



МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **116965** (13) **U**
(51) МПК (2017.01)
H01L 29/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2016 13358	(72) Винахідник(и): Возний Андрій Андрійович (UA), Косяк Володимир Володимирович (UA), Опанасюк Анатолій Сергійович (UA)
(22) Дата подання заявки: 26.12.2016	(73) Власник(и): СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 12.06.2017	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 12.06.2017, Бюл.№ 11	

(54) СПОСІБ ОТРИМАННЯ ТОНКОПЛІВКОВИХ ГЕТЕРОПЕРЕХІДНИХ (ГП) СТРУКТУР n-SnS₂/p-SnS МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО ОПРОМІНЕННЯ ВИХІДНОГО МАТЕРІАЛУ SnS₂

(57) Реферат:

Спосіб отримання тонкоплівкових гетероперехідних структур n-SnS₂/p-SnS включає вирощування шару дисульфиду олова (SnS₂) з n-типом провідності шляхом термічного випаровування на підкладку вихідного матеріалу SnS₂ у квазізамкненому об'ємі (КЗО). На поверхні одержаного шару SnS₂ з n-типом провідності додатково формують однорідний за площею шар сульфиду олова (SnS) з p-типом провідності шляхом лазерного опромінення шару SnS₂ з n-типом провідності з інтенсивністю I=8,5-11,5 МВт/см². Лазерне опромінення шару SnS₂ з n-типом провідності проводять на повітрі при атмосферному тиску, з використанням другої гармоніки Nd:YAG лазера (λ=532 нм). Опромінення поверхні шару проводять при постійній швидкості 1,6·10⁻⁴ м/с сфокусованим лазерним пучком з діаметром плями 1,5·10⁻³-1,3·10⁻³ м та тривалістю імпульсу 4 нс.

UA 116965 U

Корисна модель належить галузі матеріалознавства, зокрема до способів створення приладів електроніки (геліоенергетики та оптоелектроніки) на основі ГП структур, а саме до технології виготовлення полікристалічних ГП структур n-SnS₂/p-SnS, які можуть бути використані як тонкоплівкові сонячні елементи (СЕ) третього покоління широкомасштабного використання та фотодетектори.

Бінарна система Sn_xS_y має значний потенціал використання в оптоелектроніці та геліоенергетиці. Зокрема, сполука SnS₂ n-типу провідності є перспективним матеріалом для створення віконних шарів СЕ через високу рухливість носіїв заряду і широку заборонену зону 2,24 eВ [A. Sanchez-Juarez, 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.; 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, *Chem. Mater.* 25 (2013) 4908-4916. doi:10.1021/cm403046m.; J. A. Andrade-Arvizu, M. Courel-Piedrahita, O. Vigil-Galán, SnS-based thin film solar cells: perspectives over the last 25 years, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 26 (2015) 4541-4556. doi: 10.1007/s10854-015-3050-z.]. У той же час напівпровідникова сполука SnS, що має провідність р-типу, має унікальні властивості, які обумовлюють її застосування в геліоенергетиці, як поглинаючий шар фотоперетворювачів, замість традиційних шарів CdTe, CuInSe₂ (CIS), та Cu(In, Ga)(S, Se)₂ (CIGSS) [J.A. Andrade-Arvizu, M. Courel-Piedrahita, O. Vigil-Galán, SnS-based thin film solar cells: perspectives over the last 25 years, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 26 (2015) 4541-4556. doi:10.1007/s10854-015-3050-z.; S. Prasert, Development of Earth-Abundant Tin (II) Sulfide Thin-Film Solar Cells by Vapor Deposition, 2013. <http://nrs.harvard.edu/urn-3:HUL.InstRepos:11051177>.]. Це обумовлено тим, що цей матеріал має близьке до оптимуму Шоклі-Квайсера значення ширини забороненої зони (E_g=1,35 eВ) та високий коефіцієнт поглинання світла (α>10⁴ см⁻¹) [S. Prasert, Development of Earth-Abundant Tin (II) Sulfide Thin-Film Solar Cells by Vapor Deposition, 2013. <http://nrs.harvard.edu/urn-3:HUL.InstRepos:11051177>.]. Саме тому теоретична ефективність СЕ на основі шарів SnS може досягати 32 %. Іншими важливими перевагами сполуки Sn_xS_y є низька вартість компонентів, широка розповсюдженість у земній корі та їх не токсичність [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, *Chem. Mater.* 25 (2013) 4908-4916. doi:10.1021/cm403046m.]. Незважаючи на це, максимальна ефективності СЕ на основі SnS, у наш час, становить тільки 4,4 % [P. Sinsermsuksakul, L. Sun, S.W. Lee, H.H. Park, S.B. Kim, C. Yang, R.G. Gordon, Overcoming efficiency limitations of SnS-based solar cells, *Adv. Energy Mater.* 4 (2014) 1400496(1-7). doi:10.1002/aenm.201400496.]. Такий низький ККД пояснюється низькою структурною якістю синтезованого матеріалу за рахунок утворення дефектів різного типу та сторонніх фаз (включаючи оксидні), які є ефективними рекомбінаційними центрами для генерованих світлом нерівноважних носіїв заряду.

Звичайно процедура створення ГП структур на основі плівок Sn_xS_y для геліоенергетики та оптоелектроніки є багатоступеневою та включає цілий ряд етапів, деякі з яких є екологічно небезпечними (відпал у атмосфері H₂S).

Так в роботі [P. Sinsermsuksakul, L. Sun, S.W. Lee, H.H. Park, S.B. Kim, C Yang, R.G. Gordon, Overcoming efficiency limitations of SnS-based solar cells, *Adv. Energy Mater.* 4 (2014) 1400496(1-7). doi: 10.1002/aenm.201400496.] групою вчених з Массачусетського технологічного інституту було отримано СЕ на основі багатошарової структури, що включала шар сульфиду олова (SiO₂/Mo/SnS/SnO₂/Zn(O, S)/ZnO/ITO/Al) з рекордною ефективністю 4,4 %, наступним чином. На скляні підкладки, покриті струмознімальним підшаром молібдену, методом осадження атомних шарів (ALD), було нанесено шар SnS з товщиною 400 нм, який відігравав роль поглинача перетворювача. У подальшому було проведено термічний відпал цього шару протягом 1 год. при температурах вище 400 °С у атмосфері H₂S. Для зниження рекомбінаційних втрат носіїв заряду між шарами SnS та Zn(O, S) методом магнетронного розпилення було нанесено шар SnO₂ товщиною менше 1 нм. Після цього буферний шар Zn(O, S) товщиною 30 нм був нанесений для узгодження кристалічних ґраток матеріалів поглинаючого та віконного шарів перетворювача. В якості віконного шару було використано плівку ZnO з товщиною 10 нм. Верхні алюмінієві струмознімальні контакти (товщина 500 нм) були нанесені методом електронно-променевого випаровування. Автори встановили, що відпал шару SnS приводить до збільшення розмірів кристалітів, що в свою чергу збільшує рухливість носіїв заряду та зменшує кількість границь зерен. Даний технологічний процес отримання та обробки всіх складових шарів СЕ є дуже складний та вимагає використання високо коштовного обладнання.

- Методом плазмо-хімічного осадження з газової фази SnCl_4 та H_2S було отримано СЕ зі структурою $\text{TCO}/\text{SnS}_2/\text{SnS}/\text{Al}$ [A. Sánchez-Juárez, A. Tiburcio-Silver, A. Ortiz, Fabrication of SnS_2/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.]. Віконний шар SnS_2 був осаджений при температурі підкладки $T_s=150^\circ\text{C}$, потужності прикладеної до електродів $W_p=25\text{ мВт/см}^2$, тиску газів $P=4,3\text{ Па}$ та відносній концентрації пари прекурсору $g=0,12$ на скляну підкладку, покриту струмознімальним підшаром TCO . В свою чергу, шар поглинача SnS був осаджений при $T_s=200^\circ\text{C}$, $W_p=250\text{ мВт/см}^2$, $P=4,3\text{ Па}$ та $g=0,4$. Товщина тонких шарів SnS_2 і SnS складала 0,15 та 0,35 мкм. Верхні металеві контакти (Al), були осаджені на SnS шляхом вакуумного випаровування. Діаметр та товщина отриманих контактів складала 0,2 см та 0,8 мкм, відповідно. Знімання темної вольт-амперної характеристики (ВАХ) досліджуваної структури $\text{TCO}/\text{SnS}_2/\text{SnS}/\text{Al}$ показало, що вона має діодний характер. Також при освітленні автори роботи спостерігали невеликий фотоелектричний ефект із напругою холостого ходу близько $U_{oc}=0,35\text{ В}$ та густиною струму короткого замикання $j_{sc}=1,5\text{ мА/см}^2$.
- Робота [M. Gunasekaran, M. Ichimura, Photovoltaic cells based on pulsed electrochemically deposited SnS and photochemically deposited CdS and $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 91 (2007) 774-778. doi:10.1016/j.solmat.2006.10.026.] присвячена отриманню та дослідженню багатшарових ГП структур $\text{ITO}/\text{CdZnS}/\text{SnS}/\text{In}$ для їх використання в якості СЕ. Плівки $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ з різною концентрацією Zn були отримані фотохімічним методом на скляні підкладки покриті підшаром ITO . Товщина шарів та час осадження складала 0,1-0,2 мкм та 30 хв, відповідно. Отримання плівок проводили з водного розчину який містив 2 ммоль/л CdSO_4 та 100 ммоль/л $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$. Значення рН розчину доводили до 3 за допомогою H_2SO_4 . Шар поглинача SnS товщиною 2 мкм була отримана методом пульсуючого електрохімічного осадження на попередньо нанесений шар CdS . Водний розчин містив 30 ммоль/л SnSO_4 та 100 ммоль/л $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ який використовувався для одержання шарів з концентрацією рН 2,7. Плівки SnS наносилися протягом 30 хв при кімнатній температурі. Було встановлено, що СЕ зі структурою $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}/\text{SnS}$ де $x=0,13$ мав найкращу ефективність, яка становила 0,7 %.
- Також відома робота [D. Avellaneda, B. Krishnan, T.K. Das Roy, G. a. Castillo, S. Shaji, Modification of structure, morphology and physical properties of tin sulfide thin films by pulsed laser irradiation, *Appl. Phys. A*. (2012) 667-672. doi:10.1007/s00339-012-7148-3.] в якій було досліджено вплив лазерного опромінення на структурно-фазові особливості та оптичні властивості шарів SnS отриманих хімічним осадженням. Водний розчин містив ацетон, хлорид олова ($\text{SnCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), триетаноламін ($(\text{HO}-\text{CH}_2\text{CH}_2)_3\text{N}$), гідроксид амонію ($\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$) та дистильовану воду. Підкладки були занурені в цей розчин, який підігрівали до 60°C протягом 6 годин. Отримані шари мали товщину 1 мкм. Опромінення отриманих шарів було проведено за допомогою $\text{Nd}:\text{YAG}$ лазера з довжиною хвилі 532 нм, енергією імпульсу 300 мДж та довжиною імпульсу 10 нс. Було встановлено, що опромінення шарів SnS приводить до формування вторинної фази SnO_2 . При цьому, оптична ширина забороненої зони матеріалу збільшилась з 1 еВ до 1.9 еВ для неопроміненого та опроміненого зразків, відповідно. Однак формування ГП структур $n\text{-SnS}_2/p\text{-SnS}$ шляхом лазерної обробки шарів SnS_2 в роботі не здійснювалося.
- Відомий також патент (US 4681777 A, Int. CL. B05D 5/12, публ. 21.07.1987) в якому автори описують спосіб отримання як окремих шарів сполуки Sn_xS_y так і ГП структур $n\text{-SnS}_2/p\text{-SnS}$. Відповідні тонкі шари були вирощені хімічним методом, який дозволяє отримувати як аморфний так і полікристалічний матеріал з товщиною шарів більше 1 мкм. Також даний метод дозволяє отримувати достатньо однорідні шари на відносно великій площі. Незважаючи на дешевизну даного методу, отримані шари містили вторинні фази у сполуці Sn_xS_y .
- Всі вищеописані методи отримання ГП структур на основі сполук Sn_xS_y є технологічно складними до того ж самі шари містять вторинні фази, які негативно впливають на ефективність СЕ на їх основі.
- За прототип вибрано роботу [C. Shi, P. Yang, M. Yao, X. Dai, Z. Chen, Preparation of SnS_2 thin films by close-spaced sublimation at different source temperatures, *Thin Solid Films*. 534 (2013) 28-31. doi: 10.1016/j.tsf.2013.01.072.] в якій методом термічного випаровування в квазізамкненому об'ємі (КЗО) авторами були отримані шари SnS_2 при різних температурах випарника. В якості вихідного матеріалу, для отримання шарів дисульфиду олова, була використана шихта SnS_2 , випаровування якої здійснювалось при температурах випарника $T_e = 580$ та 650°C . Шари були отримані на скляні підкладки. Відстань між випарником та підкладкою становила 0,5 см. Час осадження шарів складав 1 год. Температура підкладки змінювалась в діапазоні $T_s=360\text{-}490^\circ\text{C}$. Отримання шарів відбувалось в інертному газі N_2 для того щоб уникнути їх окислення. Було встановлено, що хімічний склад шару отриманого при $T_e=580^\circ\text{C}$ був близький до

стехіометричного та його ширина забороненої зони складала 2.08 eV, що типовою для сполуки SnS₂. До того ж отриманий шар був полікристалічним.

Основними недоліками даного рішення є тривалий час отримання шарів (1 год.), до того ж формування ГП структури n-SnS₂/p-SnS методом лазерного опромінення матеріалу SnS₂ в даній роботі не проводилось.

В основу даної корисної моделі поставлено задачу створення способу отримання тонкоплівкових ГП структур n-SnS₂/p-SnS, в якому за рахунок лазерного опромінення матеріалу SnS₂ з n-типом провідності та технологічних особливостей, відбувається індукований фазовий перехід SnS₂-SnS, збільшується розмір зерен, зменшується кількість структурних дефектів та шорсткість рельєфу поверхні, що дає можливість виготовляти високоякісні ГП структури з контрольованим складом та морфологією поверхні, що містять мінімальну кількість вторинних фаз.

Поставлена задача вирішується тим, що в способі отримання тонкоплівкових ГП структур n-SnS₂/p-SnS, що включає виращення шару дисульфиду олова (SnS₂) з n-типом провідності шляхом термічного випаровування на підкладку вихідного матеріалу SnS₂ у K₂O, згідно корисної моделі, на поверхні одержаного шару SnS₂ з n-типом провідності додатково формують однорідний за площею шар сульфиду олова SnS з р-типом провідності шляхом лазерного опромінення шару SnS₂ з n-типом провідності інтенсивністю $I=8,5-11,5$ МВт/см², крім того лазерне опромінення шару SnS₂ з n-типом провідності проводять на повітрі при атмосферному тиску, з використанням другої гармоніки Nd:YAG лазера ($\lambda=532$ нм), при цьому опромінення поверхні шару проводять при постійній швидкості $1,6 \cdot 10^{-4}$ м/с сфокусованим лазерним пучком з діаметром плями $1,5 \cdot 10^{-3}-1,3 \cdot 10^{-3}$ м та тривалістю імпульсу 4 нс.

Використання способу отримання тонкоплівкових ГП структур n-SnS₂/p-SnS з усіма суттєвими ознаками включаючи відмінні дозволяє збільшити розмір зерен, зменшити кількість структурних дефектів та шорсткість рельєфу поверхні за рахунок теплового впливу лазерного випромінювання на матеріал, що забезпечує можливість виготовлення високоякісних ГП структур з контрольованим складом та морфологією поверхні, що містять мінімальну кількість вторинних фаз. Якщо інтенсивність лазерного випромінювання менше 8,5 МВт/см² і більше 11,5 МВт/см² то не можливо отримати вищезгаданий технологічний результат, тому що при інтенсивності менше 8,5 МВт/см² не відбувається взаємодія лазерного випромінювання з матеріалом, а при інтенсивності більше 11,5 МВт/см² відбувається повне випаровування матеріалу з підкладки.

Спосіб пояснюється фігурами, де:

- на фіг. 1 показано електронно-мікроскопічні знімки поверхні і поперечного перерізу шарів: не опромінений шар (а) - поверхня, (б) - фрактограма; шар опромінений лазером з інтенсивністю $I_1=8,5$ МВт/см² (в) - поверхня, (г) - фрактограма; шар опромінений лазером з інтенсивністю $I_2=11,5$ МВт/см². Результати дослідження хімічного складу ($\delta=Sn/S$) шарів представлені на вставках та для фрактограм у прямокутниках (позиції значень δ , зображених на поперечному перерізі шару, відповідають точці в якій проводилось вимірювання хімічного складу шарів)

- на фіг. 2 представлено дифрактограми від шарів: скло покрите струмопровідним шаром ІТО (а); не опромінений шар (б), шар (в) опромінений лазером з інтенсивністю $I_1=8,5$ МВт/см², шар (г) опромінений лазером з інтенсивністю $I_2=11,5$ МВт/см²;

- на фіг. 3 показано Раманівські спектри від шарів отриманих при збудженні інфрачервоним лазерним випромінюванням ($\lambda=768$ нм) та різним часом взаємодії 10 або 30 сек: не опромінений шар (а), шар (б) опромінений лазером з інтенсивністю $I_1=8,5$ МВт/см², шар (в) опромінений лазером з інтенсивністю $I_2=11,5$ МВт/см²;

- на фіг. 4 подано спектри оптичного пропускання (а) та відбивання (б): не опромінений шар (1), шар (2) опромінений лазером з інтенсивністю $I_1=8,5$ МВт/см², шар (3) опромінений лазером з інтенсивністю $I_2=11,5$ МВт/см²;

- на фіг. 5 представлено темнові ВАХ: не опромінений шар (1), шар (2) опромінений лазером з інтенсивністю $I_1=8,5$ МВт/см², шар (3) опромінений лазером з інтенсивністю $I_2=11,5$ МВт/см².

Спосіб здійснюється таким чином.

Приклад. Шари SnS₂ з n-типом провідності отримують методом випаровування вихідного матеріалу у вигляді стехіометричної шихти SnS₂ у K₂O на скляні підкладки покриті струмопровідним шаром ІТО (SnO₂+In₂O₃), які попередньо очищають в ультразвуковій ванні у розчині етилового, ізопропілового спиртів, ацетону та деіонізованої води протягом 10 хв в кожному. Осадження шарів проводиться у вакуумній установці ВУП-5М при тиску залишкових газів у камері не більше ніж $5 \cdot 10^{-4}$ Па. Температура підкладки та випарника складає $T_s=250$ °С та $T_e=675$ °С, відповідно. Час осадження шарів становить $t=4$ хв. Лазерне опромінення

одержаних шарів SnS₂ з n-типом провідності проводиться на повітрі, при атмосферному тиску, з використанням другої гармоніки Nd:YAG лазера ($\lambda=532$ нм). Лазерне опромінення шарів здійснюється наприклад з інтенсивністю $I_1=8,5$ МВт/см² та $I_2=11,5$ МВт/см². Опромінення поверхні шарів проводиться при постійній швидкості $1,6 \cdot 10^{-4}$ м/с сфокусованим лазерним пучком з діаметром плями $1,5 \cdot 10^{-3}$ та $1,3 \cdot 10^{-3}$ м для інтенсивностей $I_1=8,5$ МВт/см² та $I_2=11,5$ МВт/см² та тривалістю імпульсу 4 нс.

Дослідження складу, структурно-фазових, оптичних та електрофізичних властивостей опромінених та не опромінених лазером шарів свідчить що:

- опромінення шарів лазерним випромінюванням приводить до збільшення розмірів зерен в плівках, зменшення кількості структурних дефектів та шорсткості рельєфу поверхні (фіг. 1);

- не опромінений шар є однофазним та має гексагональну структуру, його склад відповідає фазі SnS₂ (фіг. 2, б);

- фаза SnS з р-типом провідності починає формуватися після опромінення шару SnS₂ з n-типом провідності з інтенсивністю $I_1=8,5$ МВт/см² (фіг. 2, в), при підвищенні інтенсивності опромінення до $I_2=11,5$ МВт/см² відбувається перехід фази SnS₂ у фазу SnS (фіг. 2), сторонні фази з точністю метода не виявляються;

- дані структурного аналізу підтверджуються результатами Раманівської спектроскопії (фіг.3), яка теж не виявляє в шарах сторонніх фаз (включаючи оксидні) і свідчить про перехід фази SnS₂ з n-типом провідності (фіг. 3, а) у фазу SnS р-типом провідності при їх опроміненні лазерним випромінюванням з інтенсивністю $I_2=11,5$ МВт/см² (фіг. 3, в);

- сканування поверхні не опроміненого та опромінених шарів методом Раманівської спектроскопії показало, що розподіл фаз по площі однорідний;

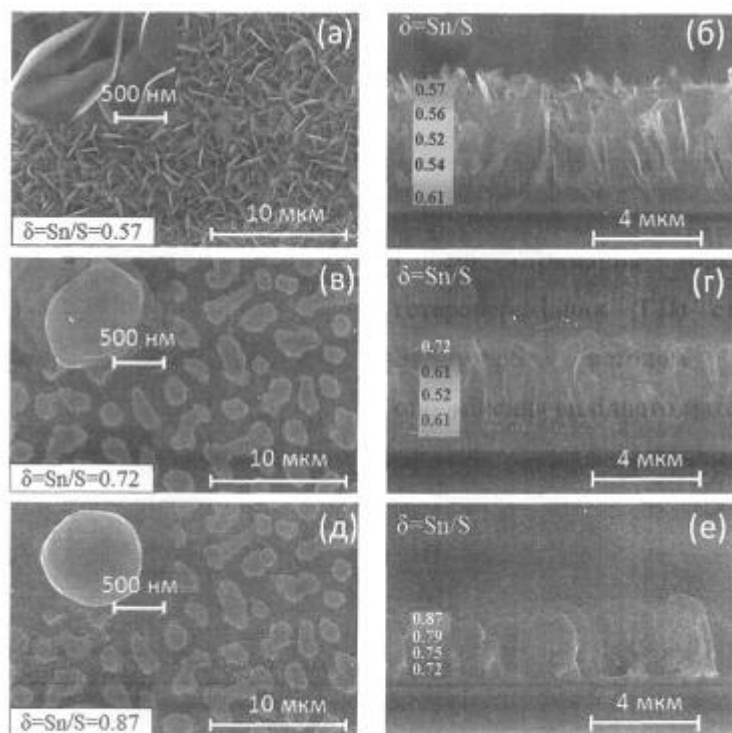
- оптична ширина забороненої зони матеріалу $E_g=2,48$ еВ є характерною для фази SnS₂; збільшення інтенсивності лазерного випромінювання приводить до зменшення значення ширини забороненої зони матеріалу до $E_g=1,59$ еВ, що є типовим для фази SnS (фіг. 4);

- знімання вольт-амперної характеристики (ВАХ) багат шарової структури ITO/SnS₂/Al, показало (фіг. 5), що вона є лінійною (омічною), ВАХ шару опроміненого лазерним випромінюванням з інтенсивністю I_1 мала типовий діодний вигляд, що є додатковим доказом формування ГП структури n-SnS₂/p-SnS.

Таким чином, розроблений спосіб формування ГП структур n-SnS₂/p-SnS, з контрольованим складом та морфологією поверхні, високою структурною якістю, що містять мінімальну кількість вторинних фаз.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Спосіб отримання тонкоплівкових гетероперехідних структур n-SnS₂/p-SnS, що включає вирощування шару дисульфиду олова (SnS₂) з n-типом провідності шляхом термічного випаровування на підкладку вихідного матеріалу SnS₂ у квазізамкненому об'ємі (КЗО), який **відрізняється** тим, що на поверхні одержаного шару SnS₂ з n-типом провідності додатково формують однорідний за площею шар сульфиду олова (SnS) з р-типом провідності шляхом лазерного опромінення шару SnS₂ з n-типом провідності з інтенсивністю $I=8,5-11,5$ МВт/см², крім того лазерне опромінення шару SnS₂ з n-типом провідності проводять на повітрі при атмосферному тиску, з використанням другої гармоніки Nd:YAG лазера ($\lambda=532$ нм), при цьому опромінення поверхні шару проводять при постійній швидкості $1,6 \cdot 10^{-4}$ м/с сфокусованим лазерним пучком з діаметром плями $1,5 \cdot 10^{-3}-1,3 \cdot 10^{-3}$ м та тривалістю імпульсу 4 нс.



Фиг. 1

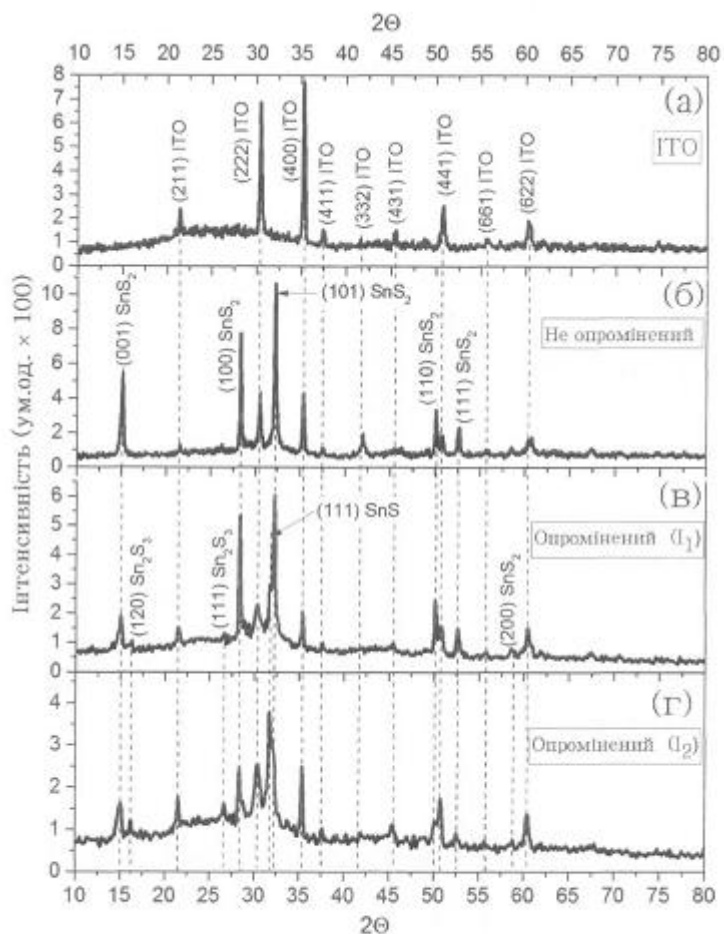


Fig. 2

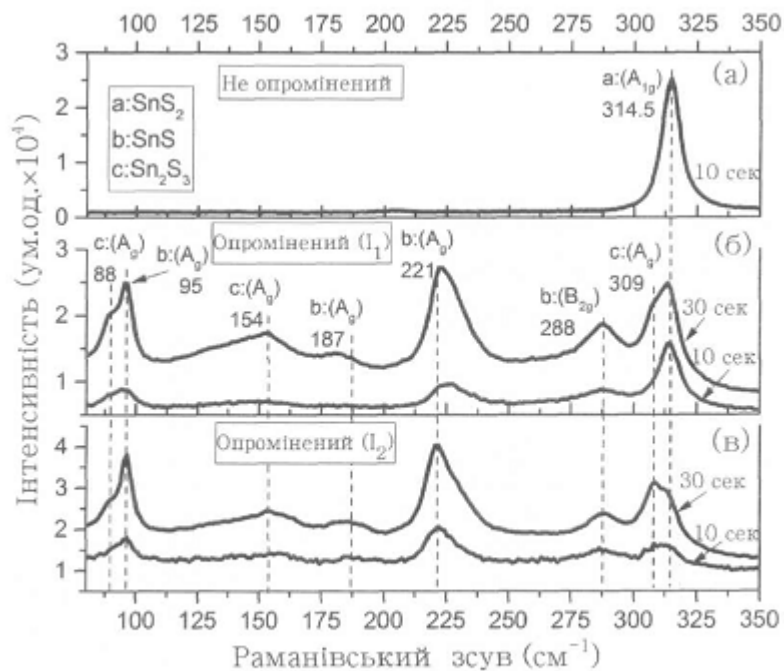
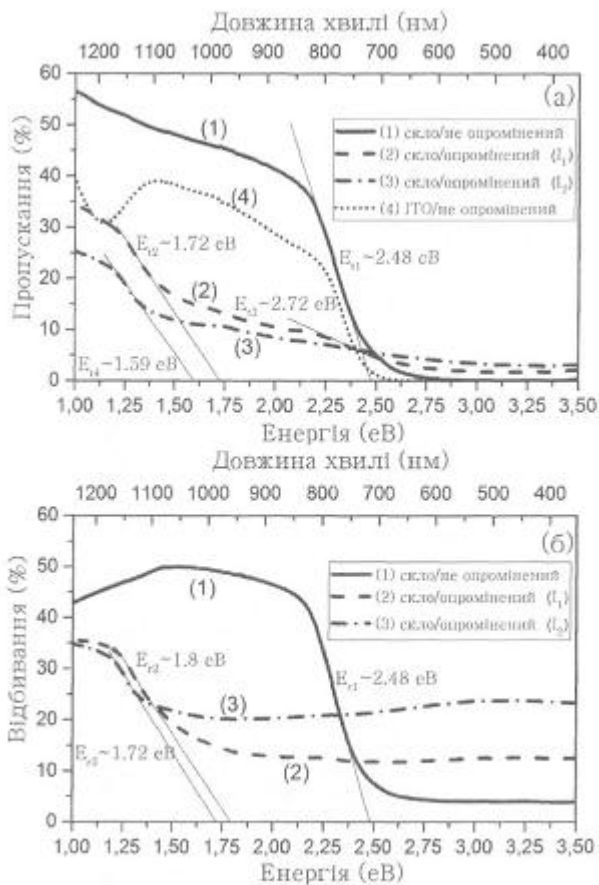
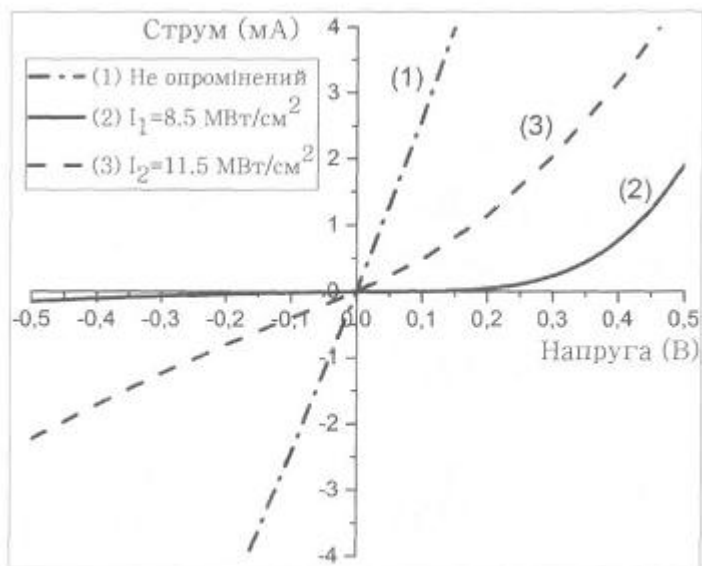


Fig. 3



Фиг. 4



Фиг. 5

Комп'ютерна верстка О. Рябко

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601