

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ**

Бабиченко Оксана Юріївна

УДК 621.383.51

**ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СТРУКТУР КРИСТАЛІЧНОГО
КРЕМНІЮ З ГІДРОГЕНІЗОВАНИМИ НАНОРОЗМІРНИМИ
ВКРАПЛЕННЯМИ**

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук, доцент
Пашенко Олексій Георгійович
Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
Костильов Віталій Петрович,
Інститут фізики напівпровідників
ім. В.Є. Лашкарьова
Національної академії наук України
завідувач лабораторії фізико-технічних основ
напівпровідникової фотоенергетики,
старший науковий співробітник;

доктор фізико-математичних наук, професор
Аркуша Юрій Васильович
Харківський національний університет
ім. В.Н. Каразіна МОН України, професор кафедри
фізичної і біомедичної електроніки та комплексних
інформаційних технологій.

Захист відбудеться «29» жовтня 2019р. о 13.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.04 при Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Науки,14.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Науки,14.

Автореферат розісланий « 27 » вересня 2019р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Є.А. Разумов-Фризюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним з найбільш привабливих і перспективних поновлюваних джерел енергії вважається фотовольтаїка, тобто пряме перетворення сонячної енергії в електричну. Загальна кількість сонячної енергії, що надходить на Землю протягом години, перевищує кількість споживаної в наш час людством енергії протягом року.

За останні 20-30 років спостерігаються значні темпи щорічного зростання потужностей сонячної енергетики. Згідно з прогнозами, в ХХІ столітті розвиток сонячної енергетики буде домінуючим серед усіх альтернативних джерел. За оцінками, до 2050 р. сонячна енергія може становити 20-25 % світового виробництва енергії, а до кінця ХХІ століття сонячна енергетика повинна стати головним джерелом енергії з часткою, що досягає 60 % [1-4].

Фотоелектричні перетворювачі на основі Si-пластин склали майже 95 % від загального об'єму виробництва в 2017 році. Частка мультикристалічних перетворювачів на даний час складає близько 62 % від загального об'єму виробництва. На сьогоднішній день максимальний ККД лабораторного монокристалічного сонячного елемент (Сe) становить 26,7 %, полікристалічного – 22,3 %, тонкоплівкового на основі селеніду міді та індія-галія (CIGS) – 22,9 %, багатоперехідні – 46 %. Рекордна ефективність СЕ демонструє потенціал для подальшого покращення ККД на рівні виробництва. За останні 10 років ефективність комерційних кристалічних кремнієвих сонячних елементів зросла приблизно з 12 % до 21 %, а на основі CdTe – з 9 % до 16 %.¹

Можливість широкого впровадження сонячних елементів на сьогоднішній день є все більш реальною та перспективною. Актуальним завданням є зменшення вартості та збільшення ККД у порівнянні з викопними джерелами енергії. Вирішити це завдання можна шляхом розробки ефективних, дешевих технологій та конструкцій фотоелектричних перетворювачів (ФЕП). В цьому плані перспективною є розробка сонячних елементів на основі аморфного гідрогенізованого та мікрокристалічного кремнію з поєднанням корисних властивостей обох матеріалів в одній структурі [5].

Основні недоліки СЕ на основі кристалічного кремнію: висока вартість та довготривала окупність, а також чутливість до забруднень. У зв'язку з тим, що монокристалічний і полікристалічний кремній не є прямозонними напівпровідниками і їх коефіцієнт поглинання невисокий, для ефективного перетворення сонячного світла товщина ФЕП, що виготовляються з них, повинна становити сотні мікрон.

Виходячи з вищевказаного, перспективним є створення тонкоплівкових

¹ www.ise.fraunhofer.de

SE на основі аморфного гідрогенізованого і мікрокристалічного кремнію замість дорогого кристалічного кремнію. Тонкоплівкова технологія має великі можливості для здешевлення сонячних модулів. Темпи зниження вартості виробництва тонкоплівкових модулів значно вищі, ніж модулів на основі кристалічного кремнію.

Крім того, тонкоплівкова технологія має ряд специфічних можливостей, відсутніх або ускладнених для кристалічних напівпровідників, наприклад, виготовлення гнучких або напівпрозорих модулів. Однією з особливостей цієї технології є можливість отримання шарів аморфного гідрогенізованого і мікрокристалічного кремнію на гнучких підкладках. SE на гнучкій основі мають малу вагу, монтуються на будь-які поверхні, і можуть використовуватися для виготовлення сумок, чохла, вбудовуватися в одяг і т.д. Загалом, невпорядковані напівпровідники, зокрема, аморфний гідрогенізований кремній ($a:Si:H$) і сплави на його основі, знаходять все більш широке застосування в технології твердотільної електроніки. Оскільки технологія формування $a:Si:H$ сумісна зі звичайною технологією виробництва кремнієвих інтегральних схем, з'являються передумови для створення приладів і пристроїв, які поєднують в собі аморфну і кристалічну форми кремнію.

Застосування гетероморфних структур типу аморфний/кристалічний кремній ($a:Si:H/c-Si$) відкриває можливість для використання фізичних ефектів, обумовлених поєднанням монокристалічного та аморфного гідрогенізованого кремнію в одній структурі. Однак, практичну реалізацію приладів на їх основі утруднено через те, що є багато фізико-хімічних параметрів чутливих до технології отримання плівок $a:Si:H$ (ширина щілини рухливості, щільність станів дефектів, зміна концентрації водню і т.д.), а також відсутні чіткі уявлення про закономірності формування гетероструктур аморфний/кристалічний напівпровідник. Таким чином, аналіз властивостей гетероморфних напівпровідникових матеріалів на основі кристалічного та аморфного кремнію є актуальним завданням для зменшення вартості фотовольтаїки та збільшення ККД сонячних елементів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась в рамках держбюджетних науково-технічних, науково-дослідних робіт, що проводилися в Харківському національному університеті радіоелектроніки на кафедрі мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв: «Розробка автоматизованого програмно-апаратного вимірювального комплексу для діагностики і дослідження параметрів багатоперехідних тандемних гетероструктурних фотоперетворювачів з квантово-розмірними середовищами» (№ державної реєстрації 0113U002890), «Розробка методів і засобів мікрохвильової діагностики вмісту і розподілу вільної і зв'язаної води в біологічних тканинах та інших середовищах» (№ державної реєстрації 0116U002540).

Мета і завдання роботи. Метою дисертаційної роботи є отримання властивостей гетероморфних напівпровідникових матеріалів на основі кристалічного та аморфного кремнію різного виду та ступеня аморфізації, сутте-

вих з точки зору застосування їх у фотоелектричних перетворювачах для сонячної енергетики.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

- аналіз конструктивно-технологічних особливостей фотоелектричних перетворювачів та технологій отримання неупорядкованих напівпровідників і мікрокристалічного кремнію, що впливають на ефективність перетворення енергії Сонця в електричну;
- розробка моделей енергетичного розподілу щільності електронних станів та спектру оптичного поглинання аморфного кремнію;
- розрахунок впливу ступеня розупорядкованості аморфного кремнію на розподіл щільності електронних станів та спектр оптичного поглинання;
- виявлення залежності фотопровідності від вкраплень аморфного кремнію різної геометричної форми в монокристалічній кремнієвій структурі та порівняння отриманих результатів з експериментальними;
- вироблення рекомендацій щодо методів поліпшення фотоелектричних і електрофізичних характеристик напівпровідникових матеріалів на основі аморфного та монокристалічного кремнію.

Об'єктом дослідження є явища генерації рухливих носіїв заряду квантами світла в монокристалічному кремнії з аморфними нановкрапленнями.

Предметом дослідження є параметри та характеристики напівпровідникових фотоперетворюючих гетероструктур, утворених шляхом поєднання монокристалічного та аморфного кремнію.

Методи досліджень. При виконанні дисертаційної роботи використовувалися такі методи:

- класичний термодинамічний метод – метод кінетичного рівняння з модифікацією функції розподілу щільності електронних станів та спектру оптичного поглинання з урахуванням ступеня розупорядкованості аморфного кремнію;
- метод схем заміщення для визначення фотопровідності монокристалічного кремнію при різних ступенях розупорядкованості аморфних включень різної геометричної форми.

Дисертаційна робота містить такі нові вперше встановлені наукові результати:

1. Вперше теоретичним шляхом отримано розподіл щільності електронних станів та спектр нормованої узагальненої функції розподілу щільності станів в гетероморфному кремнії з урахуванням ступеня розупорядкованості структури, розмірів та морфології включень.

2. Одержані характеристики фотопровідності гетероструктури аморфного гідрогенізованого та монокристалічного кремнію як функції розмірів та морфології аморфних включень в кристалічному субстраті дозволили визначити основні шляхи підвищення ефективності сонячних елементів.

3. Отримали подальший розвиток методи розрахунку впливу аморфних неоднорідностей на фотопровідність кристалічного кремнію в залежності від фізичних властивостей і геометрії цих неоднорідностей, що дозволило пог-

либити уявлення про фізичні процеси в гетероструктурах типу аморфний/кристалічний кремній.

Достовірність виконаних в роботі теоретичних досліджень обґрунтовується фізичною коректністю застосованих підходів до моделювання та узгодженням їх результатів з відомими результатами окремих експериментальних досліджень.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Виявлено вплив ступеня розупорядкованості аморфної напівпровідникової структури на функцію розподілу щільності станів та взаємозв'язків структурно-залежних властивостей напівпровідників, зокрема оптичних і електронних, що створює основу технологій виробництва нових напівпровідникових матеріалів з наперед заданими властивостями.

2. Розвинута в роботі методика визначення залежності впливу аморфних неоднорідностей на фотопровідність кристалічного кремнію від фізичних властивостей і геометрії цих неоднорідностей є теоретичним підґрунтям для конструювання енергоефективних сонячних батарей наступної генерації.

3. Результати роботи використовуються в навчальному процесі закладів вищої освіти при вивченні принципів роботи нового перспективного класу фотоелектричних перетворювачів на основі модифікованих напівпровідникових матеріалів.

Особистий внесок здобувача. Публікації, які складають основу дисертаційної роботи, виконано у співавторстві. Автор дисертації створила моделі для чисельного розрахунку функції розподілу щільності станів в аморфному кремнії залежно від ступеня розупорядкованості структури [1, 2, 6,14], провела дослідження спектру оптичного поглинання *a-Si: H* [11, 12, 15, 16, 17], впливу фізичних властивостей та геометричних характеристик аморфних неоднорідностей в кристалічній структурі кремнію на кінетику фотопровідності [3, 4, 5, 6, 7, 8, 13, 18, 19], порівняла теоретично розраховану фотопровідність аморфно-кристалічної кремнієвої структури з експериментальними результатами отриманими при дослідженні процесів накопичення радіаційних дефектів в об'ємі монокристалічного кремнію при його опроміненні γ -квантами гальмівного випромінювання [21].

Апробація результатів дисертації. Наукові результати та основні положення дисертаційної роботи були представлені та опубліковані в матеріалах таких конференцій:

-MicrowaveandTelecommunicationTechnologyCriMiCo – 2010: conferenceproceedings 20thInternationalCrimeanConference, 2010;

-Функциональная база нанoeлектроники: сб. науч. тр. IIIМеждунар. науч.конф., 2011 г.;

-Функциональная база нанoeлектроники : сб. науч. тр. IVМеждунар. науч.конф., 30 сент. – 3 окт. 2011 г.;

-Microwave and Telecommunication Technology CriMiCo 2011: conference proceedings 21stInternationalCrimeanConference, 2011;

-MicrowaveandTelecommunication Technology CriMiCo-2012: conference proceedings 22ndInternationalCrimeanConference, 2012;

-Microwave and Telecommunication Technology CriMiCo-2013: conference proceedings 23rd International Crimean Conference, 2013;

-Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2018: proceedings 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, 2018;

-Сучасні інформаційні та електронні технології: 20-та міжнародна науково-практична конференція, 2019 р.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 8 статей у спеціалізованих фахових наукових виданнях України [1-8], що задовольняють вимогам ДАК МОН України до публікацій, на яких ґрунтується дисертація, 13 доповідей та тез на міжнародних конференціях та семінарах [9-21]. 9 робіт опубліковані в спеціалізованих наукових виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та WebofScience.

Обсяг і структура дисертації. Дисертація складається з переліку умовних позначень і скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, двох додатків. Загальний обсяг дисертації становить 139 сторінок, з них 106 сторінок основного тексту. Список використаних джерел на 9 сторінках включає 96 найменувань. Всього в дисертації 47 рисунків та 4 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, показано зв'язок даної роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету та задачі роботи. Наведені основні наукові результати, показано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Відображено особистий внесок здобувача в опублікованих, разом зі співавторами, наукових працях, та апробацію результатів, описано структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У **першому розділі** на основі аналізу конструктивно-технологічних особливостей фотоелектричних перетворювачів та технологій отримання неупорядкованих напівпровідників і мікрокристалічного кремнію, що впливають на ефективність перетворення енергії Сонця в електричну зроблено висновок, що застосування перетворювачів сонячної енергії в важко доступних малонаселених регіонах земної кулі, а також в пристроях гнучкої електроніки є економічно виправданим. Основним недоліком таких перетворювачів є недостатня ефективність в порівнянні з традиційними джерелами електроенергії. Для підвищення ефективності фотоперетворення необхідно вирішити фундаментальні питання пошуку нових матеріалів і структур.

Аморфний гідрогенізований кремній і сплави на його основі є перспективним матеріалом для використання в сонячних перетворювачах. Розглянуто різні варіанти його приладового застосування. Робота пристроїв на основі аморфних напівпровідників базується на властивостях гетероструктур аморфний / кристалічний напівпровідник. Розглянуто еквівалентну електричну схему, яка описує ВАХ гетероструктури $a:Si: H$ (n -тип) / $c-Si$, показано, що властивості аморфних напівпровідників недостатньо

вивчені, що ускладнює цілеспрямоване вдосконалення технології отримання аморфного гідрогенізованого кремнію і обмежує оптимізацію властивостей приладів і пристроїв на основі $a:Si:H$ і його сплавів.

У другому розділі розглянуто моделі енергетичного розподілу щільності станів і механізми перенесення носіїв заряду в гетероструктурах на основі кристалічних та аморфних напівпровідників. Через наявність локалізованих станів в щілині по рухливості $a:Si:H$, найбільш імовірним механізмом перенесення є механізм, пов'язаний з тунелюванням.

Запропоновано аналітичну модель розподілу електронних станів енергетичної діаграми гетероструктури аморфний / кристалічний напівпровідник, яка враховує основні особливості матеріалу.

Зокрема, модель передбачає, що перехід функції щільності станів між зоною і областю «хвоста» (тобто, поступовим спадом цієї функції на межі зони) гладкий. Зони утворення «хвостів» характеризуються шириною «хвостів» зони провідності γ_c і шириною «хвостів» валентної зони γ_v . Ці параметри ширини «хвостів» є мірою розупорядкованості аморфного кремнію. За умови виділення окремих ділянок розподілу електронних станів «хвостів» і розтягнутості всіх зонних станів можна припустити, що рівні з енергіями $E_c + \frac{\gamma_c}{2}$ і $E_v - \frac{\gamma_v}{2}$ являють собою поріг рухливості зони провідності і валентної зони відповідно. Таким чином, функція щільності станів для зони провідності має вигляд:

$$N_c(E) = \frac{\sqrt{2} \cdot m_c^{*3/2}}{\pi^2 \cdot \hbar^3} \begin{cases} \sqrt{E - E_c}, & E \geq E_c + \frac{\gamma_c}{2} \\ \sqrt{\frac{\gamma_c}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}\right) \cdot \exp\left(\frac{E - E_c}{\gamma_c}\right), & E < E_c + \frac{\gamma_c}{2}, \end{cases} \quad (1)$$

де m_c^* - ефективна маса електрона в зоні провідності; E_c - енергія дна неупорядкованої зони провідності; $E_c + \frac{\gamma_c}{2}$ - точка переходу між квадратичним і експоненціальним розподілом щільності станів зони провідності.

Функція щільності станів для валентної зони має схожий вигляд:

$$N_v(E) = \frac{\sqrt{2} \cdot m_v^{*3/2}}{\pi^2 \cdot \hbar^3} \begin{cases} \sqrt{\frac{\gamma_v}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}\right) \cdot \exp\left(\frac{E_v - E}{\gamma_v}\right), & E \geq E_v - \frac{\gamma_v}{2} \\ \sqrt{E_v - E}, & E < E_v - \frac{\gamma_v}{2}, \end{cases} \quad (2)$$

де m_v^* - ефективна маса дірки у валентній зоні; E_v - стеія неупорядкованої валентної зони; γ_v - ширина «хвоста» валентної зони; $E_v - \frac{\gamma_v}{2}$ - точка переходу між квадратичним і експоненціальним розподілом щільності станів валентної зони.

Для вивчення впливу розупорядкованості досліджується чутливість функцій щільності станів зони провідності і валентної зони до змін в γ_c і γ_v . Результати розрахунків наведені на рис.1. Для заданих значень γ_c , розподіл електронних станів «хвостів» проявляється нижче порога рухливості. Зі збільшенням γ_v загальне число обраних електронних станів «хвостів» збільшується, а розподіл «хвостів» поширюється на значну відстань в заборонену зону. Аналогічні результати спостерігаються і для функції щільності станів валентної зони. При розрахунках значення E_c і E_v приймалися рівними нулю. Ефективні маси електрона в зоні провідності і ефективна маса дірки у валентній зоні визначаються виразами:

$$m_c^* \approx \frac{E_L}{2 \cdot (E_2 - E_C) \cdot \lambda^{1/3}} \cdot m_e, \quad (3)$$

$$m_v^* \approx \frac{E_L}{2 \cdot (E_v - E_{v2}) \cdot a^{1/3}} \cdot m_e, \quad (4)$$

де $E_L = \hbar^2 / m_e L^2$; m_e - маса вільного електрона; L - середня довжина зв'язку в зразку; E_2 - енергія, при якій уявна частина діелектричної проникності стає максимальною; N_1 - кількість атомів, що відповідають розширеним станам; N - число атомів, що відповідають «хвостовим» станам; $\lambda = N_1 / N < 1$; E_{v2} - енергія, що відповідає половині ширини валентних розширених станів.

Згідно (3), (4), ефективна маса електрона в зоні провідності дорівнює 1,08 від маси електрона і ефективна маса дірки у валентній зоні – 0,56 від маси електрона.

Узагальнена функція розподілу щільності станів в нелегованих або слабо легованих аморфних напівпровідниках може бути записана як:

$$J(\hbar \cdot \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} N_c(E) \cdot N_v(E - \hbar \cdot \omega) dE. \quad (5)$$

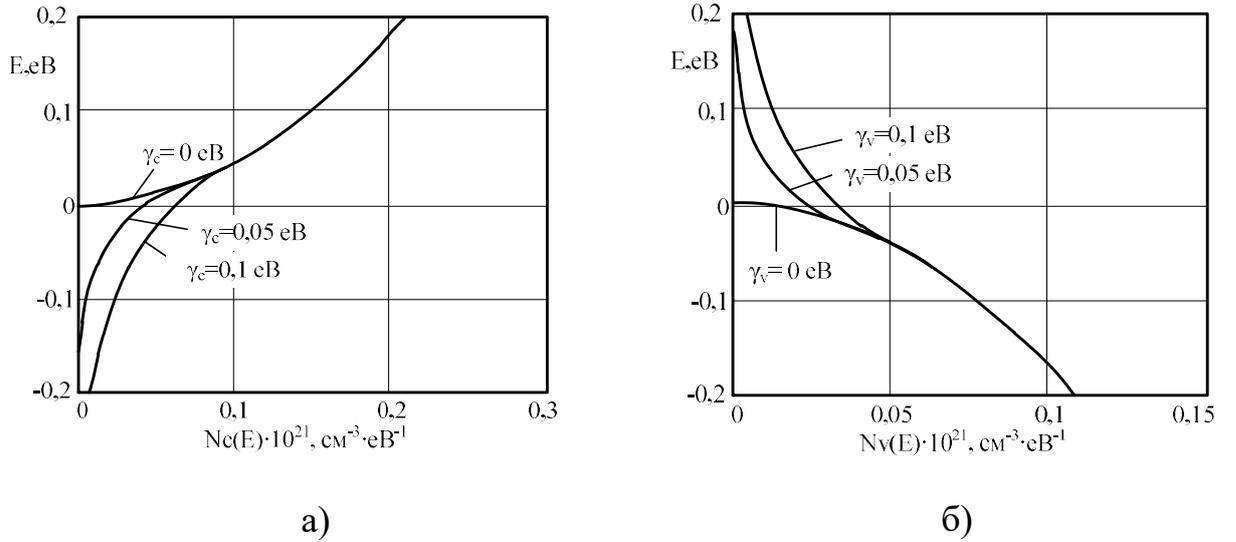


Рис. 1. Залежності щільності станів для: а) зони провідності; б) валентної зони.

Нормована узагальнена функція розподілу щільності станів визначається як:

$$\xi(\hbar \cdot \omega) = \frac{\pi^2 \cdot \hbar^3}{\sqrt{2} \cdot (m_c^*)^2} \times \frac{\pi^2 \cdot \hbar^3}{\sqrt{2} \cdot (m_v^*)^2} \times J(\hbar \cdot \omega). \quad (6)$$

Функції щільності станів у разі, коли $\gamma_c \rightarrow 0$ і $\gamma_v \rightarrow 0$, мають вигляд:

$$N_c(E) \rightarrow \frac{\sqrt{2} \cdot m_c^{*3/2}}{\pi^2 \hbar^3} \begin{cases} \sqrt{E - E_c}, & E \geq E_c \\ 0, & E < E_c \end{cases}, \quad (7)$$

$$N_v(E) \rightarrow \frac{\sqrt{2} \cdot m_v^{*3/2}}{\pi^2 \hbar^3} \begin{cases} 0, & E > E_v \\ \sqrt{E_v - E}, & E \leq E_v. \end{cases} \quad (8)$$

Тоді функціональна залежність для нормованої узагальненої функції розподілу щільності станів набуває вигляду:

$$\xi(\hbar \cdot \omega) \rightarrow \begin{cases} \frac{\pi}{8} \cdot (\hbar \cdot \omega - E_c + E_v)^2, & \hbar \cdot \omega \geq E_c - E_v \\ 0, & \hbar \cdot \omega < E_c - E_v, \end{cases} \quad (9)$$

де $E_c - E_v = E_{g0}$ - ширина забороненої зони, яка визначається для аморфних напівпровідників із закону Тауса.

Аналіз спектральних залежностей нормованої узагальненої функції розподілу щільності станів, проводиться в двох діапазонах енергій $\hbar \cdot \omega \leq E_{g0} + \frac{\gamma_c}{2} + \frac{\gamma_v}{2}$ і $\hbar \cdot \omega \geq E_{g0} + \frac{\gamma_c}{2} + \frac{\gamma_v}{2}$. З рівнянь (1), (2), (5) і (7) знаходяться функціональні залежності $\xi(\hbar \cdot \omega)$ для довільних значень ступенів розупорядкованості. На рис.2 наведені результати розрахунку залежності $\xi(\hbar \cdot \omega)$ для випадку $\gamma_c = \gamma_v$ і значення таусовської ширини забороненої зони 1,85 еВ. На рис.3 наведені результати розрахунку спектральної залежності $\xi(\hbar \cdot \omega)$ для різних значень γ_c і γ_v . З аналізу цих функцій, можна зробити висновки, що «хвіст» поглинання спектральної залежності нормованої узагальненої функції розподілу щільності станів простягається в область забороненої зони і ширина його зростає зі збільшенням ступеня розупорядкованості.

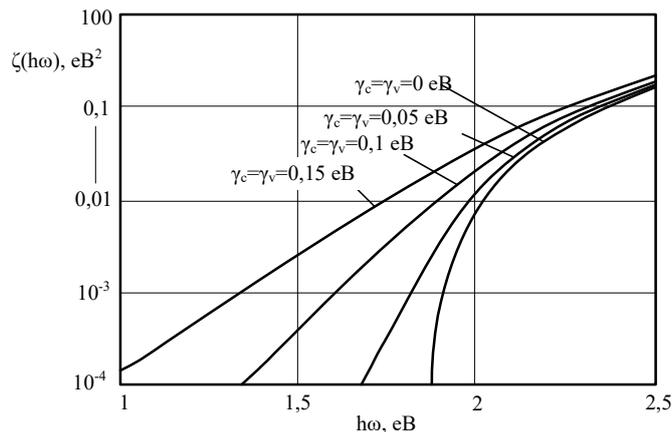


Рис. 2. Спектральні залежності нормованої узагальненої функції розподілу щільності станів для $\gamma_c = \gamma_v$ і $E_{g0} = 1,85$ еВ від частоти фотонів.

Запропонована модель може бути використана для визначення розподілу густини електронних станів при розрахунках спектру оптичного поглинання $a:Si: H$. Отримані за допомогою неї результати добре узгоджуються з даними, наведеними у роботах [7,8].

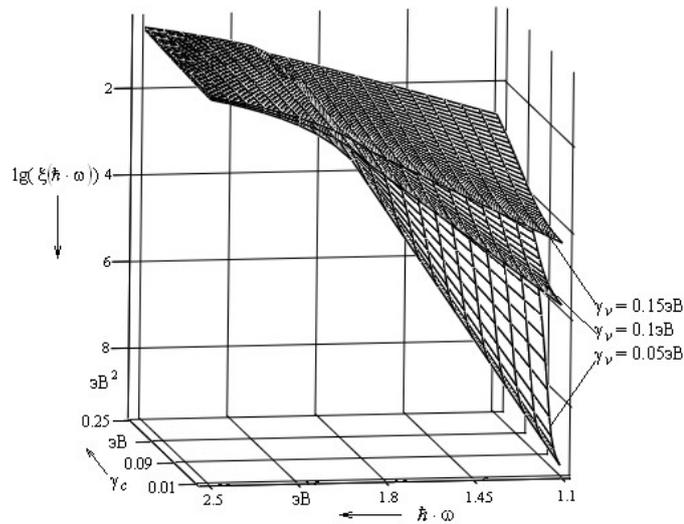


Рис. 3. Спектральні залежності нормованої узагальненої функції розподілу щільності станів від частоти фотонів та ступеня розупорядкованості структури.

У **третьому розділі** наведені результати розрахунку спектральної залежності коефіцієнта поглинання для різних ступенів розупорядкованості структури $a:Si: H$ і значення таусовської ширини забороненої зони 1,85 eV. Результати розрахунку наведено на рис.4. Як показує аналіз цих залежностей, ступінь розупорядкованості суттєво впливає на коефіцієнт поглинання $a:Si - H$.

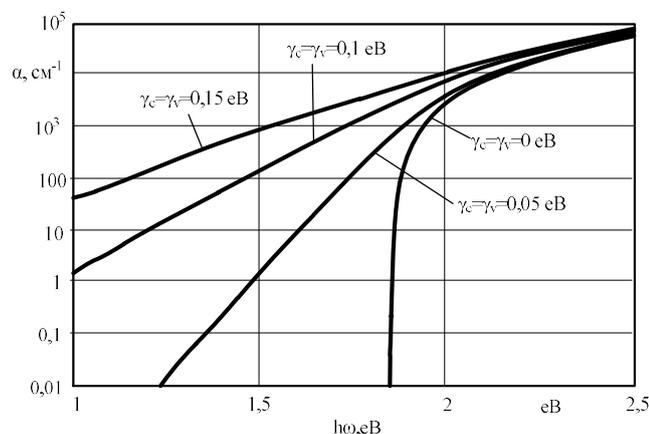
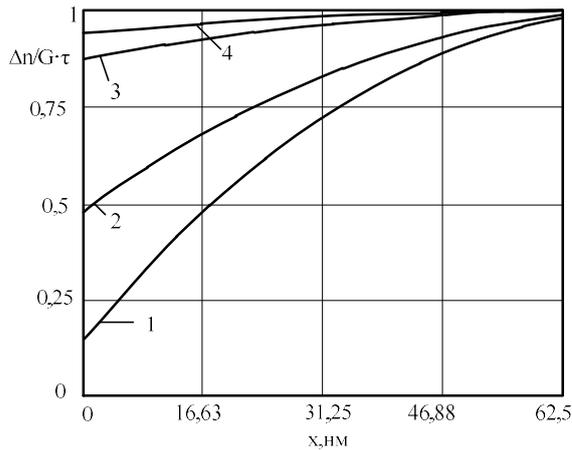


Рис. 4. Спектральні залежності коефіцієнта поглинання для випадку рівності ступенів розупорядкованості та ширини забороненої зони 1,85 eV.

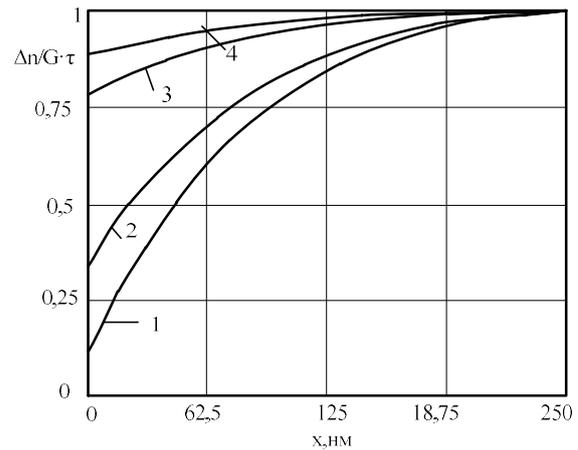
Проведено дослідження фотопровідності напівпровідникової структури у вигляді шару кристалічного кремнію з рівномірно розташованими вкрапленнями аморфного кремнію циліндричної (рис.5,6) та сферичної форми (рис.7,8) у припущенні однорідної генерації фотонів.

На підставі отриманих результатів можна стверджувати, що фотопровідність кристалічного кремнію з включеннями аморфного кремнію цилінд-

ричної форми збільшується зі зменшенням відстаней між включеннями при незмінному радіусі включення та зменшується в разі збільшення радіусу включень при незмінній відстані між ними. Також фотопровідність визначається швидкістю поверхневої рекомбінації фотоносіїв і може значно зменшуватися при її збільшенні. Останнє має місце в матеріалах з високою концентрацією аморфних включень, коли площа поверхні включень, яка припадає на одиницю об'єму, значна, тобто коли відношення відстані між включеннями до їх радіусу досягає мінімальної величини.

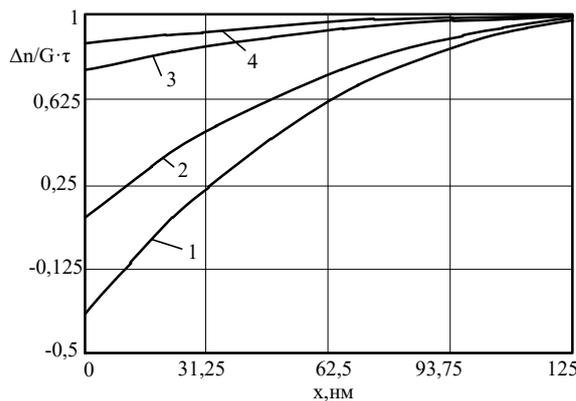


а) відстань між вкрапленнями 125 нм

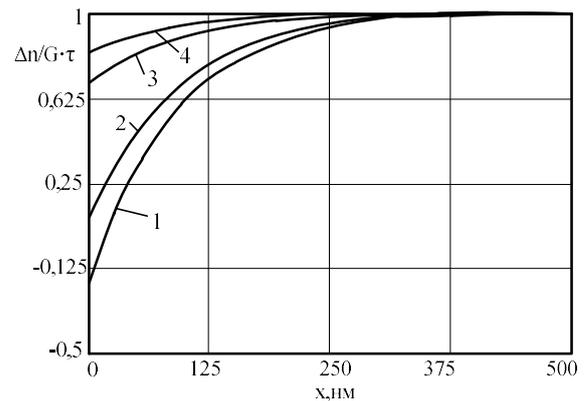


б) відстань між вкрапленнями 500 нм

Рис. 5. Залежності розподілу фотоносіїв в зразку з радіусом вкраплень 25 нм і різних значень швидкості поверхневої рекомбінації та відстаней між включеннями.



а) відстань між вкрапленнями 250 нм



б) відстань між вкрапленнями 1000 нм

Рис. 6. Залежності розподілу фотоносіїв в зразку з радіусом вкраплень 50 нм і різних значень швидкості поверхневої рекомбінації та відстанями між вкрапленнями.

Виявлено також наявність, так званої, негативної фотопровідності [9.10]. Негативна фотопровідність проявляється в тому, що при освітленні

зразка його провідність не збільшується, а зменшується до значення меншого, ніж темнове. Наявність такого ефекту можна пояснити утворенням на поверхні досліджуваної напівпровідникової структури інверсного вигину зон через «прилипання» основних носіїв заряду на так званих «повільних» поверхневих рівнях.

У випадку дослідження фотопровідності кристалічного кремнію зі сферичними вкрапленнями аморфного кремнію в залежності від радіуса вкраплень і відстані між ними для різних значень швидкості поверхневої рекомбінації і різних довжин хвиль визначено, що фотопровідність такої структури збільшується зі зростанням відстані між вкрапленнями та їх радіусу та зменшується зі збільшенням швидкості поверхневої рекомбінації.

На рис. 7, 8 наведено залежності фотопровідності для таких значень відстаней між вкрапленнями: 1 - $l=7 \cdot 10^{-8}$ м; 2 - $l=5 \cdot 10^{-8}$ м; 3 - $l=3 \cdot 10^{-8}$ м; 4 - $l=1 \cdot 10^{-8}$ м.

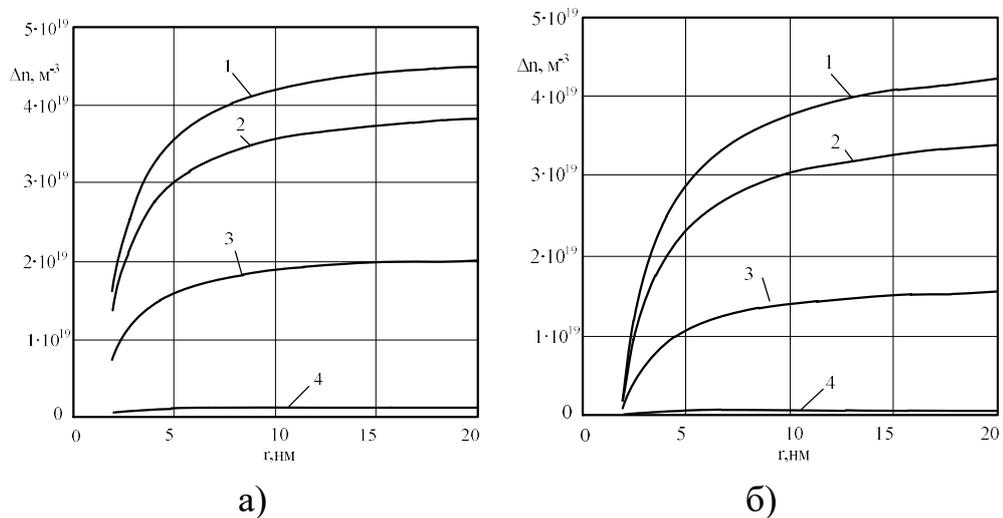


Рис. 7. Залежності фотопровідності від радіуса сферичних аморфних вкраплень для різних значень швидкості поверхневої рекомбінації $G = 10$ м/с (а) і $G = 100$ м/с (б) при довжині хвилі випромінювання 1 мкм.

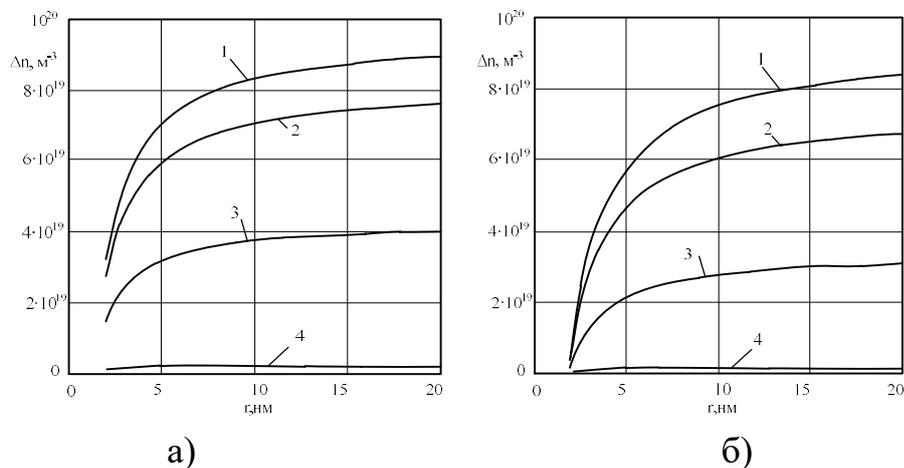


Рис. 8. Залежності фотопровідності від радіуса сферичних аморфних вкраплень для різних значень швидкості поверхневої рекомбінації $G = 10$ м/с

(а) і $G = 100$ м/с (б) при довжині хвилі випромінювання 0,7 мкм.

У четвертому розділі розглянуті результати порівняння теоретично розрахованої фотопровідності аморфно-кристалічної кремнієвої структури згідно попередніх результатів з експериментальними даними, отриманими при дослідженні процесів накопичення радіаційних дефектів в об'ємі монокристалічного кремнію при його опроміненні γ -квантами гальмівного випромінювання за результатами спільних робіт ННЦ ХФТІ та ХНУРЭ [11, 12]. Зазвичай, у таких випадках на поверхні пластини кремнію утворюється невелика кількість пор, що йдуть вглиб.

Вочевидь, утворені структури є перспективними з точки зору технології отримання аморфно-кристалічних напівпровідникових структур для СЕ.

На рис. 9 а показано структуру шліфа поперечного перерізу фрагмента кремнієвої пластини після механічної поліровки, опромінювання було проведено з верхньої поверхні зразка. Зображення, одержане за допомогою металографічного мікроскопа, показує, що мікроструктура монокристалічного кремнію не виявляється. На рис. 9 а, б, с представлена мікроструктура кремнію, підданого хімічному травленню в розчині азотної і плавикової кислоти в об'ємних співвідношеннях $HNO_3 : HF = 2 : 1$. Видно, що на поперечному перерізі зразків кремнію утворилися так звані ямки травлення, пов'язані з розтравленням порушень кристалічної структури, що є на поверхні монокристалічного кремнію (виходів дислокацій, включень домішок і т.п.).

Після електрохімічного травлення того ж зразка в електроліті, що містить $HF:H_2O:C_2H_5OH = 1 : 1 : 2$ при щільності струму травлення $20 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ (рис. 9 с) спостерігається збільшення щільності ямок травлення поблизу поверхні зразка (верхня частина фотографії). У обох випадках ямки травлення розташовані нерівномірно по поперечному перетину зразка. Ділянка, прилегла до поверхні, що була опромінена уламками урану, має істотно більшу густину і розмір ямок травлення. Товщина цього шару складає від 5 до 30 мкм.

За результатами рентгенофазового аналізу, в складі зразків монокристалічного кремнію встановлена наявність деякої кількості аморфної фази, що утворилася в результаті їх опромінювання уламками розподілу ядер ^{238}U .

Фотопровідність і час життя носіїв заряду в зразках після впливу на них уламків поділу ядер урану досліджувалися НВЧ фотомодуляційними методами за допомогою резонаторного вимірювального перетворювача [12].

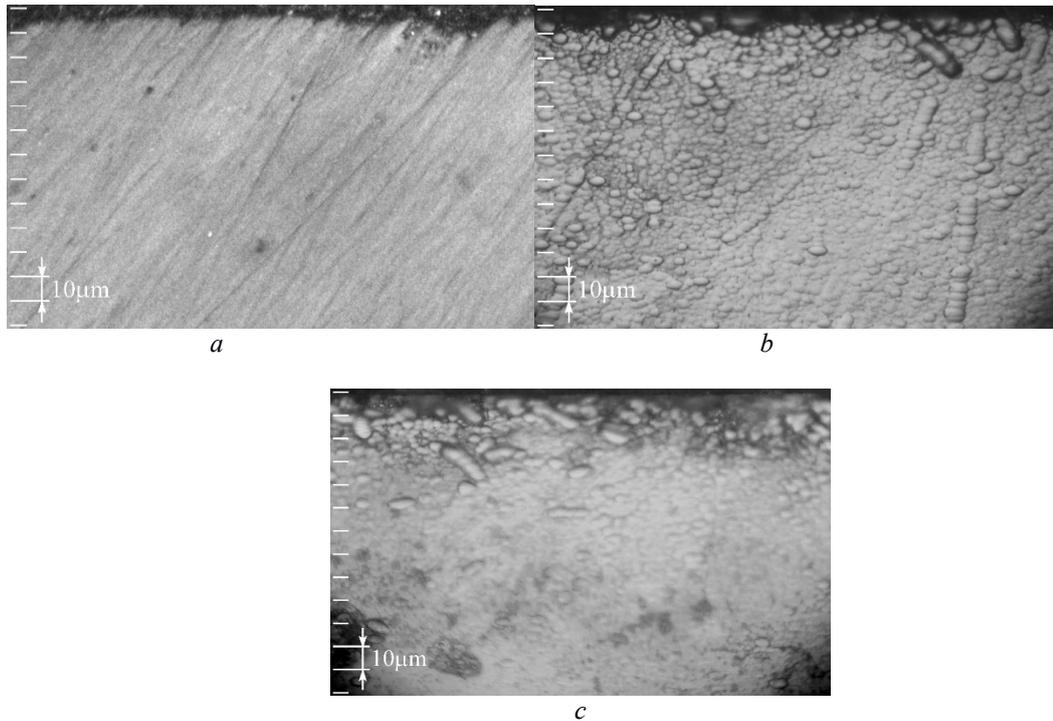


Рис. 9. Мікрофотографії поперечного перерізу зразка після опромінення уламками ділення ядер урану.

На рис. 10 наведені результати вимірювання фотопровідності на різних сторонах зразка *Si* (1 та 2 на рисунку) після радіаційної обробки та відпалу для різних довжин хвиль опромінення (а – 1 мкм, б – 0,57 мкм). Зміна фотопровідності в результаті відпалу зразка на рис.10 обумовлена зміною структури дефектів, утворених в результаті радіаційної обробки зразка та відновлення зруйнованих зв'язків в структурі аморфних вкраплень. Для визначення вкладу в фотопровідність структури аморфних включень, виконано нормування кожної функціональної залежності на величину фотопровідності *c-Si* зразка до його радіаційної обробки.

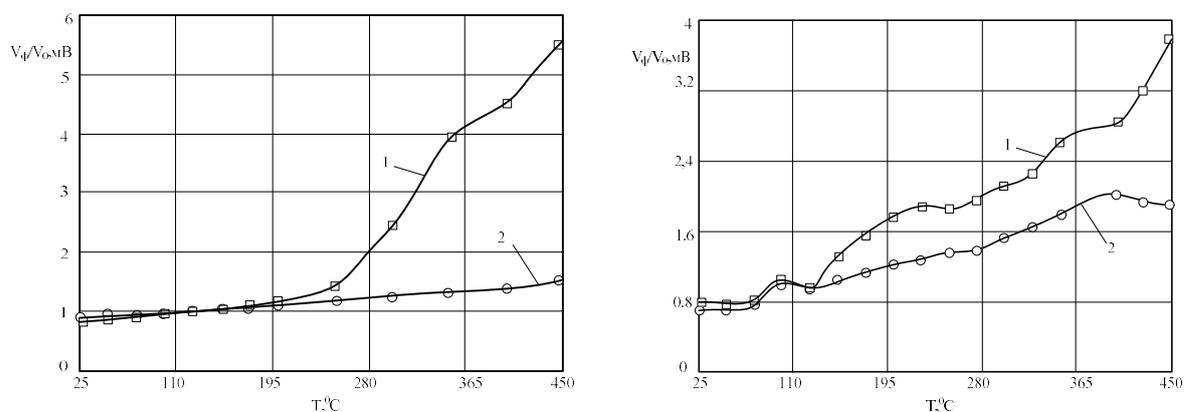


Рис. 10. Залежності нормованої фотопровідності *c-Si* зразка після радіаційної обробки від температури відпалу.

Було визначено, що на 10 мкм^2 зразка кристалічного кремнію припадає від кількох одиниць до кількох десятків аморфних включень різного розміру та форми. Це можуть бути включення як сферичної, так і циліндричної форми. Якщо припустити, що в структурі домінують циліндричні включення і вирішуючи зворотну задачу було визначено, що ступінь розупорядкованості зразка γ змінюється в діапазоні від 0,04 до 0,065. Тобто, згідно з розрахунками, в об'ємі кристалічної структури є приблизно 5 % аморфних включень.

Результати обчислень залежності фотопровідності опроміненого зразка від температури відпалу наведено на рис. 12 (крива 1 – $\lambda = 0,57 \text{ мкм}$, крива 2 – $\lambda = 1 \text{ мкм}$). При розрахунках припускалося, що зміна фотопровідності обумовлена лише зміною ступеня розупорядкованості аморфних включень.

Отримані чисельно-аналітичні результати за характером зміни кривих співпадають з експериментальними даними. Це свідчить про можливість застосування для удосконалення структур та моделей фотоперетворювачів на основі неупорядкованого і кристалічного кремнію.

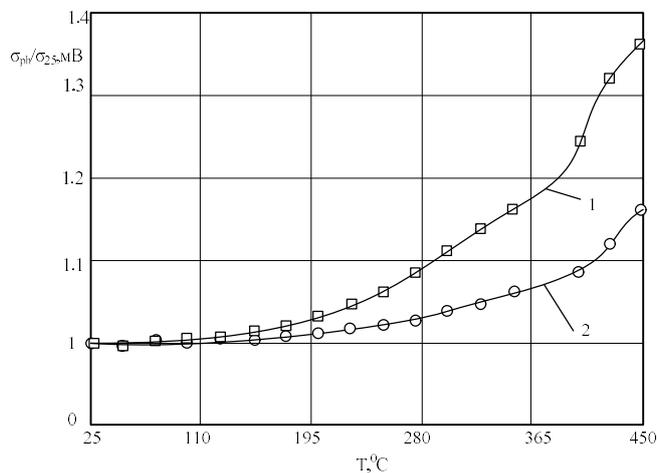


Рис. 12. Результати розрахунку відносної зміни фотопровідності.

ВИСНОВКИ

Дисертаційну роботу присвячено отриманню властивостей гетероморфних напівпровідникових матеріалів на основі кристалічного та аморфного кремнію різного виду та ступеня аморфізації, суттєвих з точки зору застосування їх у фотоелектричних перетворювачах для сонячної енергетики.

Основні наукові результати роботи полягають у наступному:

1. Створено модель енергетичного розподілу щільності електронних станів енергетичної діаграми гетероструктури аморфний/кристалічний напівпровідник, яка враховує конструктивно-технологічні особливості фотоелектричних перетворювачів та технології отримання неупорядкованих напівпровідників і мікрокристалічного кремнію. Дана модель припускає, що перехід функції щільності станів між зоною та областю «хвоста» безперервний.

Області утворення «хвостів» характеризуються шириною їх як у зоні провідності, так і у валентній зоні. При вивченні впливу розупорядкованості враховано чутливість функції щільності станів зони провідності та валентної зони до змін ширини вказаних «хвостів». Встановлено, що «хвіст» спектральної залежності нормованої узагальненої функції розподілу щільності станів потрапляє в область забороненої зони і ширина його росте з ростом ступеня розупорядкованості. Таку модель може бути використано для визначення розподілу щільності електронних станів при аналізі спектра оптичного поглинання $a:Si:H$.

2. Отримано спектральні залежності коефіцієнта поглинання для різних ступенів розупорядкованості структури $a:Si:H$ і значення таусовської ширини забороненої зони 1,85 еВ. Як впливає з аналізу залежностей, ступінь розупорядкованості суттєво впливає на коефіцієнт поглинання $a:Si:H$.

3. Виявлено за допомогою моделювання, що фотопровідність кристалічного кремнію з рівномірно розташованими включеннями аморфного кремнію циліндричної форми збільшується зі зменшенням відстаней між включеннями при незмінному радіусі включень та зменшується в разі збільшення радіусу включень при незмінній відстані між ними. Встановлено, що фотопровідність такої структури визначається швидкістю поверхневої рекомбінації фотоносіїв і може значно знижуватися при її збільшенні. Це явище має місце в матеріалах з високою концентрацією аморфних включень, коли площа поверхні включень, яка припадає на одиницю об'єму зразка, відносно велика. При певних геометричних розмірах спостерігався прояв так званої негативної фотопровідності.

4. Визначено залежності фотопровідності кристалічного кремнію зі сферичними вкрапленнями аморфного кремнію від радіуса вкраплень і відстані між ними для різних значень швидкості поверхневої рекомбінації і різних довжин хвиль. Встановлено, що фотопровідність кристалічного кремнію зі сферичними вкрапленнями аморфного кремнію збільшується зі зростанням відстані між вкрапленнями при фіксованому радіусі. Збільшення радіусу вкраплення призводить до збільшення фотопровідності при фіксованій відстані між ними. Зі збільшенням швидкості поверхневої рекомбінації фотопровідність структури зменшується.

5. Встановлено вплив вкраплень аморфного кремнію різної геометричної форми на фотопровідність монокристалічної кремнієвої структури та зроблено порівняння отриманих результатів з експериментальними. З'ясовано, що варіації фотопровідності в результаті відпалу зразка обумовлені зміною структури дефектів, утворених в результаті радіаційної обробки зразка та відновленням зруйнованих зв'язків в структурі аморфних включень, що можна інтерпретувати як модифікацію ступеня розупорядкованості зразка. Побудовано графіки відносної зміни фотопровідності з урахуванням ступеня розупорядкованості зразка після його термічної обробки.

6. Отримані в дисертації результати якісно та кількісно співпадають з відомими експериментальними даними. Це свідчить про можливість їх застосування для удосконалення структур фотоперетворювачів на основі спла-

вів неупорядкованого і кристалічного кремнію. Вихідними даними для таких моделей є експериментально визначені параметри шарів. Крім того, запропоновані в роботі моделі забезпечують розв'язання зворотних задач з метою екстракції електрофізичних параметрів елементів структури фотоперетворювача з його експериментально отриманих характеристик.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Пащенко А.Г. Определение функций плотностей электронных состояний в аморфном кремнии / А.Г. Пащенко, О.Ю. Сологуб¹ // Радиотехника. - 2012. - В. 169. - С. 337-342.
2. Pashchenko A.G. Definition of electronic states densities functions in amorphous silicon / A.G. Pashchenko, O.Yu. Sologub // Telecommunications and Radio Engineering (English translation of *Elektrosvyaz and Radiotekhnika*). - 2014. - Т. 73(5). - Р. 447-455.
3. Бабыченко О.Ю. Фотопроводимость кристаллического кремния с аморфными вкраплениями сферической формы // Радиотехника. - 2015. - В. 182. - С. 157-160.
4. Бабыченко О.Ю. Многокомпонентные полупроводниковые структуры в конструкциях солнечных элементов // Радиотехника. – 2017. - В. 189. – С. 172 – 178.
5. Бабыченко О.Ю. Кинетика фотопроводимости c-Si с аморфными неоднородностями / О.Ю. Бабыченко, А.Г. Пащенко // Радиотехника. - 2017. – В. 190. – С. 36 – 43.
6. Babychenko O.Y. States density distribution for determination of a-Si:H photoconductivity / O.Y. Babychenko, A.G. Pashchenko // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. – 2017. - V. 9, No 5. – 05044 (4 pp).
7. Babychenko O.Y. Kinetics of photoconductivity of c-Si with amorphous inhomogeneities / O.Y. Babychenko, A.G. Pashchenko // *Telecommunications and Radio Engineering (English translation of *Elektrosvyaz and Radiotekhnika*)*. - 2018. - Т. 77(2). - Р. 161-171.
8. Babychenko O.Yu. Multicomponent semiconductor structures in the design of solar cells // *Telecommunications and Radio Engineering (English translation of *Elektrosvyaz and Radiotekhnika*)*. - 2018. - V. 77(5). - Р. 425-433.
9. Сологуб О.Ю. Исследование численной полуклассической модели одноэлектронного транзистора // *Радиоелектроніка і молодь в ХХІ ст.: матеріали 13-го Міжнародного молодіжного форуму, 2009 р., Харків: ХНУРЕ, 2009. - Ч. 1. – С. 297.*
10. Сологуб О.Ю. Многокомпонентные полупроводниковые структуры в конструкциях солнечных элементов // *Радиоэлектроника и молодежь в ХХІ веке: материалы 14-го Международного молодежного форума, 2010 г. – Харьков: ХНУРЭ, 2010. - Ч. 1. - С. 431.*

¹ Сологуб - прізвище автора до заміжжя.

11. Sologub O. Yu. Calculation of the spectrum of fundamental optical absorption compounds A_3B_5 // Microwave and Telecommunication Technology CriMiCo – 2010: conference proceedings 20th International Crimean Conference, 2010. - P. 807-808.

12. Сологуб О.Ю. Расчет спектральной зависимости края собственного поглощения полупроводниковых твердых растворов с прямой структурой энергетических зон // Функциональная база наноэлектроники: сб. науч. тр. III Междунар. науч. конф., 2011 г. – Харьков-Кацивели: ХНУРЭ, 2010. – С. 353-354.

13. Сологуб О.Ю. Фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: материалы 15-го Юбилейного Международного молодежного форума, 2011 г. – Харьков: ХНУРЭ, 2011. - Т.1. - С. 71-72.

14. Пащенко А.Г. Модель распределения электронных состояний для определения спектра оптического поглощения аморфного кремния / А.Г. Пащенко, О.Ю. Сологуб, В.Г. Вербицкий // Функциональная база наноэлектроники : сб. науч. тр. IV Междунар. науч. конф., 30 сент. – 3 окт. 2011 г. – Харьков-Кацивели: ХНУРЭ, 2011. – С. 82–85.

15. Sologub O.Yu. Optical properties of amorphous hydrogenated Si // Microwave and Telecommunication Technology CriMiCo 2011: conference proceedings 21st International Crimean Conference, 2011. - P. 769-770.

16. Sologub O.Y. Intraband absorption in quantum dots // Microwave and Telecommunication Technology CriMiCo-2012: conference proceedings 22nd International Crimean Conference, 2012. - P.723-724.

17. Sologub O.Yu. Determination of amorphous silicon absorption spectrum // Microwave and Telecommunication Technology CriMiCo-2013: conference proceedings 23rd International Crimean Conference, 2013. - P. 754-755.

18. Бабыченко О.Ю. Влияние аморфных вкраплений на свойства кристаллического кремния // Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті: матеріали 20-го Ювілейного Міжнародного молодіжного форуму, 2016 р. – Харків: ХНУРЕ, 2016. - Т.1. - С. 9-10.

19. Gritsunov A. Theory of natural oscillatory systems and advance in nanoelectronics / A. Gritsunov, I. Bondarenko, A. Pashchenko, O. Babychenko // Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2018: proceedings 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, 2018. - P.410-415.

20. Бабыченко О.Ю. Влияние геометрии аморфных неоднородностей на фотопроводимость c-Si // Радіоелектроніка і молодь в XXI ст.: матеріали 22-го Міжнародного молодіжного форуму, 2018 р., Харків: ХНУРЕ, 2018. - С. 47-48.

21. Бабыченко О.Ю. Дослідження фотопровідності кристалічного кремнію з аморфними включеннями // Сучасні інформаційні та електронні технології: 20-та міжнародна науково-практична конференція, 2019 р., Одеса, 2019. – С. 118– 119.

СПИСОК РОБІТ, ЦИТОВАНИХ В АВТОРЕФЕРАТІ

1. Да Роза А. Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы: Учебн. пособие / А. да Роза пер. с англ. под ред. С.П. Малышенко, О.С. Попеля. - Долгопрудный: Изд.дом «Интеллект». - Москва: МЭИ, 2010. – С. 704.
2. Перспективы энергетических технологий 2008. Сценарии и стратегии до 2050 г. / Международное энергетическое агентство. ОЕСД/IEA, 2008.
3. Клименко В.В. Мировая энергетика и климат планеты в XXI веке / В.В. Клименко, А.Г. Терешин // История и современность. - 2009. - № 2. - С. 87-94.
4. Клименко В.В. Мировая энергетика и климат планеты в XXI веке в контексте исторических тенденций / В.В. Клименко, А.Г. Терешин, О.В. Микушина // Рос. хим. жур. им. Д.И. Менделеева. - 2008. – Т. LII. - № 6. - С.11-17.
5. Street R. A. Hydrogenated Amorphous Silicon / R. A. Street. - Cambridge University Press. - 2010. – 417 p. – ISBN 9780511525247.
6. Korotcenkov G. Porous silicon: From Formation to Applications: Optoelectronics, Microelectronics, and Energy Technology Applications, Volume Three / G. Korotcenkov. - Taylor and Francis Group. - 2016. – 415 p. – ISBN 9781482264586.
7. Searle T. Properties of Amorphous Silicon and Its Alloys / T. Searle. - Institution of Engineering & Technology. - 2011. – 432 p.- ISBN 978-0863416415.
8. Jha A.R. Solar Cell Technology and Applications / A.R. Jha. - Taylor and Francis Group, LLC. - 2009. – 304 p. – ISBN 9781420081787.
9. Карась Н.И. Позитивна і негативна фотопровідність в макропористому кремнії // Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-6: зб. тез. доп. VI Української наук. конф. з фізики напівпровідників (УНКФН), 30 вересня - 4 жовтня. 2013 р. - Чернівці, 2013. - С. 276-277.
10. Карась Н.И. Отрицательная фотопроводимость в структурах макропористого кремния // Нові технології: наук. вісник ІЕНТ. - 2010. - № 1. - С. 118-123.
11. Гордиенко Ю.Е. Формирование разупорядоченных структур и их преобразование в аморфную фазу в объеме (с-Si)-полупроводника осколками ядер, образующимися при γ -облучении расщепляющихся материалов / Ю. Е. Гордиенко, А. Н. Довбня, В. П. Ефимов и др. // Нові технології: наук. вісник ІЕНТ. – 2005. – № 1-2. – С. 11-16.
12. Dovbnya A.N. An influence of gamma-irradiation and ^{238}U fragments on single-crystal silicon properties / A.N. Dovbnya, V.P. Yefimov, G.D. Pugachev, V.S. Dyomin, N.A. Dovbnya, J.E. Gordienko, B.G. Borodin, S.V. Babychenko, T.A. Semenets // Problems of atomic science and technology. - 2006. - № 3. Series: Nuclear Physics Investigations (47). - P.179-181.

АНОТАЦІЯ

Бабиченко О.Ю. Фотоелектричні властивості структур кристалічного кремнію з гідрогенізованими нанорозмірними вкрапленнями. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 «Фізика приладів, елементів та систем». Харківський національний університет радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України, Харків, 2019.

Дисертаційну роботу присвячено отриманню властивостей гетероморфних напівпровідникових матеріалів на основі кристалічного та аморфного кремнію різного виду та ступеня аморфізації, суттєвих з точки зору застосування їх у фотоелектричних перетворювачах для сонячної енергетики.

Отримано розподіл щільності електронних станів та спектр нормованої узагальненої функції розподілу щільності станів в гетероморфному кремнії з урахуванням ступеня розупорядкованості структури, розмірів та морфології включень.

Одержані характеристики фотопровідності гетероструктури аморфного гідрогенізованого та монокристалічного кремнію як функції розмірів та морфології аморфних включень в кристалічному субстраті дозволили визначити основні шляхи підвищення ефективності сонячних елементів.

Отримали подальший розвиток методи розрахунку впливу аморфних неоднорідностей на фотопровідність кристалічного кремнію в залежності від фізичних властивостей і геометрії цих неоднорідностей, що дозволило поглибити уявлення про фізичні процеси в гетероструктурах типу аморфний/кристалічний кремній.

Ключові слова: аморфний гідрогенізований кремній, кристалічний кремній, зони розупорядкованості, аморфні вкраплення, сонячні елементи, фотогенерація, гетероструктура, фотоперетворювач.

АННОТАЦИЯ

Бабыченко О.Ю. Фотоэлектрические свойства структур кристаллического кремния с гидрогенизированными наноразмерными вкраплениями. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук за специальностью 01.04.01. «Физика приборов, элементов и систем» Харьковский национальный университет радиоэлектроники Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2019.

Диссертационная работа посвящена получению свойств гетероморфных полупроводниковых материалов на основе кристаллического и аморфного кремния различного вида и степени аморфизации, существенных с точки зрения применения их в фотоэлектрических преобразователях для солнечной энергетики.

Получено распределение плотности электронных состояний и спектр нормированной обобщенной функции распределения плотности состояний в гетероморфном кремнии с учетом степени розупорядоченности структуры, размеров и морфологии включений.

Полученные характеристики фотопроводимости гетероструктуры аморфного гидрогенизированного и монокристаллического кремния как функции размеров и морфологии аморфных включений в кристаллическом субстрате позволили определить основные пути повышения эффективности солнечных элементов.

Получили дальнейшее развитие методы расчета влияния аморфных неоднородностей на фотопроводимость кремния в зависимости от физических свойств и геометрии этих неоднородностей, что позволило улучшить представление о физических процессах в гетероструктурах типа аморфный/кристаллический кремний.

Ключевые слова: аморфный гидрогенизированный кремний, кристаллический кремний, зоны розупорядоченности, аморфные включения, солнечные элементы, фотогенерация, гетероструктура, фотопреобразователь.

ABSTRACT

Babychenko O.Yu. Photoelectric properties of crystalline silicon structures with hydrogenated nanosized inclusions. – The manuscript.

Thesis for the scientific degree of candidate of Physical and Mathematical Sciences by speciality 01.04.01 - Physics of devices, elements and systems Kharkiv National University of Radio Electronics, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2019.

The dissertation is devoted to obtaining properties of heteromorphic semiconductor materials based on crystalline and amorphous silicon of various kind and degree of amorphization essential from the point of view of their use in photoelectric converters for solar energetics.

The dissertation contains the following new scientific results:

1. For the first time, the electron density states distribution and the spectrum of the normalized generalized function of the density states distribution in the heteromorphic silicon are obtained in a theoretical way, considering the degree of structure disorder, the size and morphology of the inclusions.

2. The obtained photoconductivity characteristics of the heterostructure of amorphous hydrogenated and single-crystalline silicon, as functions of the size and

morphology of amorphous inclusions in the crystalline substrate, make it possible to determine the main ways of increasing the efficiency of solar cells.

3. Methods of calculating the influence of amorphous inhomogeneities on the photoconductivity of crystalline silicon are more developed, depending on the physical properties and geometry of these inhomogeneities; this allows to deepen the understanding of physical processes in amorphous/crystalline silicon heterostructures.

The reliability of the theoretical studies performed in the work is substantiated by the physical correctness of the applied modeling approaches and agreement of their results with known results of experimental researches.

The influence of the degree of disordering of amorphous semiconductor structure on the function of state density distribution and interconnections of structure-dependent properties of semiconductors, specifically, optical and electronic ones, has been revealed; this creates the basis of production technologies for new semiconductor materials with predetermined properties.

The technique developed to determine the dependence of the influence of amorphous inhomogeneities on the photoconductivity of crystalline silicon on the physical properties and geometry of these inhomogeneities is a theoretical basis for the design of energy efficient solar cells of the next generation.

The results of the work are used in the educational process of higher education institutions for studying the principles of a new perspective class of photoelectric converters based on modified semiconductor materials.

Keywords: amorphous hydrogenated silicon, crystalline silicon, disordered zones, amorphous inclusions, solar cells, photogeneration, heterostructure, photoconverter.

Підп. до друку 26.09.2019 Формат 60×84 1/16. Спосіб друку – ризографія.
Умов. друк. арк. 1,3. Облік вид. арк. 1,1. Тираж 100 прим.
Зам. № 00236. Ціна договірна.