

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МІНІСТЕРСТВО ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я УКРАЇНИ
БУКОВИНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ МЕДИЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МАТЕРІАЛИ

II науково-практичної інтернет-конференції
**РОЗВИТОК ПРИРОДНИЧИХ НАУК
ЯК ОСНОВА НОВІТНІХ
ДОСЯГНЕНЬ У МЕДИЦИНІ**



*м. Чернівці
22 червня 2022 року*

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
MINISTRY OF HEALTH OF UKRAINE
BUKOVINIAN STATE MEDICAL UNIVERSITY

CONFERENCE PROCEEDINGS

II Scientific and Practical Internet Conference **DEVELOPMENT OF NATURAL SCIENCES AS A BASIS OF NEW ACHIEVEMENTS IN MEDICINE**



Chernivtsi, Ukraine
June 22, 2022

УДК 5-027.1:61(063)

Р 64

Медицина є прикладом інтеграції багатьох наук. Наукові дослідження у сучасній медицині на основі досягнень фізики, хімії, біології, інформатики та інших наук відкривають нові можливості для вивчення процесів, які відбуваються в живих організмах, та вимагають якісних змін у підготовці медиків. Науково-практична інтернет-конференція «**Розвиток природничих наук як основа новітніх досягнень у медицині**» покликана змінювати свідомість людей, характер їхньої діяльності та стимулювати зміни у підготовці медичних кадрів. Вміле застосування сучасних природничо-наукових досягнень є запорукою подальшого розвитку медицини як галузі знань.

Конференція присвячена висвітленню нових теоретичних і прикладних результатів у галузі природничих наук та інформаційних технологій, що є важливими для розвитку медицини та стимулювання взаємодії між науковцями природничих та медичних наук.

Голова науково-організаційного комітету

Володимир ФЕДІВ професор, д.фіз.-мат.н., завідувач кафедри біологічної фізики та медичної інформатики Буковинського державного медичного університету

Члени науково-організаційного комітету

Тетяна БІРЮКОВА к.тех.н., доцент кафедри біологічної фізики та медичної інформатики Буковинського державного медичного університету

Оксана ГУЦУЛ к.фіз.мат.н., доцент кафедри біологічної фізики та медичної інформатики Буковинського державного медичного університету

Марія ІВАНЧУК к.фіз.мат.н., доцент кафедри біологічної фізики та медичної інформатики Буковинського державного медичного університету

Олена ОЛАР к.фіз.мат.н., доцент кафедри біологічної фізики та медичної інформатики Буковинського державного медичного університету

Почесний гість

Prof. Dr. Anton FOJTIK Факультет біомедичної інженерії, Чеський технічний університет, м.Прага, Чеська республіка

Комп'ютерна верстка:

Марія ІВАНЧУК

Розвиток природничих наук як основа новітніх досягнень у медицині: матеріали II науково-практичної інтернет-конференції, м. Чернівці, 22 червня 2022 р. / за ред. В. І. Федіва – Чернівці: БДМУ, 2022. – 489 с.

У збірнику подані матеріали науково-практичної інтернет-конференції «Розвиток природничих наук як основа новітніх досягнень у медицині». У статтях та тезах представлені результати теоретичних і експериментальних досліджень.

Матеріали подаються в авторській редакції. Відповідальність за достовірність інформації, правильність фактів, цитат та посилань несуть автори.

Для наукових та науково-педагогічних співробітників, викладачів закладів вищої освіти, аспірантів та студентів.

Рекомендовано до друку Вченою Радою Буковинського державного медичного університету (Протокол №11 від 22.06.2022 р.)

ISBN 978-966-697-983-7

аналіз, що був застосований для вивчення просторової структури білкових молекул, які містять у своєму складі велику кількість атомів, сприяв становленню молекулярної біології. Цим методом було розшифровано структуру ДНК.

Вивчення біологічних об'єктів (напр., оцінка розмірів клітин) здійснюється також за допомогою лазерного випромінювання. Дія лазерного випромінювання на біологічні системи викликає в них фотобіологічні ефекти, в основі яких лежать фотохімічні реакції. Лазерне випромінювання впливає на біологічні мембрани, сприяє інтенсифікації транспорту молекул та іонів внаслідок відкриття білкових каналів, що відбувається внаслідок незначного підвищення температури при поглинанні енергії.

Для вивчення в'язкості мікрокладових живих систем, зокрема плазматичних клітин, використовують метод поляризованої люмінесценції. Дослідження проводяться методом люмінесцентної мікроскопії.

Потужним інструментом у вивченні мікросвіту і вирішення багатьох практичних завдань біології та медицини є електронна мікроскопія. Найбільш важливим для біологічних досліджень є метод атомно-силової мікроскопії (АСМ). Це перспективний метод для вивчення клітинних мембран, білкових молекул, вірусів і бактерій з високою роздільною здатністю. АМС також використовується для вивчення фізіологічних процесів у біологічних системах у динаміці.

Оскільки фізичні та біофізичні методи дослідження знаходяться в постійному розвитку, то слід очікувати нових підходів до дослідження живої природи і нових можливостей у її пізнанні.

УДК 621.315.592

Ткачук І.Г.

Електричні властивості фоточутливих гетероструктур $n\text{-SnS}_2/p\text{-InSe}$. Використання в медичних приладах діагностики

Буковинський державний медичний університет, Чернівці, Україна

tkachuk.ivan@bsmu.edu.ua

Анотація. Досліджені умови виготовлення методом спреї-піролізу тонких плівок SnS_2 на кристалічні підкладки $p\text{-InSe}$ фоточутливих анізотипних гетеропереходів $n\text{-SnS}_2/p\text{-InSe}$ з подальшим застосуванням у лазерах медичних досліджень. За аналізом температурних

залежностей прямих і зворотних I - V -характеристик визначені енергетичні параметри гетеропереходу та механізми формування струмів у гетероструктурі. Запропонована модель визначення висоти енергетичного бар'єру у структурах з високим опором базової області. Встановлено профіль енергетичної діаграми гетероструктури, яка добре узгоджується із спостережуваними експериментально електрофізичними явищами. Проаналізовані процеси утворення фотоструму у гетероструктурі.

Ключові слова: фоточутливість, лазери, спреї-піроліз.

Тонкі плівки сульфідів олова (SnS , SnS_2 , Sn_2S_3) характеризуються різним фазовим складом, який визначає їх основні фізичні властивості. Плівки дисульфиду олова SnS_2 з шириною забороненої зони $E_g \approx 2,45\text{eV}$ [1] придатні для виготовлення фронтального шару фотоприймачів на основі гетеропереходів. Плівка SnS_2 містить хімічні елементи Sn і S, які широко розповсюджені, мають невисоку собівартість і малотоксичні. З використанням плівок SnS_2 виготовляються і досліджуються фоточутливі гетероструктури $n\text{-SnS}_2/p\text{-SnS}$ [2,3] і $\text{SnO}_2/\text{SnS}_2$ [4]. Також існують випрямляючі струм гетеропереходи $n\text{-SnS}_2/p\text{-Si}$ [5].

При виготовленні плівок дисульфиду олова віддають перевагу низьковартнісним невакуумним методам спреї-піролізу хімічних розчинів солей Sn і S [5,6], спін-коутінгу органічних розчинників [7], CBD-методу [8]. Дані методи забезпечують необхідні режими осадження плівок сульфідів [9,10] з потрібними фізичними властивостями.

Моно селенід індію InSe за значенням ширини забороненої зони $E_g = 1.2\text{ eV}$ відноситься до придатних матеріалів для фотоелектричного перетворення енергії в наземних умовах. Шарувата структура кристалів InSe зі слабким Ван-дер-Ваальсівським зв'язком обумовлює зручність у виготовленні підкладок для гетероструктур і позбавляє операцій різання злитків на пластини та їх механічної і хімічної обробки. З використанням селеніду індію створені фоточутливі і діодні структури різних типів: на основі бар'єру Шоттки [11], p - n -переходи [12,13] і гетеропереходи [14-17]. Відомо про створення гетероструктур $n\text{-SnS}_2/p\text{-InSe}$ методом посадки на оптичний контакт [18] з виникненням інверсійного шару у $p\text{-InSe}$. При цьому необхідна наявність шаруватого кристалу SnS_2 . Властивості гетероконтакту $n\text{-SnS}_2/p\text{-InSe}$ в значній мірі залежать від методу виготовлення. Застосування спреї-піролізу плівок SnS_2 позбавляє необхідності вирощування об'ємного матеріалу SnS_2 . Метод супроводжується термічними процесами розкладу хлоридних солей на поверхні $p\text{-InSe}$ із можливою зміною властивостей поверхні підкладок, що відображається на властивостях утвореного гетеропереходу $n\text{-SnS}_2/p\text{-InSe}$.

У даній роботі представлені результати дослідження електричних властивостей і спектральної фоточутливості гетеропереходу $n\text{-SnS}_2/p\text{-InSe}$, виготовленого методом спреї-піролізу тонких плівок дисульфиду олова на підкладках $p\text{-InSe}$.

Для одержання структур $n\text{-SnS}_2/p\text{-InSe}$ використовували вирощені методом Бріджмена кристали селеніду індію p -типу провідності. Для діркової електропровідності здійснювалося легування домішкою Cd (0.1 % за масою). За даними дослідження ефекту Холла концентрація носіїв заряду становила $p \approx 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ і їх рухливість перпендикулярно до вісі симетрії C в InSe при температурі 295 К дорівнювала $\mu_{pH} \approx 50 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$. Гетероструктури $n\text{-SnS}_2/p\text{-InSe}$ виготовлялися нанесенням плівок SnS_2 товщиною $\sim 0.3 - 0.4 \text{ }\mu\text{m}$ на поверхню нагрітих до температури $T_S = 350 \text{ }^\circ\text{C}$ підкладок $p\text{-InSe}$ методом спреї-піролізу за атмосферного тиску 0.1 М водних розчинів солей tin(IV) chloride pentahydrate $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ і thiourea $(\text{NH}_2)_2\text{CS}$. При піролізі формується бінарна сполука дисульфиду олова SnS_2 n -типу з електропровідністю $\sigma \approx 3 \cdot 10^{-1} \text{ }\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ та шириною забороненої зони $E_g = 2.4 \text{ eV}$ [3]. З врахуванням невисокої рухливості електронів у полікристалічних плівках $\mu = 2.43 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ [6] концентрація вільних носіїв заряду у плівках SnS_2 становить $n \approx 2.7 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Контакти до базового матеріалу $p\text{-InSe}$ і до плівки $n\text{-SnS}_2$ створювали за допомогою струмопровідної пасти на основі срібла. I - V -характеристики гетероструктур $n\text{-SnS}_2/p\text{-InSe}$ досліджувалися на вимірному комплексі SOLARTRON SI 1286, SI 1255 в температурному діапазоні $243 < T < 333 \text{ K}$. Спектри фоточутливості гетеропереходів вимірювалися при кімнатній температурі на монохроматорі МДР-3 з розрізною здатністю 2.6 нм/мм. Для спектрів здійснювалося нормування відносно потоку фотонів.

Дослідження I - V -характеристик в інтервалі напруг $-3 \text{ V} < V < 3 \text{ V}$ при температурах від $T = 243 \text{ K}$ до $T = 333 \text{ K}$ вказували на здатність гетероструктури $n\text{-SnS}_2/p\text{-InSe}$ випрямляти струм (рис.1). Пряме зміщення гетеропереходу відповідало прикладанню позитивного потенціалу до базової області $p\text{-InSe}$, зворотне зміщення – позитивному потенціалу на плівці $n\text{-SnS}_2$.

Струм у базовій області $p\text{-InSe}$ гетероструктури $n\text{-SnS}_2/p\text{-InSe}$ протікає у перпендикулярному напрямку відносно площини шарів кристалу. Це зумовлює виникнення у структурі значного послідовного опору R_s . При прямому зміщенні, внаслідок зменшення опору електричного переходу вся зовнішня напруга, починаючи з певного значення, прикладається до високоомної базової області $p\text{-InSe}$. У цьому випадку виникає обмеження струму областю просторового заряду (SCL – space charge limit). Струм через space charge limit (квадратичний закон) визначається виразом [19]:

$$I_{SCL} = \frac{9\epsilon_S \epsilon_0 V^2}{8L^3}, \quad (1)$$

де L – товщина space charge limit області, ϵ_S – діелектрична проникність напівпровідника.

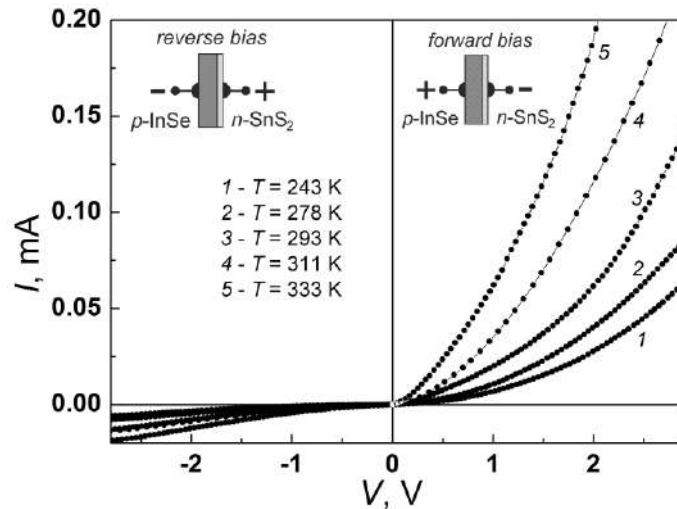


Рис.1. I - V -характеристики гетероструктури n - SnS_2/p - InSe в температурному діапазоні від $T=243$ К до $T=333$ К

У випадку існування у структурі space charge limit згідно (1) I - V -характеристика при прямих зміщеннях у координатах $\ln I = f(\ln V)$ є лінійною з кутом нахилу $\text{tg}\beta = m = 2$. У досліджуваній гетероструктурі n - SnS_2/p - InSe space charge limit область проявляється за прямих напруг $V > 0.6$ В при $T = 243$ К (рис.2).

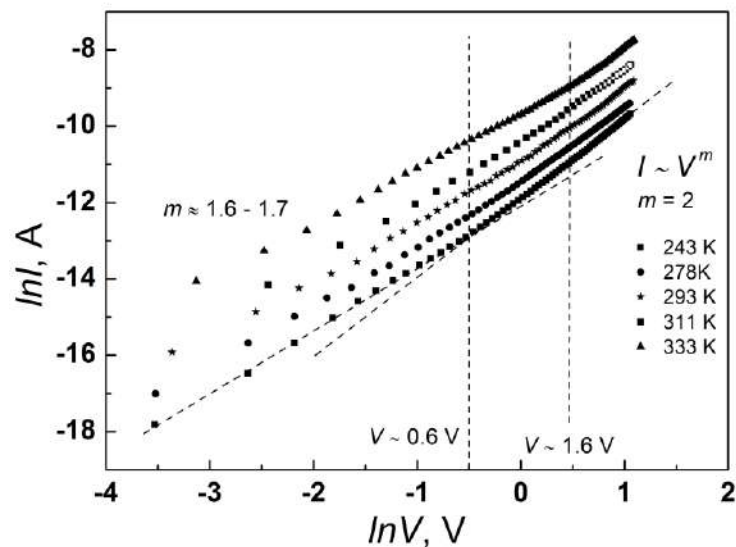


Рис.2. Space charge limit механізм утворення прямого струму гетероструктури n - SnS_2/p - InSe при напругах $V > 0.6$ В ($T = 243$ К) та при $V > 1.6$ В ($T = 333$ К)

При збільшенні температури зменшується опір базової області p -InSe і для виникнення достатньої напруженості електричного поля space charge limit області необхідна більша пряма напруга. На I - V -характеристиках гетероструктури n -SnS₂/ p -InSe при $T=333$ К space charge limit спостерігається при більшому прямому зміщенні $V>1.6$ В (рис.2). У області менших прямих напруг, при яких у координатах $\ln I = f(\ln V)$ значення $m=1.6-1.7$, механізми формування прямого струму визначаються енергетичним бар'єром на гетеропереході n -SnS₂/ p -InSe.

Для з'ясування механізму утворення прямого струму крізь енергетичний бар'єр гетеропереходу n -SnS₂/ p -InSe проводився аналіз I - V -характеристики у координатах $\ln I = f(V)$ у діапазоні напруг $3kT/q < V < 1.6$ В (рис.3). У температурному інтервалі $T = 243-333$ К залежності $\ln I = f(V)$ характеризуються незалежним від температури нахилом $d(\ln I)/dV$. При використанні для опису I - V -характеристик виразу:

$$I(V) = I_s \exp\left(\frac{qV}{AkT}\right), \quad (2)$$

коефіцієнт неідеальності змінюється в межах $3.5 < A < 20$. Високі значення A у подібних до досліджуваних структур гетеропереходах p -Ge/ n -Si ($A = 24.9 - 29.4$) [20] є результатом тунельного або тунельно-рекомбінаційного механізмів протікання носіїв заряду крізь бар'єр висотою ϕ_B , які описуються виразом:

$$I(V) = BN_i \exp[-A_0 (\phi_B - V)], \quad (3)$$

де B – постійна, N_i – концентрація пасток в забороненій зоні, A_0 – величина, яка залежить від концентрації домішок N у напівпровіднику, з якого здійснюється тунелювання:

$$A_0 = \frac{4}{3\hbar} \left(\frac{m_0 \epsilon_S}{N} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

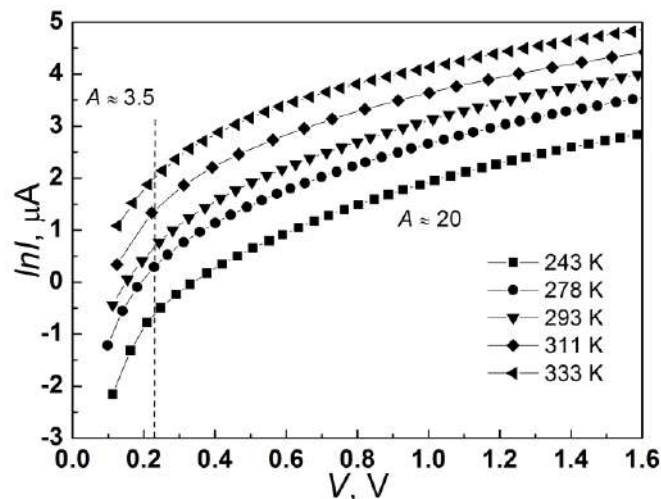


Рис.3. Прямі гілки I - V -характеристик гетероструктури n -SnS₂/ p -InSe в координатах $\ln(I) = f(V)$

З урахуванням спаду напруги на послідовному опорі базової області напруга на електричному переході дорівнює $V - IR_S$ і вираз (3) набуває вигляду:

$$I(V) = BN_t \exp[-A_0(\varphi_B - V + IR_S)]. \quad (5)$$

Логарифмування виразу (5) і диференціювання за напругою дає формулу для аналізу механізмів формування прямого струму:

$$\frac{d(\ln I)}{dV} = -A_0 \left(\frac{d(\varphi_B - V)}{dV} + \frac{dI \cdot R_S}{dV} \right). \quad (6)$$

У випадку, коли спад напруги на електричному переході більший за спад напруги на послідовному опорі $(\varphi_B - V) \gg IR_S$, зовнішня напруга прикладена до електричного переходу і формулу (6) можна записати у вигляді:

$$\frac{d(\ln I)}{dV} = -A_0 \left(\frac{d(\varphi_B - V)}{dV} \right). \quad (7)$$

У випадку зменшення опору електричного переходу $(\varphi_B - V) \rightarrow 0$ залежність (6) $d(\ln I)/dV = f(dI/dV)$ є лінійною з нахилом до осі абсцис $A_0 \cdot R_S$.

На рис.6. показаний графік залежності $d(\ln I)/dV = f(dI/dV)$ для прямих гілок I - V -характеристики гетероструктури n -SnS₂/ p -InSe. Дана залежність характеризується двома лінійними ділянками. При малих швидкостях зміни струму від напруги dI/dV величина $d(\ln I)/dV$ стрімко зменшується внаслідок зниження опору електричного переходу. Коли опір переходу стає меншим за послідовний опір, то динаміка зміни величини $d(\ln I)/dV$ уповільнюється і визначається послідовним опором.

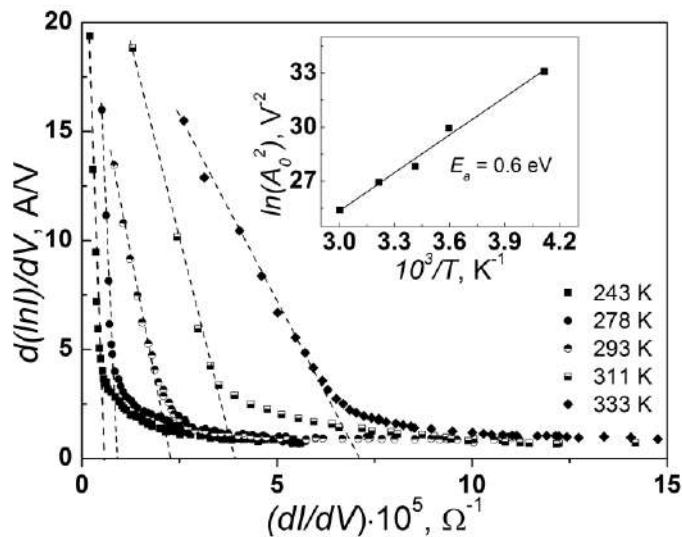


Рис.4. Прямі гілки I - V -характеристик гетероструктури n -SnS₂/ p -InSe в координатах $d(\ln I)/dV = f(dI/dV)$ і визначення енергії активації E_a у плівці SnS₂ (вставка)

Згідно (7) екстраполяцією лінійних ділянок $d(\ln(I))/dV \rightarrow 0$ можна знайти значення dI/dV при якому $(\varphi_B - V) = 0$, тобто $\varphi_B = V$. Значення напруги на гетеропереході, яке відповідає даним dI/dV екстраполяції при різних температурах, не залежало від температури і дорівнювало $V = \varphi_B = 0.5$ V. Це вказує що при малих прямих зміщеннях (до 0.5 V) струм у гетероструктурі $n\text{-SnS}_2/p\text{-InSe}$ утворюється шляхом тунелювання крізь енергетичний бар'єр висотою $q\varphi_B \approx 0.5$ eV, величина якого не залежить від температури.

Для детальнішого аналізу електричних властивостей гетеропереходу $n\text{-SnS}_2/p\text{-InSe}$ використовувалася енергетична діаграма (рис.5), яка передбачає існування на межі поділу напівпровідників енергетичного бар'єру із незалежною від температури висотою. Для побудови енергетичної діаграми використовувалися значення спорідненості до електрона $\chi(\text{SnS}_2) = 4.9$ eV [21] і $\chi(\text{InSe}) = 4.55 - 4.6$ eV [22-25] та ширини забороненої зони $E_g(\text{SnS}_2) = 2.4$ eV [26] і $E_g(\text{InSe}) = 1.2$ eV [27]. Використана величина $E_g(\text{SnS}_2)$ відповідає експериментальному значенню, яке властиве плівкам отриманим при спреї-піролізі за температур $T_S = 350$ °C, при яких виготовлялися гетеропереходи $n\text{-SnS}_2/p\text{-InSe}$. При виготовленні гетероструктур методом спреї-піролізу у ряді випадків внаслідок нагрівання спостерігається зміна фазового складу поверхні підкладок [14,28]. У роботі [14] аналізується вплив тунельно-тонкого шару In_2Se_3 на властивості гетеропереходу на основі $p\text{-InSe}$. Енергетичні параметри In_2Se_3 $E_g \approx 1.7$ eV [29,30] і $\chi = 4.44$ eV [31] добре узгоджуються із виникненням енергетичного бар'єра висотою $q\varphi_B \approx 0.5$ eV, який експериментально спостерігається на межі гетероконтакту $n\text{-SnS}_2/p\text{-InSe}$.

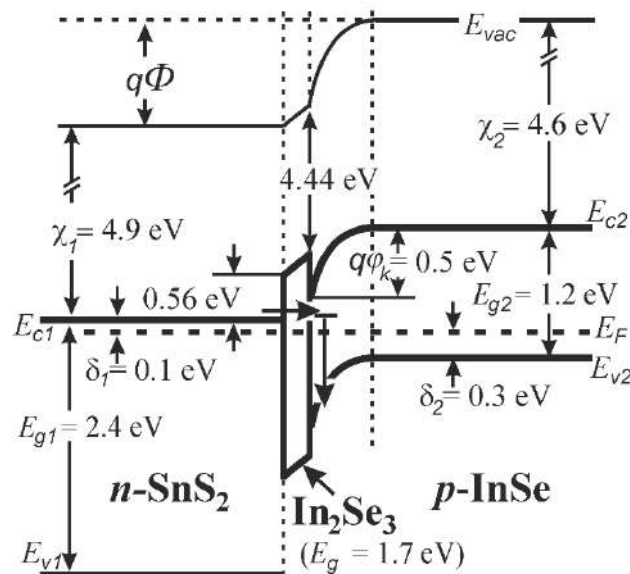


Рис.5. Енергетична діаграма гетеропереходу $n\text{-SnS}_2/p\text{-InSe}$ ($T = 300$ K) з енергетичним бар'єром $q\varphi_B = 0.56$ eV, висота якого не залежить від температури

Розташування рівня Фермі в заборонених зонах відносно дна зони провідності для n -SnS₂ ($\delta_1 = 0.1$ eV) і стелі валентної зони p -InSe ($\delta_2 = 0.3$ eV) визначалися з виразів для концентрації рівноважних носіїв заряду невідроджених напівпровідників [32]. При формуванні гетеропереходу n -SnS₂/ p -InSe внаслідок різниці робіт виходу електронів $(\chi_2 + E_{g2} - \delta_2) - (\chi_1 + E_{g1}) = 0.5$ eV утворюється контактна різниця потенціалів $\varphi_k = 0.5$ V, яка, згідно розрахунків [33], зосереджена у приконтактній області p -InSe.

Механізм тунелювання електронів з дна зони провідності n -SnS₂ крізь бар'єр висотою $q\varphi_B = 0.56$ eV (рис.5) на рівні у забороненій зоні p -InSe, які розташовані на віддалі 0.3 eV 0.4 eV від дна зони провідності добре узгоджується з природою виникнення даних рівнів. Згідно роботи [34] вони пов'язані із вакансіями аніонів у InSe, які при застосуванні методу спреї-піролізу виникають внаслідок нагрівання підкладки. Альтернативні до тунельно-рекомбінаційного механізми утворення струму, зображеного на рис.5, погано узгоджуються з експериментальними даними. За відсутності шару In₂Se₃ захоплення електронів станами на межі поділу і тунелювання у валентну зону передбачає залежність висоти бар'єру $q\varphi_k$ від температури, що не спостерігається. Незалежна від температури висота бар'єру на межі гетеропереходу n -SnS₂/ p -InSe може існувати внаслідок розриву зони провідності, але вона значно менша $\chi_1 - \chi_2 = 0.3$ eV за експериментально спостережувану.

Тунельна прозорість W бар'єра висотою $q\varphi_B = 0.56$ eV, яка розрахована згідно співвідношення [35]:

$$W = \exp\left(-\frac{2}{\hbar} \cdot d \cdot \sqrt{2m^* \varphi_B}\right), \quad (8)$$

змінюється від $W \approx 1$ при товщині плівки In₂Se₃ $d = 0.3$ nm до $W \approx 0.05$ при $d = 0.6$ nm. Тобто, експериментально спостережувана здатність тунелювання відбуватиметься при товщині плівки In₂Se₃ $d = 0.3 - 0.6$ nm.

Залежність від температури кута нахилу лінійних ділянок на рис.4, які використовувалися для визначення висоти енергетичного бар'єра $q\varphi_B \approx 0.5$ eV на гетеропереході n -SnS₂/ p -InSe, пов'язана із збільшенням концентрації електронів у n -SnS₂ (4). Побудова залежності $\ln(A^2) = f(10^3/T)$ дозволяє визначити енергію активації електропровідності E_a у плівці (рис.4, вставка). Отримане значення $E_a = 0.6$ eV добре узгоджується відомими даними як для об'ємного [36], так і для тонкоплівкового [37] напівпровідника SnS₂.

Зворотні гілки I - V -характеристик гетеропереходу n -SnS₂/ p -InSe при температурах $T = 243 - 333$ К у досліджуваному діапазоні зворотних напруг $-3 \text{ V} < V < 0 \text{ V}$ описується виразом для тунельного струму [20]:

$$I = a_0 \exp\left(-b_0(\varphi_B - V)^{-1/2}\right), \quad (9)$$

де a_0 – параметр, який визначається ймовірністю заповнення електронами енергетичних рівнів з яких відбувається тунелювання, b_0 – визначає швидкість зміни струму від напруги.

Згідно (9) в координатах $\ln I = f(\varphi_B - V)^{-1/2}$ I - V -характеристика є лінійною (рис.6). При напругах $-3 \text{ V} < V < 0 \text{ V}$ зворотний струм у гетероструктурі n -SnS₂/ p -InSe формується тунелюванням електронів з дна зони провідності і енергетичних станів забороненої зони $E_{C2} - E_F = 0.3 - 0.4 \text{ eV}$ p -InSe у зону провідності n -SnS₂ крізь енергетичний бар'єр утворений In₂Se₃.

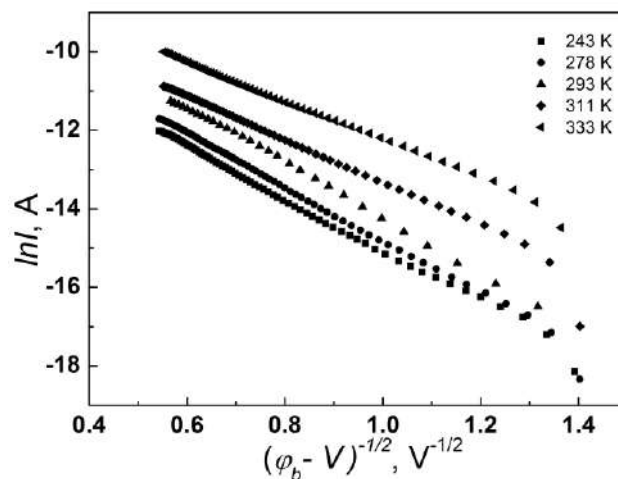


Рис.6. I - V -характеристики гетеропереходу n -SnS₂/ p -InSe при зворотному зміщенні при різних температурах T

Спектральна залежність квантової ефективності опроміненої зі сторони плівки SnS₂ гетероструктури n -SnS₂/ p -InSe знаходиться в інтервалі енергій фотонів $1.2 - 3.2 \text{ eV}$ з максимумом при 1.7 eV (рис.7). Довгохвильовий край fotocутливості при $h\nu = 1.2 \text{ eV}$ обумовлений краєм фундаментального поглинання в p -InSe. Розділення фотогенерованих у p -InSe електронів відбувається крізь тунельно-тонкий бар'єр In₂Se₃ (I на вставці рис.7). Тонкі плівки n -SnS₂ є полікристалічними, внаслідок чого край власного поглинання розмитий через часткове поглинання на границях зерен порівняно з монокристалічними матеріалами [26]. При енергіях $h\nu < E_g = 2.4 \text{ eV}$ частина випромінювання поглинається на границях зерен. При цьому, світло яке здатне поглинатися у p -InSe не проникає у базову область через поглинання у n -SnS₂ без утворення неосновних носіїв заряду – дірок, які формують фотострум (2 на вставці рис.7). На спектральній характеристиці спостерігається зниження fotocутливості (область 2, рис.7). При енергії квантів $h\nu > 2.4 \text{ eV}$ у плівці n -SnS₂ генеруються вільні неосновні носії

заряду, які дифундують до гетеропереходу і формують струм. Фоточутливість при цьому збільшується (область 3, рис.7). Повна ширина спектру відносної квантової ефективності на напіввисоті $\delta_{1/2}$ дорівнює ~ 1.8 .

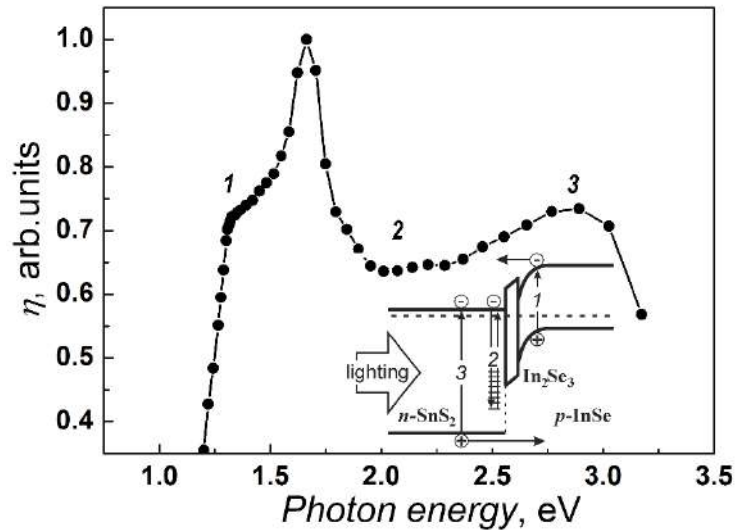


Рис.7. Спектральна залежність відносної квантової ефективності гетеропереходу $n\text{-SnS}_2/p\text{-InSe}$

Методом спреї-піролізу плівок SnS_2 на поверхні $p\text{-InSe}$ отримані фоточутливі гетероструктури $n\text{-SnS}_2/p\text{-InSe}$. Діодні властивості структур визначаються різницею енергетичних параметрів $n\text{-SnS}_2$ і $p\text{-InSe}$ та енергетичним бар'єром тунельно-тонкого шару In_2Se_3 із незалежною від температури висотою $q\phi_B \approx 0.5$ eV. При прямих зміщеннях $V < 0.6$ V ($T \approx 290$ K) основним механізмом проходження струму є тунелювання електронів з дна зони провідності $n\text{-SnS}_2$ крізь бар'єр на стани у забороненій області $p\text{-InSe}$ з наступною рекомбінацією з дірками валентної зони. Швидкість наростання з тунельного струму від напруги при підвищенні температури збільшується через зростання концентрації електронів у зоні провідності $n\text{-SnS}_2$. При прямих напругах $V > 0.6$ V ($T \approx 290$ K) спад зовнішньої напруги зосереджується на високоомній базовій області $p\text{-InSe}$ і реалізується механізм space charge limit. При підвищенні температури напруга прояву space charge limit збільшується до $V = 1.6$ V ($T \approx 330$ K). Зворотний струм у діапазоні досліджуваних напруг -3 V $< V < 0$ V у гетероструктурі $n\text{-SnS}_2/p\text{-InSe}$ формується тунелюванням електронів з дна зони провідності і енергетичних станів забороненої зони $E_{C2} - E_F = 0.3 - 0.4$ eV $p\text{-InSe}$ у зону провідності $n\text{-SnS}_2$ крізь енергетичний бар'єр утворений In_2Se_3 .

Широкий спектр квантової ефективності гетероструктур $n\text{-SnS}_2/p\text{-InSe}$ 1.2 – 3.2 eV сприяє перспективі їх використання як фотоприймачів за умови зниження нефотоактивного поглинання світла у плівці $n\text{-SnS}_2$.

Список використаних джерел

1. Y. Huang, E. Sutter, J.T. Sadowski, M. Cotlet, O.L.A. Monti, D.A. Racke, M.R. Neupane, D. Wickramaratne, R.K. Lake, B.A. Parkinson, P. Sutter, Tin Disulfide—An Emerging Layered Metal Dichalcogenide Semiconductor: Materials Properties and Device Characteristics, *ACS Nano*. 8 (2014) 10743–10755. doi:10.1021/nn504481r.
2. Sánchez-Juárez, A. Tiburcio-Silver, A. Ortiz, Fabrication of SnS₂/SnS heterojunction thin film diodes by plasma-enhanced chemical vapor deposition, *Thin Solid Films*. 480–481 (2005) 452–456. doi: 10.1016/j.tsf.2004.11.012.
3. Degrauw, R. Armstrong, A.A. Rahman, J. Ogle, L. Whittaker-Brooks, Catalytic growth of vertically aligned SnS/SnS₂ p–n heterojunctions, *Materials Research Express*. 4 (2017) 094002. doi:10.1088/2053-1591/aa8a37.
4. H. Chen, M. Gu, X. Pu, J. Zhu, L. Cheng, Fabrication of SnO₂@SnS₂ heterostructure with enhanced visible light photocatalytic activity, *Materials Research Express*. 3 (2016) 065002. doi:10.1088/2053-1591/3/6/065002.
5. G.M. Kumar, F. Xiao, P. Ilanchezhian, S. Yuldashev, T.W. Kang, Enhanced photoelectrical performance of chemically processed SnS₂ nanoplates, *RSC Advances*. 6 (2016) 99631–99637. doi:10.1039/C6RA20491K.
6. M.R. Fadavieslam, A study of the structural, optical, and electrical properties of SnS₂:Cu optical semiconductor thin films deposited by the spray pyrolysis technique, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 28 (2017) 2392–2400. doi:10.1007/s10854-016-5809-2.
7. T. Řičica, L. Stržik, L. Dostál, M. Bouška, M. Vlček, L. Beneš, T. Wágner, R. Jambor, SnS and SnS₂ thin films deposited using a spin-coating technique from intramolecularly coordinated organotin sulfides: Spin-coating deposition from organotin sulfides, *Applied Organometallic Chemistry*. 29 (2015) 176–180. doi:10.1002/aoc.3267.
8. S. Gedi, V.R. Minnam Reddy, B. Pejjai, C. Park, C.-W. Jeon, T.R.R. Kotte, Studies on chemical bath deposited SnS₂ films for Cd-free thin film solar cells, *Ceramics International*. 43 (2017) 3713–3719.
9. G. Orletskii, P. D. Mar'yanchuk, E. V. Maistruk, M. N. Solovan, V. V. Brus, Low-temperature spray-pyrolysis of FeS₂ films and their electrical and optical properties // *Physics of the Solid State* – 2016. – V.58, №1. – P. 37 – 41.
10. I.G. Orletskii, M.N. Solovan, F. Pinna, G. Cicero, P.D. Mar'yanchuk, E.V. Maistruk, E. Tresso, Structural, optical, and electrical properties of Cu₂SnS₃ thin films produced by sol gel method, *Physics of the Solid State*. 59(4), 2017, 801–807.
11. Segura, J.P. Guesdon, J.M. Besson, A. Chevy, Photovoltaic effect in InSe - Application to Solar Energy Conversion, *Rev. Phys. Appl. (Paris)*. 14 (1979) 253–257. <https://doi.org/10.1051/rphysap:01979001401025300>.
12. V.A. Khandozhko, Z.R. Kudrynskyi, Z.D. Kovalyuk, Effect of low-temperature annealing on the quality of InSe layered single crystals and the characteristics of n-InSe/p-InSe heterojunctions, *Semiconductors*. 48 (2014) 545–550. <https://doi.org/10.1134/S1063782614040149>.
13. Segura, J.P. Guesdon, J.M. Besson, A. Chevy, Photoconductivity and photovoltaic effect in indium selenide, *Journal of Applied Physics*. 54 (1983) 876–888. <https://doi.org/10.1063/1.332050>.
14. G. Orletsky, M. I. Ilashchuk, V. V. Brus, P. D. Mar'ianchuk, M. M. Solovan, Z. D. Kovalyuk. Electrical and Photoelectric Properties of the TiN/p-InSe Heterojunction // *Semiconductors* – 2016. – V.50, №3. – P. 334 – 338.
15. Z.R. Kudrynskyi, Z.D. Kovalyuk, V.M. Katerynychuk, V.V. Khomyak, I.G. Orletsky, V.V. Netyaga, Fabrication and Characterization of Photosensitive n-CdO/p-InSe Heterojunctions, *Acta Physica Polonica A*. 124 (2013) 720–723.
16. V.N. Katerynychuk, Z.R. Kudrynskyi, V.V. Khomyak, I.G. Orletsky, V.V. Netyaga, Electrical and photoelectric properties of n-CdO-p-InSe anisotype heterojunctions, *Semiconductors*. 47 (2013) 943–946. <https://doi.org/10.1134/S1063782613070099>.

17. Tkachuk, I.G., Orletsky, I.G., Kovalyuk, Z.D., Marianchuk, P.D., Electrical properties of photosensitive heterostructures n-FeS₂/p-InSe, *Functional Materials*, 25, №3, (2018). P.463-470.
18. Katerinchuk V.N., Kovalyuk M.Z. Photoelectric properties of n-SnS₂-p-InSe heterojunction // *J. Adv. Mater.* - 1997. - Vol. 4, № 1. - P. 40-43.
19. M.A. Lampert, P. Mark. *Current injection in solids* (Academic Press, 1970) [ISBN: 9780124353503].
20. A.G. Milnes, D.L. Feucht. *Heterojunctions and metal-semiconductor junctions* (Academic Press, 1972) [ISBN:0124980503].
21. L.A. Burton, D. Colombara, R.D. Abellon, F.C. Grozema, L.M. Peter, T.J. Savenije, G. Dennler, A. Walsh, *Synthesis, Characterization, and Electronic Structure of Single-Crystal SnS, Sn₂S₃ and SnS₂*, *Chemistry of Materials*. 25 (2013) 4908–4916.
22. G.W. Mudd, S.A. Svatek, L. Hague, O. Makarovskiy, Z.R. Kudrynskiy, C.J. Mellor, P.H. Beton, L. Eaves, K.S. Novoselov, Z.D. Kovalyuk, E.E. Vdovin, A.J. Marsden, N.R. Wilson, A. Patané, *High Broad-Band Photoresponsivity of Mechanically Formed InSe-Graphene van der Waals Heterostructures*, *Advanced Materials*. 27 (2015) 3760–3766.
23. F. Yan, L. Zhao, A. Patané, P. Hu, X. Wei, W. Luo, D. Zhang, Q. Lv, Q. Feng, C. Shen, others, *Fast multicolor photodetectors based on graphene-contacted p-GaSe/n-InSe van der Waals heterostructures*, *Nanotechnology*, 28(27) (2017) 02534.
24. M.K.L. Man, A. Margiolakis, S. Deckoff-Jones, T. Harada, E.L. Wong, M.B.M. Krishna, J. Madéo, A. Winchester, S. Lei, R. Vajtai, P.M. Ajayan, K.M. Dani, *Imaging the motion of electrons across semiconductor heterojunctions*, *Nature Nanotechnology*. 12 (2016) 36–40.
25. S.E. Al Garni, O.A. Omareye, A.F. Qasrawi, *Growth and characterization of InSe/Ge/InSe interfaces*, *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*. 144 (2017) 340–347.
26. G. Orletskii, P. D. Maryanchuk, E. V. Mastruk, M. N. Solovan, D. P. Koziarskiy, V. V. Brus, *Modification of the properties of tin sulfide films grown by spray pyrolysis* // *Inorganic Materials* – 2016. – V.52, №8. – P. 851 – 857.
27. Z.D. Kovalyuk, O.N. Sydor, V.N. Katerinchuk, V.V. Netyaga, *A study of isotype photosensitive heterostructures (intrinsic oxide)-n-InSe prepared by long-term thermal oxidation*, *Semiconductors*. 41 (2007) 1056–1059. <https://doi.org/10.1134/S1063782607090096>.
28. I.G. Orletskiy, M.I. Ilashchuk, E.V. Mastruk, M.M. Solovan, P.D. Maryanchuk, S.V. Nichiyi, *Electrical Properties of SIS Heterostructures n-SnS₂/CdTeO₃/p-CdZnTe*, *Ukrainian Journal of Physics*. 64 (2019) 164. <https://doi.org/10.15407/ujpe64.2.164>.
29. R. Vaidyanathan, J.L. Stickney, S.M. Cox, S.P. Compton, U. Happek, *Formation of In₂Se₃ thin films and nanostructures using electrochemical atomic layer epitaxy*, *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 559 (2003) 55–61. [https://doi.org/10.1016/S0022-0728\(03\)00053-6](https://doi.org/10.1016/S0022-0728(03)00053-6).
30. S.B. Bansode, R.S. Kapadnis, A.S. Ansari, V.G. Wagh, A.N. Kulkarni, S.S. Kale, H.M. Pathan, *Indium selenide microrod films: chemical bath deposition from acidic bath*, *J Mater Sci: Mater Electron*. 27 (2016) 12351–12356. <https://doi.org/10.1007/s10854-016-5145-6>.
31. Z. Zheng, J. Yao, G. Yang, *Self-Assembly of the Lateral In₂Se₃/CuInSe₂ Heterojunction for Enhanced Photodetection*, *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 9 (2017) 7288–7296. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b16323>.
32. S.M. Sze, K.N. Kwok. *Physics of semiconductor devices* (Wiley, 2006) [ISBN: 9780471143239].
33. B.L. Sharma, R.K. Purohit. *Semiconductor heterojunctions* (Pergamon Press, 1974) [ISBN:9781483280868].

34. M.A. Mehrabova, R.S. Madatov, Calculation of the electron structure of vacancies and their compensated states in III-VI semiconductors, *Semiconductors*. 45 (2011) 998–1005. <https://doi.org/10.1134/S1063782611080136>.
35. I.G. Orletskyi, M.M. Solovan, V.V. Brus, F. Pinna, G. Cicero, P.D. Maryanchuk, E.V. Maistruk, M.I. Ilashchuk, T.I. Boichuk, E. Tresso, Structural, optical and electrical properties of Cu₂ZnSnS₄ films prepared from a non-toxic DMSO-based sol-gel and synthesized in low vacuum, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 100 (2017) 154–160. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2016.09.015>.
36. S.G. Patil, R.H. Tredgold, Electrical and photoconductive properties of SnS₂ crystals, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 4 (1971) 718–722. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/4/5/312>.
37. Voznyi, V. Kosyak, A. Opanasyuk, N. Tirkusova, L. Grase, A. Medvids, G. Mezinskis, Structural and electrical properties of SnS₂ thin films, *Materials Chemistry and Physics*. 173 (2016) 52–61. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2016.01.036>.

УДК 537.623

Ткачук І.Г.

Екситонна фотопровідність гетероструктур на основі селену галію і селену індію

Буковинський державний медичний університет, Чернівці, Україна

tkachuk.ivan@bsmu.edu.ua

Анотація. У даній роботі представлені спектри фоточутливості різних типів гетеропереходів (ГП) на основі шаруватих кристалів $A^{III}B^{VI}$, виготовлених як з ван-дер-ваальсівським зв'язком пар на гетеромежі, так і з ковалентним, і обговорюються особливості їх екситонних смуг. Прикладами першого типу гетеропереходу послужили пари $n\text{-InSe-p-InSe}$, $p\text{-GaSe-n-InSe}$, $p\text{-GaSe-n-In}_4\text{Se}_3$, $n\text{-SnS}_2\text{-p-InSe}$. В якості гетеропереходу з ковалентним зв'язком виявилися інші системи: $\text{In}_2\text{O}_3\text{-InSe}$, $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-GaSe}$, $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-GaTe}$. Зазначені гетеропереходи, сформовані за участю власних оксидів різної хімічної природи. У випадку, де оксид володіє провідними властивостями він відігравав безпосередню активну роль у формуванні гетеропереходу. Водночас, формування гетеропереходу з допомогою високотемпературного нагріву підкладок на повітрі, невимушено приводило до неконтрольованого росту власних оксидів на $p\text{-GaSe}$ і $p\text{-GaTe}$, які проявили діелектричні властивості.

Ключові слова: гетероструктура, поглинання, фоточутливість.

У ГП міжфазна границя є перехідною областю від однієї кристалічної ґратки до іншої. Трансляційна симетрія атомів у цій зоні порушується і їх теплові коливання можуть відрізнитись від аналогічних об'ємних коливань. Зазвичай, енергія зв'язку екситонів у ШК менша в порівнянні із тепловою енергією kT при кімнатній температурі і, тому, для їх