів із дефіцитом атомів Ag у вузлах кристалічної ґратки в позиції 16 $\bar{b}$  (про що повідомлялось вище). Це веде до наявності в розчинах стехіометричних вакансій срібла ( $V_{\text{Ag}}$ ), концентрація яких згідно з рентгеноструктурними дослідженнями становить  $N \approx 10^{20} \text{см}^{-3}$ . Катіонні вакансії в халькогенідних сполуках відіграють роль акцепторів. Для багатьох бінарних халькогенідів групи  $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$ , зокрема, твердих розчинів  $\text{CdS}-\text{CdSe}$ , які є аналогами досліджуваних розчинів, енергетичне положення катіонних вакансій близьке до середини забороненої зони [8; 3]. Якщо це має місце для монокристалів  $\text{AgGaGe}_2\text{S}_2\text{Se}_4$ , які є твердими розчинами 50 мол.%  $\text{AgGaGeS}_4$ –50 мол.%  $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8$ , то найбільш імовірним є припущення про зв'язок зони локалізованих станів біля середини забороненої зони розчину (яка прив'язує  $E_F$ ) з  $V_{\text{Ag}}$ . Очевидно, акцепторним характером  $V_{\text{Ag}}$  обумовлений  $p$ -тип провідності монокристалів  $\text{AgGaGe}_2\text{S}_2\text{Se}_4$  і розмиття краю смуги власного поглинання світла.

Як відзначалося вище, за значення  $\Delta_0 \approx 0,07 \text{eV}$  відповідала концентрація однозарядних дефектів  $n_i \approx 10^{18} \text{см}^{-3}$ , що менше концентрації стехіометричних  $V_{\text{Ag}}$  в розчині ( $\sim 10^{20} \text{см}^{-3}$ ).

Очевидно, не всі стехіометричні вакансії Ag відіграють роль однозарядних акцепторів  $V_{\text{Ag}}^-$ . Частина вакансій, взаємодіючи з різними структурними дефектами, на які багаті складні напівпровідникові сполуки, утворюють нейтральні комплекси, що не впливають на випадковий розподіл потенціалу електричного поля, зумовленого флуктуацією концентрації заряджених дефектів. Прикладом таких нейтральних комплексів можуть слугувати донорно-акцепторні пари, акцептором в яких є вакансія Ag, а роль донорів відіграють мілкі іонізовані дефекти –  $(V_{\text{Ag}}^- - D^+)$  або скупчення  $V_{\text{Ag}}$ . Такі дефекти можуть бути центрами швидкої рекомбінації, зменшуючи фоточутливість матеріалу, і центрами поглинання та розсіювання світла, що збільшує коефіцієнт поглинання в області вікон пропускання світла, який в досліджуваних розчинах був рівним  $K \approx 5-7 \text{см}^{-1}$ . Аналогічні явища спостерігалися і в інших халькогенідних сполуках [2; 5].

Оцінена за енергією квантів  $h\nu$  (для  $K = 350 \text{см}^{-1}$ ) на КП оптична ширина забороненої зони при температурах 77 та 300 K виявилась рівною  $E_{g0} \sim 2,52 \text{eV}$  та  $\sim 2,39 \text{eV}$  відповідно, що узгоджується з термічною шириною  $E_{gT} \approx 2,28 \text{eV}$  ( $T = 300 \text{K}$ ), визначеною вище із залежності  $\sigma(T)$ .

На рисунку 3 зображено зміну оптичної ширини забороненої зони зі зміною температури. Термічний коефіцієнт зміни  $E_g$ , який ми розраховували,

$$\beta = \frac{E_{g77} - E_{g300}}{300 - 77} \quad (4)$$

виявився рівним  $5,8 \cdot 10^{-4} \frac{eB}{K}$ , що характерно для більшості напівпровідників. Температурна залежність ширини забороненої зони твердих розчинів в інтервалі 77–300 К має лінійний характер (рис. 3):

$$E_{g0} = E_{g77} - \beta T - 77K . \quad (5)$$

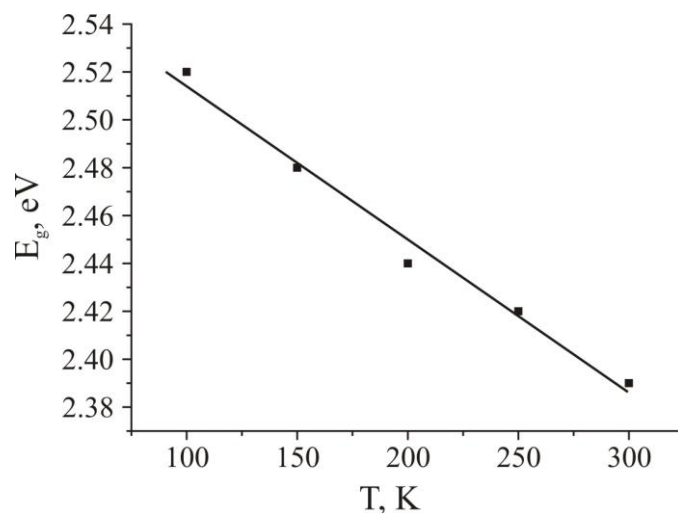


Рис. 3. Температурна зміна ширини забороненої зони монокристалів  $AgGaGe_2S_2Se_4$

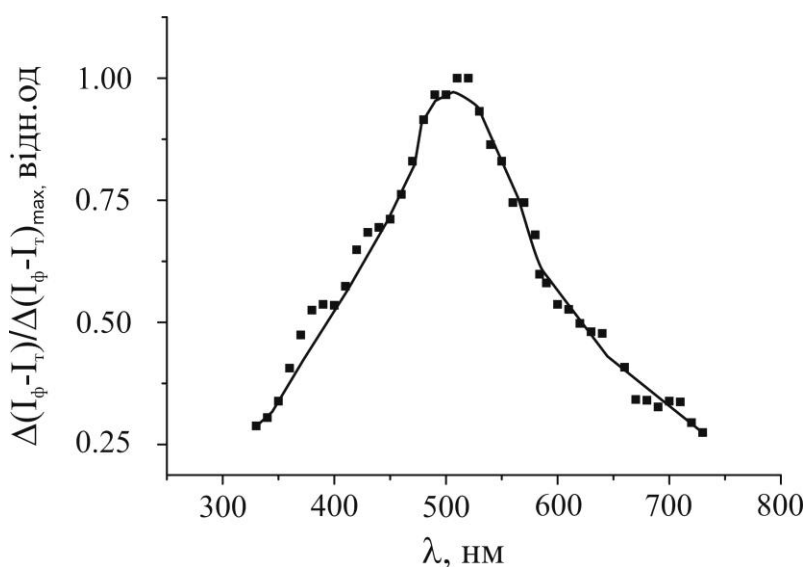


Рис. 4. Спектральний розподіл фотопровідності монокристалів  $AgGaGe_2S_2Se_4$  при  $T = 300K$

На рисунку 4 представлено спектральний розподіл фотопровідності монокристалів  $AgGaGe_2S_2Se_4$  ( $I_T$ ,  $I_\phi$  – значення струму в темноті і на світлі відповідно). Широкий максимум фотопровідності, який лежить в області КП, очевидно відповідає власній фотопровідності. Оцінена за максимумом ФП ( $\lambda_m \cong 0,536 \text{ nm}$ ) ширина забороненої зони твердого розчину при  $T = 300K$  виявилась рівною  $E_g \approx 2,30 \text{ eV}$ , що добре узгоджується зі значеннями оптичної ( $E_{g0} = 2,39 \text{ eV}$ ) і термічної ( $E_{gT} = 2,28 \text{ eV}$ ) ширини забороненої зони твердого розчину при  $T = 300K$ .

Кратність зміни електропровідності в максимумі при освітленості  $10^2 \text{ лк}$  становила  $\approx 2$ . Мала фоточутливість монокристалів  $AgGaGe_2S_2Se_4$ , порівняно з їх бінарними аналогами, очевидно зумовлена наявністю великої концентрації центрів швидкої рекомбінації, які зазвичай пов'язані зі

структурними дефектами кристалічної ґратки, що підтверджується великою напівшириною ( $\approx 230$  нм) піка власної фотопровідності (рис. 4).

**Висновки.** Таким чином, тверді розчини  $\text{AgGaGe}_2\text{S}_2\text{Se}_4$  належать до дефектних напівпровідників з розподілом електронних енергетичних станів ( $N(E)$ ), який добре підтверджує модель Девіса і Мотта з вузьким максимумом ( $\Delta \approx 0,1$  еВ) локалізованих станів біля середини забороненої зони (рис.1Б). Встановлено ширину забороненої зони твердого розчину.

Маючи високу термостійкість і енергію активації електропровідності ( $E = 1,14$  еВ), кристали  $\text{AgGaGe}_2\text{S}_2\text{Se}_4$  можуть бути перспективним матеріалом різних термодатчиків і термісторів, призначених для функціонування в області температур, близьких до кімнатної.

Будучи фоточутливими і радіаційно стійкими,  $\text{AgGaGe}_2\text{S}_2\text{Se}_4$  мають перспективу знайти застосування в електронних і оптоелектронних приладах, що використовуються в середовищах з підвищеною ядерною радіацією.

#### *Список використаної літератури*

1. Бонч-Бруевич В. Л. Электронная теория неупорядоченных полупроводников / В. Л. Бонч-Бруевич, И. П. Звягин, Р. Кайпер и др. – М. : Наука, 1981. – 383 с.
2. Електричні та оптичні властивості монокристала  $\text{AgCd}_x\text{GaSe}_4$  / Г. Є. Давидюк та ін. // Наук. вісн. Волин. нац. у-ту ім. Лесі Українки. – 2010. – № 6. – С. 28 – 32.
3. Лашкарев В. Е. Неравновесные процессы в фотопроводниках / В. Е. Лашкарев, А. В. Любченко, М. К. Шейнкман. – Киев : Наук. думка, 1981. – 264 с.
4. Мотт Н. Электронные процессы в не кристаллических веществах / Н. Мотт. – М. : Мир, 1974 – 472 с.
5. Особливості електричних та фотоелектричних властивостей твердих розчинів  $\text{AgCd}_{2-x}\text{Mn}_x\text{GaSe}_4$  / В. В. Божко // Укр. фіз. журн. – 2010. – Т. 55. – № 2. – С. 208–211.
6. Правило Урбаха в стеклах  $\text{PbO} - \text{SiO}_2$  / Н. А. Вайнштейн и др. // Физика твдого тела. – 2000. – Т. 42. – Вып. 2. – С. 224 – 229.
7. Стилбанс Л. С. Физика полупроводников. – М. : Советское радио, 1967. – 452 с.
8. Физика и химия соединений  $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$  / под ред. С. А. Медведева. – М. : Мир, 1970. – 624 с.
9. Shevchuk M. V. Single crystal preparation and properties of the  $\text{AgGaGeS}_4\text{-AgGaGe}_3\text{Se}_8$  solid solution / M. V. Shevchuk, V. V. Atuchin, A. V. Kityk et al. // J. Cryst. Growth. – 2011. – V. 318. – P. 708–712.

Статтю подано до редколегії  
12.05.2011 р.