

Фотоелектричне перетворення сигналу в глибокому p - n - переході як засіб детектування карбонових нанотрубок з адсорбованим сульфанолам у водному розчині

А.І. Манілов^{1,3,*}, О.В. Козинець¹, І.В. Гаврильченко^{1,3}, Ю.С. Мілованов^{1,3},
Т.М. Мухамеджанов^{1,2}, С.О. Алексєєв^{2,3}, М. Аль Араїмі^{4,5}, С.В. Литвиненко^{1,3},
А. Рожин⁴, В.А. Скришевський^{1,3}

¹ Інститут високих технологій, Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
вул. Володимирська, 64, 01033 Київ, Україна

² Хімічний факультет, Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
вул. Володимирська, 64, 01033 Київ, Україна

³ Корпорація «Науковий парк Київський національний університет імені Тараса Шевченка»,
вул. Володимирська, 60, 01033 Київ, Україна

⁴ Дослідницька група по нанотехнологіям, Астонський інститут фотонних технологій, Школа інженерії і
прикладних наук, Університет Астона, Трикутник Астона, В4 7ЕТ Бірмінгем, Великобританія

⁵ Інженерний департамент, Технологічний коледж Аль Мусанни, Муладда Мусанна, Султанат Оман

(Одержано 13.06.2017, опубліковано online 27.07.2017)

Показана можливість застосування принципу фотоелектричного перетворення в структурах з глибоким p - n переходом для контролю вмісту карбонових нанотрубок з адсорбованою ПАР (сульфанолам) у водному розчині. Проведено експериментальні дослідження впливу аналізу на зміни фотоструму крізь глибокий p - n перехід. Зареєстровано зсув залежності фотоструму від напруги, прикладеної до поверхні сенсорної структури, обумовлений присутністю карбонових нанотрубок у розчині. Зміни ефективної швидкості рекомбінації, що відповідають розподілу фотоструму на поверхні, можуть бути зумовлені зміною приповерхневого вигину зон.

Ключові слова: Сенсор, Карбонові наночастинки, Фотострум, Швидкість поверхневої рекомбінації, Глибокий p - n перехід.

DOI: [10.21272/jnep.9\(4\).04020](https://doi.org/10.21272/jnep.9(4).04020)

PACS numbers: 68.08.p, 82.47.Rs, 81.07.De

1. ВСТУП

На сьогодні відомі напівпровідникові хімічні сенсори з різними трансдьюсерними принципами – електричними, оптичними, люмінесцентними [1, 2].

Одним із підходів створення таких сенсорів може бути принцип фотоелектричного перетворення сигналу [3]. На цьому принципі працюють, наприклад, сенсори LAPS – потенціометричні сенсори із світловою адресацією [3]. При адсорбції аналіту змінюється товщина шару області просторового заряду, і цю зміну можна зареєструвати, вимірюючи фотоіндукований сигнал.

В роботах [4-6] запропоновано дещо інший підхід. Так, при освітленні напівпровідникової пластини світлом з області власного поглинання, приповерхнева концентрація фотогенерованих носіїв сильно залежить від поверхневої рекомбінації. Поверхнева рекомбінація, в свою чергу, визначається станом поверхні та наявністю адсорбційних станів. Тобто, при адсорбції, фотострум через структуру на основі глибокого p - n переходу буде залежати від впливу зовнішнього аналіту на освітлювану поверхню.

В якості аналіту використовувався розчин функціоналізованих карбонових нанотрубок (КНТ) у воді. Взагалі, КНТ вважаються одним з найперспективніших матеріалів в нанотехнології завдяки своїм унікальним хімічним, фізичним та біологічним властивостям [7]. Можливими напрямками їх застосування є наномедицина і нанофармакологія [8]. Так, багато робіт присвячено розробці біосенсорів та іму-

носенсорів на основі КНТ [9]. Вони можуть стати невід'ємною частиною «лабораторії на чипі» (lab-on-a-chip).

КНТ самі по собі не мають засобів розпізнавання біомолекул. Запропоновано багато технологій функціоналізації поверхні, які дають можливість наділити КНТ такою властивістю. Основою технологій є приєднання білків, ферментів, антитіл чи антигенів до внутрішньої, зовнішньої стінок КНТ або до їх кінців [9].

Суттєвою проблемою для інтеграції у біологічні системи є нерозчинність КНТ у фізіологічних розчинах внаслідок їх гідрофобності. Подолати цю проблему можна різними способами: хімічним, електрохімічним, термальним, або за допомогою окислення [7,10]. В нашій роботі для цього застосовували адсорбцію аніонної поверхнево-активної речовини (сульфаноламу) на поверхні КНТ.

В той же час функціоналізовані нанотрубки можуть бути потенційно небезпечними для людського організму за рахунок токсичності та здатності проходити крізь біологічні бар'єри у клітинах, які є непроникними для більших частинок [11, 12]. Тому важливою є розробка методів детектування таких речовин.

В цій роботі показано можливість використання принципу фотоелектричного перетворення в структурах з глибоким p - n переходом для контролю вмісту КНТ, з адсорбованим сульфанолам, у водному розчині. Для з'ясування механізмів чутливості проведено експериментальні дослідження впливу адсорбції аналіту на зміни фотоструму крізь глибокий p - n перехід.

* anmanilov@univ.kiev.ua

2. ЕКСПЕРИМЕНТ

2.1 Виготовлення зразків

Сенсорна структура (рис. 1) була виготовлена на основі фабричного кремнієвого сонячного елемента. Відповідна пластина кристалічного кремнію із глибоким *p-n* переходом мала фронтальний контакт, створений за технологією screen-printing, і тильний контакт у вигляді суцільної металізації алюмінієм. Глибина переходу складала 150 мкм, довжина дифузії неосновних носіїв близько 150 мкм, профіль легування рівномірний. Легування освітлюваної області помірне, що відповідає питомому опору близько 1 Ом см.

У металізації тильного контакту за допомогою HCl було витравлено круглу область діаметром 28 мм. Оскільки, з метою створення омичного контакту при виготовленні сонячного елемента, шар кремнію під металічним шаром насичений алюмінієм, його видаляли шляхом подальшого витравлювання. Для цього проводили електрохімічне травлення (40 мА, 25 В, 40 хв) у HF 45 % : EtOH 96 % (1:1 по об'єму), а утворений шар пористого кремнію розчиняли допомогою КОН. Витравлена область промивалась дистильованою водою та етиловим спиртом, після чого висушувалась сухим гарячим повітрям.

Для створення на поверхні витравленої області ділянок з різним відгуком, проводили додаткову функціоналізацію таких ділянок (рис. 1а-б). Для цього круглі ділянки діаметром 1 см промивали HF 45 % : EtOH 96 % (1 : 9 по об'єму) для видалення силанольних та формування силанових поверхневих груп [13]. Далі на ці ділянки наносили речовини-модифікатори, 1-деценон ($C_{10}H_{12}$) та гідроксиетилметакрилат (HEMA) та відсвічували УФ-світлом (кварцева лампа) протягом 2 годин. Така обробка призводить до модифікування поверхні кремнію органічними групами внаслідок проходження фотоініційованої реакції гідросилілювання (рис. 1в).

Карбонові нанотрубки (SWNT), виготовлені за каталітичною технологією CoMoCAT [14], було придбано у SWeNT Inc. Порошок SWNT (1.2 мг) додавався у 20 мл деіонізованої води у присутності 6.5 мг поверхнево-активної речовини сульфанолю (SDBS). Суміш перемішувалась за допомогою ультразвукової системи NanoRuptor (Diagenode) протягом 1 години із частотою 21 кГц та потужністю 250 Вт. Утворена суспензія додатково центрифугувалась на ультрацентрифузі Beckman Coulter Optima Max-XP (MLS 50) протягом 3 годин при 45000 об/хв. Така обробка нанотрубок забезпечувала адсорбцію сульфанолю на них та утворення стійких у часі прозорих колоїдних розчинів.

Для аналізу було підготовано 3 розчини:

- Карбонові нанотрубки, вкриті сульфанолюм, у деіонізованій воді (технологія описана вище).

- Чиста деіонізована вода.
- Деіонізована вода з сульфанолюм (концентрація 0.33 мг/мл, що відповідає вмісту SDBS у суспензії нанотрубок).

2.2 Схема експерименту

Вимірювальна схема базується на реєстрації фотоструму, наведеного лазерним променем (LBIC) [4, 5].

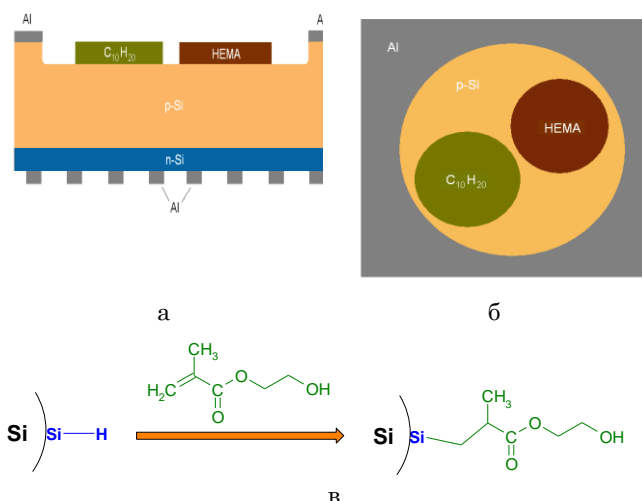


Рис. 1 – Сенсорна структура: бічний зріз (а) та вид зверху (б); (в) - іммобілізація алкенів на поверхні кремнію за реакцією гідросилілювання (на прикладі HEMA)

Для цього верхня частина сенсорної структури (із нанесеним органічним покриттям) сканується модульованим променем зеленого лазера (довжина хвилі 532 нм). Фотострум на глибокому *p-n* переході вимірюється за допомогою селективного нановольтметра. Операції синхронізуються блоком керування, спряженого з персональним комп'ютером, за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення.

Для дослідження відгуку структури на аналіт, на ділянках з органічним покриттям розміщувалась герметична циліндрична кювета із електродом. Аналіт заливався в кювету, після чого проводилось сканування лазерним променем. Перед зміною аналіту структура промивалась деіонізованою водою та висушувалась на повітрі.

За допомогою потенціостату між аналітом та омичним контактом на *p-Si* прикладалась зовнішня напруга. Зміна зовнішньої напруги дозволяла отримати залежності фотоструму крізь глибокий *p-n* перехід від поверхневого вигину зон у різних точках поверхні зразка.

3. РЕЗУЛЬТАТИ

Сканування сенсорної структури методом LBIC розділяє області фоточутливості у відповідності до модифікацій поверхні (рис. 2). Найбільший фотострум реєструється у зоні *p-Si* зі стравленим контактом. Області з органічним покриттям демонструють меншу фоточутливість.

При контакті поверхні структури із деіонізованою водою, а також водним розчином SDBS та карбонових нанотрубок, фотострум через *p-n* перехід виростає у 3-4 рази (рис. 3).

Прикладання зовнішньої напруги між водним розчином та поверхнею сенсорної структури призводить до зміни фотоструму. Залежність фотоструму через *p-n* перехід від величини прикладеної напруги має подібний вигляд у різних точках зразка (рис. 4). Така закономірність зберігається при аналізі як чистої деіонізованої води, так і розчинів SDBS та карбонових нанотрубок (рис. 4).

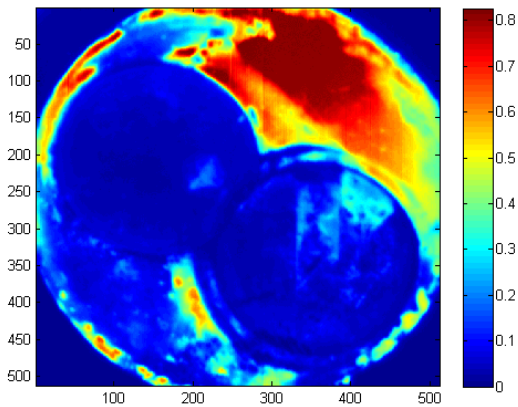
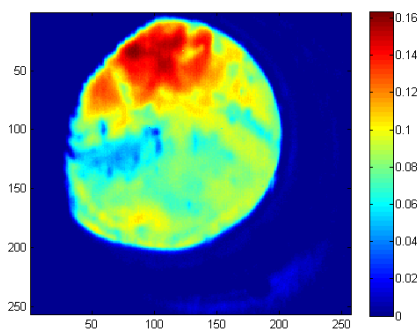
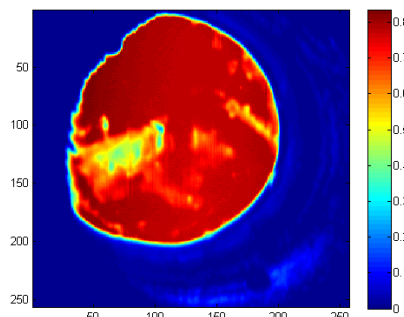


Рис. 2 – Поверхневий розподіл фотоструму через p-n перехід сенсорної структури, отриманий методом ЛВІС. Великий круг – витравлена металізація з боку p-Si, верхній круг – покриття $C_{10}H_{12}$, нижній круг – покриття НЕМА

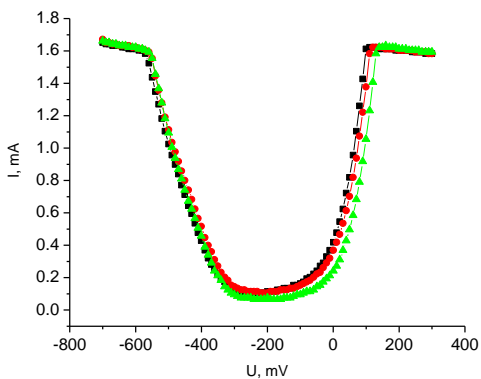


а

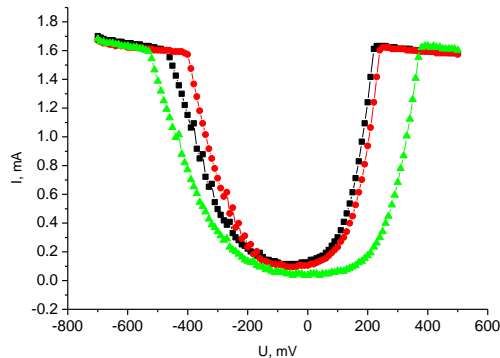


б

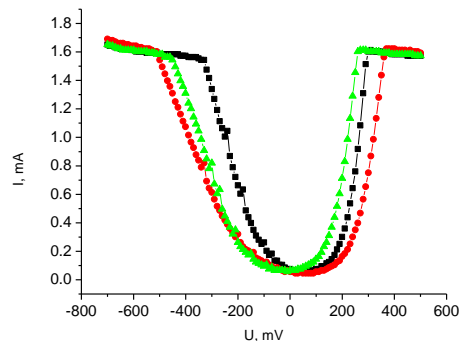
Рис. 3 – Поверхневий розподіл фотоструму через p-n перехід сенсорної структури із електрохімічною квіткою: суха поверхня (а), та вкрита деіонізованою водою (б)



а



б



в

Рис. 4 – Залежність фотоструму через p-n перехід від величини напруги, прикладеної між поверхнею сенсорної структури та аналітом, у різних точках зразка. Як аналіт застосовується деіонізована вода (а), водний розчин сульфанолю (б), та водний розчин карбонових нанотрубок, вкритих сульфанолю (в)

Порівнюючи залежності для різних аналітів, можна побачити, що мінімум кривої зсувається у область більших напруг, при переході від чистої деіонізованої води до розчину SDBS, і далі до розчину карбонових нанотрубок (рис. 5). Ця закономірність зберігається при освітленні будь-якої точки на поверхні сенсорної структури. Вимірювання для чистої деіонізованої води після дослідження розчину карбонових нанотрубок показали часткове відновлення вихідного розподілу фотоструму.

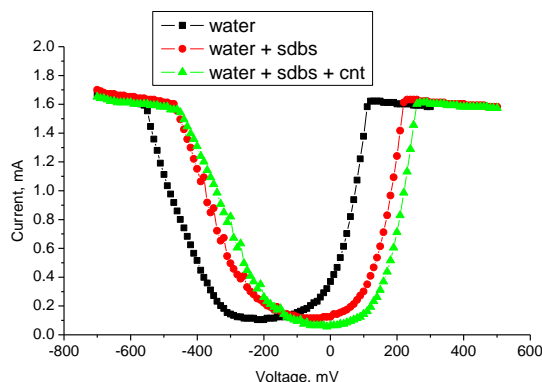


Рис. 5 – Залежність фотоструму через p-n перехід від величини напруги, прикладеної між поверхнею сенсорної структури та аналітом, для різних аналітів

4. ОБГОВОРЕННЯ

Відомо, що у випадку опромінювання поверхні глибокого кремнієвого переходу світлом з області сильного поглинання, зміни фотоструму суттєво залежать від змін ефективної швидкості поверхневої рекомбінації на освітлюваній поверхні [4, 5]. Причиною такого ефекту є просторове розділення області поглинання світла та області просторового заряду в структурі, що зумовлює приповерхневу локалізацію фотогенерованих носіїв. Зокрема, якщо глибина переходу d близька до дифузійної довжини неосновних носіїв l , відносні зміни фотоструму досягають максимуму з подальшим насиченням для більших d . Зміни фотоструму тим більші, чим більший коефіцієнт поглинання світла (менша довжина хвилі) та більша дифузійна довжина неосновних носіїв.

В запропонованій сенсорній структурі (рис. 1) реалізовано умови такої максимальної чутливості фотоструму для фіксації адсорбційних процесів на освітлюваній поверхні через зміну її рекомбінаційних характеристик (відповідні параметри: $d = 150$ мкм, $l = 150$ мкм, $\lambda = 521$ нм).

У випадку адсорбції молекул, які мають елементи з вираженою дипольною структурою, вигин зон та параметри центрів рекомбінації (перерізи захоплення, енергетичне положення, концентрація) можуть змінюватися внаслідок впливу електричного поля. Відповідно до модельних розрахунків залежності ефективної рекомбінації від вигину зон $S(Y_s)$ мають дзвоноподібну форму. Максимальна величина ефективної рекомбінації відповідає вигину зон, коли приповерхневі концентрації електронів і дірок близькі за значенням.

Ефективна швидкість рекомбінації має області різкого спадання рекомбінації у випадку реалізації режиму збіднення або акумуляції (внаслідок дефіциту носіїв заряду певного знаку). У найпростішому випадку зміни ефективної швидкості поверхневої рекомбінації можуть відбуватися лише за рахунок зміни початкового вигину зон в приповерхневій області. У такій ситуації положення максимуму залежності $S(Y_s)$ залишається сталим. В більш складному випадку зміна перерізів захоплення рекомбінаційних центрів призводить до зсуву кривої $S(Y_s)$.

Наведені теоретичні міркування дозволяють інтерпретувати адсорбційні процеси безпосередньо за вимірами фотоструму через перехід. Для цього необхідно порівняти розподіли фотоструму для чистої поверхні та для випадку її контакту з аналітом за нульової зовнішньої напруги. Як основний фактор, що зумовлює зміни поверхневих розподілів фотоструму, можна розглядати саме зміни ефективної швидкості поверхневої рекомбінації. З іншого боку, вимірюючи залежність фотоструму від напруги, прикладеної між аналітом та поверхнею, в умовах опромінювання певних точок поверхні, можна зробити додаткові висновки щодо впливу аналіту на основні характеристики рекомбінаційних центрів.

Для аналізу отриманих результатів розглянемо модель, в якій допускається існування центрів рекомбінації на межі поділу полімерний шар - p -область. Полімерні шари на поверхні p -області в наших дослідженнях створено для стабілізації її рекомбінаційних

властивостей та покращення адсорбційної ефективності. Це привело до зменшення фотоструму, тобто збільшення швидкості ефективної рекомбінації у порівнянні з вільною поверхнею (рис 2). Контакт полімерних шарів із деіонізованою водою або з водним розчином карбонових нанотрубок супроводжується зростанням фотоструму, що можна пояснити зменшенням швидкості ефективної рекомбінації (рис. 3). Ці ефекти пов'язані зі зміною вигину зон поблизу поверхні та зміною параметрів рекомбінаційних центрів внаслідок адсорбції. Зменшення ефективної швидкості рекомбінації можна пов'язати з переходом від режиму близьких приповерхневих концентрацій в режим збіднення основними носіями.

Проаналізуємо залежності фотоструму через перехід від зовнішньої напруги, яка змінює приповерхневий вигин зон (рис. 4). Форма кривих, отриманих за умови опромінювання в трьох різних точках на поверхні полімерних шарів, відповідає модельним уявленням щодо залежностей ефективної швидкості поверхневої рекомбінації від вигину зон. Так, мінімум фотоструму відповідає максимуму рекомбінації на поверхні, а симетричні області зростання фотоструму пов'язані зі спаданням швидкості рекомбінації у випадку збіднення або збагачення приповерхневої області носіями заряду. Відмітимо, що напівширина кривих на рис. 4 практично не змінюється, що свідчить про незмінність енергії рівня рекомбінації в обох випадках.

Умова максимуму швидкості рекомбінації у випадку простого локального центру на межі поділу полімерний шар - p -область має вигляд: $c_n n_s = c_p p_s$, де c_n та c_p – перерізи захоплення електронів та дірок, n_s та p_s – приповерхневі концентрації. Припустимо спочатку, що перерізи захоплення не змінюються внаслідок контакту поверхні з аналітом. Оскільки підкладинка має p -тип провідності логічно припустити, що мінімум рекомбінації (за умови відсутності контакту з аналітом) відповідає напругам із області збіднення основними носіями. У випадку контакту з водою мінімум фотоструму (максимум рекомбінації) спостерігається при напругах, які відповідають області збагачення основними носіями на величину $V_1 = 200$ мВ. Це можна пов'язати із впливом позитивного заряду дипольних молекулярних структур поблизу поверхні, що еквівалентно дії електричного поля, яке відштовхує дірки в глибину p -області. Тому для досягнення максимуму рекомбінації достатньо прикласти негативний потенціал відносно поверхні. У випадку контакту із водним розчином SDBS мінімум фотоструму відповідає меншій напрузі із області збагачення $V_2 = 50$ мВ. Можна припустити, що взаємна орієнтація дипольних структур води та дисоційованих молекул SDBS зменшує величину ефективного електричного поля поблизу поверхні. Таким чином для виникнення близьких приповерхневих концентрацій необхідна менша напруга із області збагачення. Оскільки карбонові нанотрубки не мають складових із вираженою дипольною структурою (за винятком приєднаних функціональних груп), практично не спостерігається змін напруги мінімуму, порівняно з випадком контакту поверхні із розчином SDBS (рис. 5). Зауважимо, що аналогічні мо-

дельні уявлення застосовують для аналізу фізичних процесів в сенсорних структурах типу LAPS (потенціометричний сенсор із світловою адресацією).

Зміни напруги мінімуму фотоструму можуть бути зумовлені і зміною перерізів захоплення. Припускаючи, що концентрації носіїв в приповерхневій області визначаються виключно зовнішньою напругою, можна зробити певні висновки щодо співвідношення c_n та c_p внаслідок адсорбції аналіту. У випадку водного розчину нанотрубок, функціоналізованих SDBS, максимум відповідає більшій концентрації електронів n_s та меншій концентрації дірок p_s у порівнянні з випадком контакту поверхні з водою (відповідні концентрації n_s^* , p_s^*):

$$\begin{aligned} n_s &\sim n_s^* \exp(e(V_2 - V_1)/kT), \\ p_s &\sim p_s^* \exp(-e(V_2 - V_1)/kT) \end{aligned} \quad (4.1)$$

де k – константа Больцмана, T – температура. Відповідно можна припустити, що зменшується переріз захоплення електронів c_n та збільшується переріз захоплення дірок c_p . В реальній ситуації зазначені фактори впливу важко розділити без використання додаткових експериментальних методик. Можна лише стверджувати, що зміна мінімуму фотоструму в даних експериментах може бути результатом впливу дипольних структур аналіту на приповерхневі концентрації носіїв заряду та на величини перерізів захоплення.

Підсумовуючи, можна сказати, що аналіз поверхневого розподілу фотоструму та залежностей фотоструму від напруги на поверхні, може бути ефективними інструментами детекції водного розчину карбонових нанотрубок, вкритих сульфанолам. Сенсорною структурою в такому випадку може слугувати

глибокий кремнієвий перехід $p-n$, модифікований органічними покриттями.

5. ВИСНОВКИ

Сенсорна структура на основі пластини кремнію із глибоким $p-n$ переходом характеризується нерівномірним розподілом fotocутливості, що залежить від модифікації поверхні органічними сполуками.

При контакті сенсорного шару з деіонізованою водою, а також водним розчином сульфанола (SDBS) та карбонових нанотрубок, фотострум через $p-n$ перехід виростає у 3-4 рази. Зареєстровано зсув залежності фотоструму від напруги, прикладеної між водним розчином та поверхнею зразка, що обумовлюється присутністю молекул SDBS та карбонових нанотрубок у розчині.

Зміни ефективної швидкості рекомбінації, що відповідають розподілу фотоструму на поверхні при контакті з аналітами, можуть бути зумовлені зміною приповерхневого вигину зон та перерізів захоплення рекомбінаційних центрів на межі поділу полімерний шар-кремній. Аналіз поверхневого розподілу фотоструму та залежностей фотоструму від напруги на поверхні, може бути ефективними інструментами детектування водного розчину карбонових нанотрубок з адсорбованим сульфанолам.

ПОДЯКА

Ця робота була підтримана EU Horizon 2020 Програмою обміну досвідом і інноваціями (RISE) в рамках програми MARIE SKŁODOWSKA CURIE Action (Проект 690945 «Carther»).

Photoelectric Signal Conversion in Deep $p-n$ Junction for Detection of Carbon Nanotubes with Adsorbed SDBS in Aqueous Solution

A.I. Manilov^{1,3}, A.V. Kozinetz¹, I.V. Gavrilenko^{1,3}, Y.S. Milovanov^{1,3},
T.M. Mukhamedzhanov^{1,2}, S.A. Alekseev^{2,3}, M. Al Araithi^{4,5}, S.V. Litvinenko^{1,3},
A. Rozhin⁴, V.A. Skryshevsky^{1,3}

¹ Institute of High Technologies, Taras Shevchenko National University of Kyiv, 64, Volodymyrska Str., 01033 Kyiv, Ukraine

² Chemical Faculty, Taras Shevchenko National University of Kyiv, 64, Volodymyrska Str., 01033 Kyiv, Ukraine

³ Corporation Science Park Taras Shevchenko University of Kyiv, 60, Volodymyrska Str., 01033 Kyiv, Ukraine

⁴ Nanotechnology Research Group, Aston Institute of Photonic Technologies, School of Engineering & Applied Science, Aston University, Aston Triangle, B4 7ET Birmingham, UK

⁵ Engineering Department, Al Musanna College of Technology, Muladdah Musanna, Sultanate of Oman

The possibility of using the principle of photoelectric conversion in structures with a deep $p-n$ junction to control the content of carbon nanotubes with adsorbed surfactant (SDBS) in an aqueous solution was shown. Experimental studies of the analyte influence on the change in the photocurrent through a deep $p-n$ junction were carried out. A shift in the dependence of the photocurrent on the voltage applied to the surface of the sensor structure due to the presence of carbon nanotubes in the solution was recorded. The change in the effective recombination rate, which corresponds to the distribution of the photocurrent at the surface, can be attributed to a change in the near-surface band bending.

Keywords: Sensor, Carbon nanoparticles, Photocurrent, Surface recombination rate, Deep $p-n$ junction.

Фотоэлектрическое преобразование сигнала в глубоком $p-n$ -переходе как способ детектирования карбоновых нанотрубок с адсорбированным сульфанолам в водном растворе

А.И. Манилов^{1,3}, А.В. Козинец¹, И.В. Гаврильченко^{1,3}, Ю.С. Милованов^{1,3},
Т.М. Мухамеджанов^{1,2}, С.А. Алексеев^{2,3}, М. Аль Араими^{4,5}, С.В. Литвиненко^{1,3},
А. Рожин⁴, В.А. Скрышевский^{1,3}

¹ *Институт высоких технологий, Киевский национальный университет имени Тараса Шевченка, ул. Владимирская, 64, 01033 Киев, Украина*

² *Химический факультет, Киевский национальный университет имени Тараса Шевченка, ул. Владимирская, 64, 01033 Киев, Украина*

³ *Корпорация «Научный парк Киевский национальный университет имени Тараса Шевченка», ул. Владимирская, 60, 01033 Киев, Украина*

⁴ *Исследовательская группа по нанотехнологиям, Астонский институт фотонных технологий, Школа инженерии и прикладных наук, Университет Астона, Треугольник Астона, В4 7ЕТ Бирмингем, Великобритания*

⁵ *Инженерный департамент, Технологический колледж Аль Мусанни, Муладда Мусанна, Султанат Оман*

Показана возможность использования принципа фотоэлектрического преобразования в структурах с глубоким $p-n$ переходом для контроля содержания карбоновых нанотрубок с адсорбированной ПАВ (сульфанолам) в водном растворе. Проведены экспериментальные исследования влияния анализа на изменение фототока через глубокий $p-n$ переход. Зарегистрировано смещение зависимости фототока от напряжения, приложенного к поверхности сенсорной структуры, обусловленное присутствием карбоновых нанотрубок в растворе. Изменение эффективной скорости рекомбинации, которая соответствует распределению фототока на поверхности, может быть обусловлено изменением приповерхностного изгиба зон.

Ключевые слова: Сенсор, Карбоновые наночастицы, Фототок, Скорость поверхностной рекомбинации, Глубокий $p-n$ переход.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V.A. Skryshevsky, *Porous Si Structures for Gas, Vapor and Liquid Sensing* (In: Comprehensive Guide for Mesoporous Materials, Volume 3: Properties and Development, Ed. Mahmood Aliofkhaezaei, Nova Science Publishers Inc.: 123-146, 2015).
2. S. M. Sze, *Semiconductor Sensors* (Wiley, New York: 1996).
3. T. Wagner, M.J. Schöning, *Electrochem. Sensor Analysis* **49**, 87 (2007).
4. S.V. Litvinenko, A.V. Kozinetz, V.A. Skryshevsky, *Sensor. Actuat. A: Phys.* **224**, 30 (2015).
5. O.V. Kozynets, S.V. Litvinenko, *Ukr. J. Phys.* **57**, 1234 (2012).
6. S.V. Litvinenko, D.O. Bielobrov, V. Lysenko, V.A. Skryshevsky, *Nanoscale Res. Lett.* **11**, 374 (2016).
7. I.S. Чекман, О.В. Швец, О.О. Нагорна, *Укр. мед. часопис* **3** (65) – V/VI, 86-91 (2008) (I.S. Chekman, O.V. Shvets', O.O. Nahorna, *Ukr. med. chasopys* **3** (65) – V/VI, 86-91 (2008)).
8. H. Hillebrenner, F. Buyukserin, J.D. Stewart, C.R. Martin, *Nanomed.* **1**(1), 39 (2006).
9. J.V. Veetil, K. Ye, *Biotechnol. Prog.* **23**(3), 517 (2007).
10. Y. Tzeng, T.S. Huang, Y.C. Chen, *New Diamond and Frontier Carbon Technology* **14** No 3, 193 (2004).
11. M.M. Dahm, M.K. Schubauer-Berigan, D.E. Evans, M.E. Birch, J.E. Fernback, J.A. Deddens, *Ann. Occup. Hyg.* **59** No 6, 705 (2015).
12. T. Kasai, Y. Umeda, M. Ohnishi, T. Mine, H. Kondo, T. Takeuchi, M. Matsumoto, S. Fukushima, *Part. Fibre Toxicol.* **13** No 1, 53 (2016).
13. J.M. Buriak, *Chem. Rev.* **102**, 1271 (2002).
14. K. Dasgupta, J.B. Joshi, S. Banerjee, *Chem. Eng. J.* **171**, 841 (2011).