

Тези доповідей з радіаційної фізики та радіаційного матеріалознавства

ВІДГУК КРЕМНІЄВИХ ДІОДІВ ПРИ СИНХРОТРОННОМУ ОПРОМІНЕННІ

І. Є. Анохін, О. С. Зінець

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

Кремнієві діоди широко використовуються для діагностики та дозиметрії синхротронного випромінювання. Велика інтенсивність та імпульсний характер синхротронного випромінювання потребує врахування нелінійних ефектів в кінетиці процесів генерації-рекомбінації надлишкових носіїв заряду.

Розглянуто залежності часу життя та біполярного коефіцієнта дифузії від густини надлишкових носіїв заряду, генерованих синхротронним випромінюванням. Розраховано відгуки кремнієвого діода при опроміненні фотонами з енергією 20-100 кеВ від джерела синхротронного випромінювання в залежності від інтенсивності пучка та характеристик діода. Розглянуто режим «короткого замикання», коли домінує збирання заряду з дифузійної області. Отримано розв'язки дифузійного рівняння для різних граничних умов, що відповідають «довгим» та «коротким» детекторам. Показано, що при високій інтенсивності пучка, поряд з моделлю рекомбінації Шоклі - Ріда, треба враховувати рекомбінацію Оже.

Результати можуть бути використані для вимірювання поглинутої дози при рентгенівському опроміненні від синхротронного джерела.

АКТИВАЦІЯ ПОВІТРЯ ТА ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ ПРИ РОБОТІ МЕДИЧНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ЕЛЕКТРОНІВ

**О. А. Безшийко¹, Б. М. Бондар^{1,2}, Л. О. Голінка-Безшийко¹,
І. М. Каденко¹, Я. В. Кметюк², К. Г. Кошарський², Є. Л. Момот¹,
А. О. Нагай¹, Я. О. Безшийко¹**

¹ *Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ*

² *Всеукраїнський центр радіаційної хірургії клінічної лікарні «Феофанія», Київ*

Рак займає одне з провідних місць серед захворювань населення більшості економічно розвинутих країн світу. Незважаючи на позитивні тенденції, рак – у всіх його проявах – продовжує підривати глобальну охорону здоров'я. У 2008 р. було 12700 тис. нових випадків захворювання на рак та 7,6 млн випадків смерті відповідно до American Cancer Society (ACS). До 2030 р. Всесвітня організація охорони здоров'я прогнозує, що ми стикнемося з більш ніж 21 млн нових випадків захворювання на рак та 13 млн випадків смерті в рік.

Це обумовлює актуальність і важливість пошуку нових методів лікування онкологічних захворювань.

Лінійні прискорювачі електронів набули широкого використання в променевої терапії при лікуванні пацієнтів хворих на рак. Під час проведення лікувальної процедури з використанням лінійного прискорювача окрім опромінення самого пацієнта відбувається опромінення стовпа повітря між хворим і прискорювачем та конструкційних елементів голови прискорювача та процедурної. При використанні для опромінення високих енергій гамма-квантів (вище 10 MeV) окрім утворення озону відбувається також активація компонентів середовища та матеріалів (можуть відбуватись реакції з утворенням різних радіоактивних ізотопів, які створюють додаткову дозу в приміщенні, де проводиться лікування) і як наслідок існує небезпека опромінення персоналу, в тому числі внутрішнього опромінення за рахунок активації компонентів повітря.

У роботі наведено результати розрахунків з використанням методу Монте Карло для оцінки активації повітря в залежності від форми гальмівного спектра гамма-квантів медичних лінійних прискорювачів електронів. Також наведено результати вимірювань залишкового радіоактивного фону в бункері лінійного прискорювача після процедур опромінювання. Обговорюється можливий вплив нейтронів, які утворюються в результаті фотонейтронних реакцій.

СТВОРЕННЯ, РУХ ТА ПІДСИЛЕННЯ ІМПУЛЬСІВ КОНДЕНСОВАНИХ ЕКСИТОННИХ ФАЗ В НЕОДНОРІДНИХ ПОЛЯХ У КВАНТОВИХ ЯМАХ НАПІВПРОВІДНИКІВ

О. І. Дмитрук¹, В. Й. Сугаков²

¹ *Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ*

² *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

У даній роботі вивчені рух та підсилення екситонного імпульсу, створеного лазерним імпульсом в подвійній квантовій ямі в неоднорідному потенціалі. При наявності зовнішнього електричного поля, перпендикулярного площині квантових ям, електрон і дірка, що належать екситону, знаходяться в різних ямах, їх взаємна рекомбінація загальмована. Тому екситон має тривалий час життя і може зміститись в неоднорідному полі на велику відстань. Такі екситони називаються непрямыми, а їх властивості передбачається використати в електронних системах, в яких керування процесами відбувається не з допомогою електричного поля, а лазером [1]. У роботі розглянуто одновимірний рух нечастиць екситонів в потенціалі, що лінійно залежить від координат. Розраховане нелінійне рівняння для густини екситонів, яке в моделі Ландау описує вільну енергію екситонів, а також враховує скінченний час життя екситонів. Показано, що екситонний імпульс звукується з часом, проте

не розпливається і максимум екситонної густини в імпульсі залишається сталим протягом часу життя екситонів, якщо імпульс сформований саме з конденсованої фази [2], на противагу імпульсу сформованого з газової фази екситонів. Шлях, який пройде імпульс зі сталим значенням густини в максимумі, може бути збільшений накладанням додаткового лазерного імпульсу на систему. Ці результати були підтверджені для екситонів реальної системи [3] в подвійних квантових ямах в напівпровіднику, розміщеному між двома металевими електродами з отвором у вигляді щілини у верхньому електроді. Таким чином, розглядувана система може бути використана для передачі даних в електронних системах через екситонну конденсовану фазу.

1. High A.A., Novitskaya E.E., Butov L.V., Gossard A.C. // Science. - 2008. - Vol. 321. - P. 229 - 231.
2. Dmytruk O.I., Sugakov V.I. // Phys. Lett. - 2012. - Vol. A376. - P. 44.
3. Sugakov V.I. // J. Phys.: Condens. Matter. - 2009. - Vol. 21. - P. 275803.

ВПЛИВ МЕТАЛІЧНИХ НАНООБОЛОНОК НА ЗБИРАННЯ СВІТЛА LH2 КОМПЛЕКСОМ ФОТОСИНТЕТИЧНИХ БАКТЕРІЙ

І. Ю. Голіней, В. Й. Сугаков, Г. В. Верцімаха

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

Теоретично досліджено вплив присутності золотої наноболонки поблизу периферичного світлозбирального комплексу (LH2) фотосинтетичних бактерій на ефективність процесів фотосинтезу. Визначений сумарний ефект, зумовлений співвідношенням підсилення поглинання світла у смузі B850 внаслідок сильної взаємодії екситонів LH2-кільця та станів поверхневих плазмонів і додаткового гасіння збуджень поблизу металу. Враховано залежність затухання плазмонних станів від розмірів наноболонки.

Визначено діапазон параметрів гібридної системи, для яких присутність золотої наноболонки веде до підвищення ефективності збирання світла. Незважаючи на те, що частота поверхневого плазмону для золотої наночастинки ближча до частоти поглинання світла для B850-зони LH2 комплексу, ніж для подібної срібної наноболонки, кількісно ефекти підсилення поглинання світла близькі для обох металів. Це пов'язано з сильним затуханням плазмонних станів в золоті. Перевагою використання золотої наноболонки є більш широкий діапазон товщин наноболонки, для яких можливо підсилення поглинання світла.

Проаналізовано залежність ефекту підсилення оптичного поглинання від взаємного просторового розташування срібної наноболонки та молекулярного кільця в гібридній світлозбиральній системі. Чисельні розрахунки з використанням параметрів, типових для подібних структур, показують, що підсилення поглинання світла, зумовлене перекачкою інтенсивності плаз-

монного дипольного переходу до екситонного переходу, залишається істотним при зсуві сферичної наночастинки в площині мембрани на відстань, близьку за величиною до радіусу наносфери. Для наночастинок малого радіусу (близького до радіусу кільця) при несиметричному розташуванні наносфери відносно кільця поглинання може додатково підсилюватись за рахунок появи переходів, заборонених у випадку симетричного розташування.

СПЕКТР НЕПРУЖНОГО РОЗСІЯННЯ ЕЛЕКТРОНІВ НА СИСТЕМІ ДИПОЛЬ-ПРОВІДНА НАНОЧАСТИНКА

І. Ю.Голіней, Є. В. Оникієнко

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

Побудована квантово-механічна теорія непружного розсіяння електронів на системі, що складається з металевої нанокुльки і молекули, актуальна в зв'язку з дослідженням плазмонів за допомогою методу спектроскопії енергетичних втрат електронів.

Показано, що існує резонансне підсилення розсіяння електронів на молекулі, поміщений неподалік від металевої наночастинки за рахунок взаємодії молекули з локалізованими плазмонами, для яких характерний дуже великий дипольний момент. Як наслідок резонансного змішування збудженого електронного стану молекули й плазмонного стану наночастинки й зумовленого ним позичання сили осцилятора, розсіяння електрона на молекулі підсилюється на кілька порядків.

Унаслідок взаємодії плазмонних мод з молекулою імовірність збудження молекули швидкими електронами зростає до 12 порядків. Це відкриває можливість спостерігати в електронний мікроскоп окремі молекули на поверхні наночастинок.

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ЗРАЗКІВ-СВІДКІВ НА УСТАНОВЦІ LECO GDS 500

М. Г. Голяк

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

Програма супроводу працездатності металу корпусів діючих в Україні ядерних енергоблоків базується на дослідженні зразків-свідків з основного металу і зварних з'єднань. Дуже важливо знати фактичні дані хімічного складу металу, оскільки саме концентрація деяких хімічних елементів (особливо P, Cu, Ni, Mn, Si, S) впливає на фізико-хімічні властивості металу, головна з яких радіаційне окрихчування. В новій редакції документу МАГАТЕ VERLIFE-2011 розрахунок параметрів радіаційного окрихчування пропону-

ється проводити з урахуванням вмісту таких елементів як нікель, марганець, кремній.

Під назвою фотоелектричний спектральний аналіз ми розуміємо фізичний метод аналізу хімічного складу речовини, заснований на дослідженні спектрів випускання і поглинання атомів або молекул. Ці спектри визначаються властивостями електронних оболонок атомів і молекул, коливаннями атомних ядер в молекулах і обертанням молекул, а також впливом маси і структури атомних ядер на положення енергетичних рівнів, крім того вони залежать від взаємодії атомів і молекул з навколишнім середовищем.

Метою роботи є опис реалізації методу фотоелектричного спектрального аналізу на установці LECO GDS 500, а саме таких переваг, як точність, економічність та відсутність впливу самого аналізу на фізико-механічні властивості досліджуваних зразків.

Метод **Glow Discharge-Optical Emission Spectrometry** (GD-OES) заснований на збудженні атомів елементів сталі електричним розрядом, подальшому розкладанні випромінювання в спектр, вимірі аналітичних сигналів, пропорційних інтенсивності або логарифму інтенсивності спектральних ліній, і наступному визначенні масових часток елементів за допомогою градуйованих характеристик.

ЕФЕКТИ САМООРГАНІЗАЦІЇ РАДІАЦІЙНИХ ДЕФЕКТІВ У КРЕМНІІ, ОПРОМІНЕНОМУ НЕЙТРОНАМИ

А. А. Гроза¹, В. І. Варніна¹, П. Г. Литовченко¹, Л. С. Марченко¹,
Л. О. Матвєєва², П. Л. Нєлюба², М. Б. Пінковська¹,
М. І. Старчик¹, Г. Г. Шматко¹

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

² Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України, Київ

Наші дослідження опроміненого нейтронами кремнію методом інфрачервоної спектроскопії показали існування двох типів областей розупорядкування (вакансійного і міжвузловинного). Метою даної роботи є отримання додаткових даних про фізичні процеси, які відбуваються в кремнії при опроміненні та відпалі, застосовуючи метод електровідбивання світла (ЕВ).

В спектрі кремнію, опроміненого нейтронами флюенсом 10^{18} см⁻² і невідпаленому, виявлено два максимуми сигналу електровідбивання в спектральній області прямого електронного переходу E_g при 3,325 та 3,404 еВ. Факт появи розщеплення сигналу електровідбивання ($\Delta E_g = 80$ мєВ) прямого електронного переходу E_g не тільки підтверджує існування в опроміненому кремнії двох типів областей розупорядкування, але й наочно ілюструє ефект самоорганізації власних радіаційних дефектів, який в наших дослідженнях кремнію, опроміненого високоенергетичними легкими іонами, проявлявся у вигляді надгратки "стінок дефектів", розташованих перпендикулярно напрямку опромінення.

В спектрі електровідбивання зразка кремнію, опроміненого $\Phi = 10^{18} \text{ см}^{-2}$, з'являлись високоенергетичні осциляції, які зазвичай спостерігаються в ефекті Франца - Келдиша при наявності вбудованого електричного поля і свідчать про існування в ньому локальних електричних полів. В спектрах електровідбивання відпалених зразків, неопроміненого і опроміненого, також з'являлись високоенергетичні осциляції, зумовлені внутрішнім ефектом Франца - Келдиша.

Встановлено умови виникнення ефекту Франца - Келдиша та квантово-розмірного ефекту залежно від обробки зразків (нейтронне опромінення, термічний відпал та хімічне травлення).

Ці ефекти знаходять пояснення в межах синергетичного підходу і є важливими при побудові сучасної теорії взаємодії високоенергетичного опромінення з речовиною.

ПРО ДЕЯКІ ВЛАСТИВОСТІ ВОДИ, ЯКІ ВИЯВЛЯЮТЬСЯ МЕТОДАМИ НЕЙТРОННОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ І РЕНТГЕНОСТРУКТУРНОГО АНАЛІЗУ

М. В. Курик¹, Л. С. Марценюк²

¹Інститут фізики НАН України, Київ

²Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

Поведінка води в надмалих об'ємах, стінки яких не змочуються водою, дуже цікавить фахівців в різних галузях - від геологів і біологів до розробників нових матеріалів. Найбільш незвичні властивості, як впливає з [1, 2], має вода, яка вміщена у вуглецеві нанотрубки розміром 1,4 нм в поперечнику і довжиною 10 тис. нм. Дослідження поведінки води, як в нанотрубках, так і в пористих матеріалах проводились групою Колесникова (лабораторія Арізони) методами нейтронної спектроскопії [1, 2].

Виявилося, що вода в нанотрубках знаходиться в новому стані, не схожому ні на рідке, ні на газоподібне агрегатні стани. Скоротилася середня кількість водневих зв'язків, що зв'язують молекулу води з сусідніми (так зване координатне число) з 3,8 до 1,86. Внаслідок цього підвищилася рухливість молекул. «Нова вода» не замерзає навіть при температурі, що всього на вісім градусів відрізняється від абсолютного нуля. Середньоквадратичні відхилення атомів водню в нанотрубковій воді при температурі

8 К в чотири рази перевищують ці значення для льоду і делокалізація атомів водню складає близько 0.2 Å; не фіксується для такої води методами нейтронної спектроскопії наявність ковалентних зв'язків. Незвичайно високу рухливість виявляє також вода в пористих матеріалах.

З позиції отриманих даних виявляється можливим осмислити процеси, що приводять до виникнення ефекту індукції надпровідності в матеріалах $\text{FeTe}_{0,8}\text{S}_{0,2}$ і SrFe_2As_2 [3, 4]. У них, як впливає з [3, 4], дифундована вода

утворює одиничні шари між основними шарами матеріалів.

Зміни властивостей цих матеріалів при дифузії в них води досліджувалися методами рентгеноструктурного аналізу і автори, що аналізували ці зміни, не змогли однозначно встановити причину виявленого ними ефекту.

На підставі аналізу експериментальних результатів згаданих вище робіт, а також теоретичних розробок Е. Препарата [5] по конденсації води (з позиції квантової електродинаміки) пропонується модель, що описує процеси індукування водою надпровідності в з'єднаннях $\text{FeTe}_{0,8}\text{S}_{0,2}$ і SrFe_2As_2 . Вказується на деяку аналогію процесів, що приводять до переходу в стан надпровідності в цих з'єднаннях, і процесів в живих організмах [6].

1. *Kolesnikov A.I. et al. Neutron Spectroscopy of Water in Carbon Nanotubes // Phys. Rev. Lett. - 2004. - Vol. 93. - P. 035503.*
2. *Kolesnikov A.I. et al. Anomalous Behavior of Proton Zero Point Motion in Water Confined in Carbon Nanotubes // Phys. Rev. Lett. - 2006. - Vol. 97. - P. 247801.*
3. *Hidenori Hiramatsu, Takayoshi Katase, Toshio Kamiya et al. Water-induced superconductivity in SrFe_2As_2 // Phys. Rev. - 2009. - Vol. B80. - P. 052501.*
4. *Mizuguchi Y., Deguchi K., Tsuda S. et al. PhyMoisture-induced superconductivity in $\text{FeTe}_{0,8}\text{S}_{0,2}$ // Phys. Rev. - 2010. - Vol. B81. - P. 214510.*
5. *Preparata G. QED Coherence in Condensed Water. - Singapore: World Sci., 1995. - 236 p.*
6. *Курик М.В., Марценюк Л.С. Фізичні основи життя. LAP LAMBERT. - Germany: Academic Publishing. 2012. - 174 с.*

МОДЕЛИРОВАНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

В. В. Михайловский

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

Углеродные нанотрубки - протяженные частицы цилиндрической формы, образованные из одного или нескольких графитовых слоев. Они отличаются широким разнообразием физико-химических свойств и сочетают в себе свойства молекул и твердого тела. Возможность использования углеродных нанотрубок в качестве прочных и жестких элементов наноэлектромеханических систем, в которых может быть реализовано управляемое движение нанообъектов, является мощным стимулом для исследований в этой области.

В работе приведены результаты моделирования сжатия и растяжения однослойных нанотрубок. Показаны структурные изменения нанотрубок при деформации, показан разрыв нанотрубки. Моделирование проведено методом молекулярной динамики, ковалентные связи описываются потенциалом Терзофа.

Такоже приведені результати моделювання двохшарових нанотрубок. Показано коливання під впливом ван-дер-ваальсових сил між шарів графіта. Розглянуто випадок обертання одного з шарів і передачі обертального моменту від одного шару до іншого. Показано, що передача обертального моменту відбувається повільніше, ніж коливання нанотрубок, а наявність обертання зменшує швидкість затухання коливань.

ВПЛИВ РАДІАЦІЙНИХ ДЕФЕКТІВ НА ЕЛЕКТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОСФІДО-ГАЛІЄВИХ СВІТЛОДІОДІВ

**О. І. Власенко, В. П. Велешук, П. Г. Литовченко, Є. В. Малий,
І. В. Петренко, М. Б. Пінковська, В. П. Таргачник**

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

Для вивчення можливості покращення експлуатаційних параметрів промислових фосфідо-галієвих світлодіодів з допомогою радіації вивчався вплив швидких електронів на електричні характеристики приладів. Досліджувались АЛ 102 зелені р-n-структури, вирощені методом подвійної рідинної епітаксії на підкладинці, одержаній методом Чохральського. Опромінення електронами з $E = 2$ МеВ проводилося на прискорювачі трансформаторного типу при температурі не вищій кімнатній.

Спектри електролюмінесценції вимірювалися спектрометром МДР-23 при 300К, свічення мікоплазм реєструвалося фотокамерою Canon Power Shot A480.

Виявлено, що опромінення електронами $\Phi = 2 \cdot 10^{12} \text{см}^{-2}$ до $5 \cdot 10^{12} \text{см}^{-2}$ зелених фосфідо-галієвих світлодіодів призводить до зменшення ємності р-n-переходу, зворотних струмів, зростання зворотних напруг та падіння інтенсивності свічення мікоплазм (МП). Спостерігається звуження площ МП; межі зон їхнього свічення стають розмитішими, дрібні МП зникають повністю. Насамперед гаснуть центри точкового свічення поблизу великих яскравих плям. Області свічення великої площі можуть розщеплюватись на дрібніші. Очевидно, що у неопроміненому зразку МП великих розмірів є наслідком висвічування близько розташованих шнурів струму. Зростання дози опромінення $\Phi = 5 \cdot 10^{16} \text{см}^{-2}$ призводить до зменшення числа, переважно дрібних МП, зменшується також площа великих областей.

ТРИВИМІРНА ПОЛІМЕРНА ФАНТОМНА ДОЗИМЕТРІЯ

О. Ч. Туронок¹, О. В. Дяченко¹, М. Є. Альохіна², О. А. Безшийко²,
Л. О. Голінка-Безшийко², І. М. Каденко²

¹ Концерн «Сакура», Київ

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

Терапія з використанням іонізуючого випромінювання – важлива ланка лікувального процесу при онкологічних захворюваннях. Точне визначення отриманої пацієнтом дози при променевої терапії є не тільки бажаним, але і обов'язковим елементом контролю якості процедури та забезпечення її максимальної ефективності. Важливо не тільки довести до ракової пухлини величину дози, яка гарантовано стерилізує цю зону, але при цьому мінімально опромінити здорові тканини. Для розробки таких ефективних методик необхідно попередньо відпрацювати їх на фантомах. Також такі фантоми можуть бути ефективними для контролю стабільності роботи систем опромінення з часом. Для отримання повної картини розподілу дози необхідно використовувати тривимірні фантоми - в об'ємі яких формуються неоднорідності, пропорційні величині доведеної дози. За останні роки використання 3D фантомів для визначення дози при променевої терапії розвивається швидкими темпами, з'являються нові види таких дозиметрів.

У роботі зроблено спробу провести критичний огляд сучасного стану систем тривимірної дозиметрії, розглядаються і порівнюються їх переваги, недоліки, технологічні особливості. Розглядаються різні системи – від вже класичних феросульфатних дозиметрів (Фріке) до добре відомих, але ще не в повній мірі досліджених полімеризаційних дозиметрів та достатньо нових радіохромних твердотільних ланцюгових тривимірних дозиметрів.

ФОРМУВАННЯ ВПОРЯДКОВАНОЇ ДЕФЕКТНОЇ СТРУКТУРИ В МОНОКРИСТАЛІЧНОМУ КРЕМНІІ, ОПРОМІНЕНОМУ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОТОНАМИ І АЛЬФА-ЧАСТИНКАМИ

В. І. Варніна, А. А. Гроза, П. Г. Литовченко, Л. С. Марченко,
М. І. Старчик, Г. Г. Шматко

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

Оптичними і рентгеноструктурними методами досліджена дефектна структура кремнію, опроміненого флюенсами $1 \div 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ протонів ($E_p = 6,8 \text{ MeV}$) і α -частинок ($E_\alpha = 27,4 \text{ MeV}$).

Встановлений граничний флюенс зміни структури дефектів із-за їх великої концентрації і взаємодії, що приводить до впорядкування і самоорганізації дефектів. Обговорюються можливі механізми цих процесів.

ЗМІНА СОРБЦІЙНОЇ ЗДАТНОСТІ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНІ НЕОРГАНІЧНИХ СОРБЕНТІВ ПІД ДІЄЮ Г-КВАНТІВ РІЗНИХ ЕНЕРГІЙ

**Г. В. Васильсва¹, І. І. Гайсак¹, А. П. Осипенко¹,
В. І. Яковлєв², Ю. М. Килівник²**

¹ *Ужгородський національний університет,
кафедра теоретичної фізики, Ужгород*

² *Інститут сорбції і проблем ендоекології НАН України, Київ*

Експериментально досліджено вплив опромінення гамма-квантами ($E_{\text{max}} = 24\text{Мев}$) на властивості поверхні неорганічних сорбентів. З цією метою було використано Бетатрон Б-25, встановлений на Кафедрі теоретичної фізики Ужгородського національного університету. Сорбенти - фосфат титана та цирконій силікат, є синтетичними аморфними матеріалами із добре розвиненою поверхнею (близько $290\text{м}^2/\text{г}$), синтезовані в Інституті сорбції і проблем ендоекології, Київ. Контролювали такі характеристики сорбентів, як питома поверхня, об'єм пор та їх радіус.

Встановлено, що при опроміненні змінюються усі вказані параметри фосфату титану та цирконій силікату. Досліджено процес сорбції іонів барію вказаними сорбентами до та після опромінення. Показано, що сорбційна здатність досліджуваних матеріалів відносно іонів барію після опромінення знижується.

ПРОБЛЕМИ ОПТИМІЗАЦІЇ ОПРОМІНЮВАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВИРОБІВ

**Т. В. Ковалінська, І. А. Остапенко, В. І. Сахно,
А. Г. Зелінський, Н. В. Халова**

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

Аналізуються різні методи промислового опромінювання матеріалів та виробів. Наводяться характеристики традиційних структур систем випуску пучка на промисловій радіаційній техніці. Зазвичай вони базуються на принципах випуску пучка електронів через вікно з металеві фольги. Запобігання руйнування фольги пучком забезпечується сканування його по поверхні випускного вікна магнітним полем. Для радіаційної установки ІЯД НАНУ зроблено і використовується оригінальний метод промислового опромінювання матеріалів і виробів.

Наведена технологічна схема опромінювання, що включає усі складові процесу - формування радіаційного поля, транспортування виробів на опромінення, стабілізація і отримання необхідних поглинутих доз випромінювання. Обґрунтовуються технічні і економічні переваги цього методу радіаційної

обробки. Аналізуються найближчі перспективні напрямки розвитку нових промислових технологій опромінення, в першу чергу удосконалення електронних автоматизованих систем технологічної дозиметрії.

Обговорюються реально досягнуті результати технологічного опромінювання за новими методами різноманітних промислових виробів, отримані на установці ІЯД НАНУ. Показано, що запропонований метод радіаційної обробки надає можливості здійснення методик опромінення з високою точністю навіть у таких напрямках, як радіаційних технологіях харчових продуктів, фармацевтичних засобів, медицині.

ПРОБЛЕМИ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ДОЗИМЕТРІЇ РАДІАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ

**Т. В. Ковалінська¹, А. Г. Зелінський¹, В. І. Сахно¹,
І. А. Остапенко¹, Н. В. Халова¹, В. В. Шлапацька²**

¹ *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

² *Державне підприємство "РАДМА"*

Інституту фізичної хімії ім. Л. В. Писаржевського НАН України, Київ

Розглядаються шляхи вирішення проблем метрології опромінювання та поширення опромінених матеріалів при радіаційних технологіях. Аналізуються вимоги до цих заходів у різних галузях промислового виробництва та перспективних напрямках їх розвитку. Розглянуто традиційні методи дозиметрії промислових процесів. Обговорюються існуючі проблеми метрології опромінення на технологічних промислових лініях реального виробництва. Обговорюються перспективні шляхи удосконалення метрології опромінення промислових виробів. Запропоновано і обґрунтовано нову структуру технічних засобів для їх реалізації.

Пропонується поєднати електронні методики дозиметрії та удосконалити традиційні методи візуального контролю за опроміненням хімічними дозиметрами-свідками. Обговорюються шляхи удосконалення електронних методів дозиметрії для різних типів промислової радіаційної техніки. Показані проблеми електронної дозиметрії на імпульсних пучках електронів великої потужності. Визначено шляхи створення оперативних методів по типу дозиметрів-свідків опромінювання промислових виробів та можливості удосконалення засобів хімічної дозиметрії.

Наводяться конструкції технічних засобів електронної дозиметрії, розроблені і випробувані на радіаційній установці ІЯД НАНУ. Обговорюються результати їх випробувань та експлуатації. Наведено оригінальні способи та результати нетрадиційного використання хімічних дозиметрів-свідків для технологічних вимірювань.

ІСТОРІЯ, СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ РАДІАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ІЯД НАН УКРАЇНИ

І. М. Вишневський, Т. В. Ковалінська, В. І. Сахно

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

Обговорюється широке коло досліджень, що є традиційними для ІЯД НАНУ і мають на меті залучення ядерної енергії для практичних цілей. Наведено найбільш вагомі результати прикладних досліджень, здійснені на потужному експериментальному комплексі Інституту, який включає атомний дослідницький реактор, циклотрон У-120, самий крупний в Європі універсальний ізохронний циклотрон У-240, прецизійний тандем-генератор ЕГП10. Ці ядерно-фізичні установки, є не тільки єдиними в Україні, але поки що і унікальними і для європейської ядерної науки в області низьких і середніх енергій. На цій технічній базі вже з 50-х років минулого століття традиційно проводяться дослідження і розробки радіаційних технологій для промислового використання. Вони охоплюють 5 основних напрямків:

- радіаційні технології для сільського господарства;
- радіаційні технології для медицини;
- радіаційні технології напівпровідників;
- радіаційні технології для харчової промисловості;
- радіаційні технології для промислової індустрії.

Уже в 60-х роках було створено ряд оригінальних прикладних технологій.

У доповіді наведено розробки 60 - 90-х років методів нейтронної терапії та оригінальних методів селекції зернових на У-120, розробки тритієвих аеропонних генераторів та досвід їх випробування на Семиполковській птахофабриці і інших промислових підприємствах, прикладні дослідження з радіаційного легування кремнію для виробництва силових вентилів тягових підстанцій та розробки технологій радофармізотопів на У-240, радіаційні технології безвідходної перероби гідробіонтів в обсязі Національної морської програми України. Розглядається сучасні етап досліджень і розробок радіаційних технологій в індустрії комбікормів для тваринництва, пікохвильові технології пастеризації харчових продуктів, нові типи ядерних наномембран, оригінальні радіаційні технології нових матеріалів (гума, бетон, асфальт).

КОНФИГУРАЦИОННЫЕ ПЕРЕХОДЫ ДИВАКАНСИЙ В КРЕМНИИ И ГЕРМАНИИ

А. П. Долголенко

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

Облучение ядерными частицами является эффективным методом исследования в физике твердого тела. К настоящему времени стала очевидна необходимость уточнения электронных уровней дивакансии в запрещенной зоне

кремния. Высокоомные образцы p , p - Si , выращенные методом бестигельной зонной плавки были облучены быстрыми нейтронами реактора при $T = 320$ К. Измерение проводимости и постоянной Холла были выполнены методом Van der Pauw до и после изохронного отжига в температурном интервале $(150 \div 600)$ °С в течении 30 - 60 мин. Теоретический расчет энергетического положения в запрещенной зоне кремния радиационных дефектов и их концентраций выполнен обычным методом [1]. Результаты эксперимента и расчетные кривые после некоторых температур изохронного отжига представлены на рисунках. В области температур $(230 \div 250)$ К дивакансии меняют конфигурацию: экспериментальные значения лежат выше теоретической кривой. Дырки не успели захватиться на уровень $E_V + 0.365$, а на уровень $E_V + 0.21$ эВ еще рано. При малых флюенсах облучения высокоомного кремния дивакансии после изохронного отжига $(200 - 325)$ °С переходят из первой во вторую конфигурацию даже при комнатной температуре. Приведены примеры конфигурационных переходов не только в кремнии, но и в $Si_{0.5}Ge_{0.5}$ [2]. Так медленные центры с активационным сечением захвата электрона на уровень $E_c - 0.17$ эВ является конфигурационным переходом дивакансии с уровня $E_c - 0.261$ эВ. Отсутствие непрерывности, когда $V_2(-/0)$ в $SiGe$ после пересечения середины запрещенной зоны, наблюдался разрыв $\sim 0,07$ эВ как раз и связан с конфигурационным переходом дивакансии из Q_1 конфигурации в Q_2 .

Энергетическое положение уровней дивакансии в различном зарядовом состоянии в кремнии в зависимости от атомной конфигурации

Атомная конфигурация	$E_c - E_a$, эВ		$E_V + E_d$, эВ		ΔE , эВ
	$=/-$	$-/0$	$0/+$	$0/0$	
D_{3d}	0.261	0.426	0.365	0.53	0.165
C_{2h}	0.17	0.42	0.20	0.45	0.25

Нейтральный уровень дивакансии $E_V + 0.45$ эВ во второй конфигурационной яме подвержен реакции перезарядки $VV^0 \rightarrow VV^- + VV^+$, т.е. выступает как обычный рекомбинационный центр, который при температуре выше комнатной захватывает электроны, а ниже - дырки. Уровни различных зарядовых состояний дивакансии в кремнии в зависимости от конфигурации Q_1 и Q_2 представлены в таблице. Расчет методом молекулярных орбиталей [3] полностью подтвердил представление о двухъямном потенциале дивакансии в кремнии в нейтральном и заряженных состояниях. Рост концентрации дырок в валентной зоне кремни при отжиге связан с акцепторным уровнем, возможно, с гексовакансией [4].

1. *Dolgolenko A.P.* // Phys. Stat. Sol. (a). - 2000. - Vol. 179. - P. 179.
2. *Larsen A. Nylandsted, Hansen A. Bro, Mesli A.* // Mater. Sci. Eng. - 2008. - Vol. B154 - 155. - P. 85 - 89.
3. *Моливер С.С.* // ФТТ. - 1999. - Т. 44(3). - С. 404.
4. *Долголенко А.П.* // ВАНТ. - 2012. - Т. 5(81). - С. 13 - 20.

ЭЛЕКТРОННЫЕ УРОВНИ КОНФИГУРАЦИЙ ДИВАКАНСИЙ В ГЕРМАНИИ

А. П. Долголенко

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

Облучение ядерными частицами является эффективным методом исследования в физике твердого тела. К настоящему времени стала очевидна необходимость уточнения электронных уровней дивакансии в запрещенной зоне не только в кремнии, но и в германии. Расчет методом молекулярных орбиталей [1] полностью подтвердил представление о двухъямном потенциале дивакансии в кремнии в нейтральном и заряженных состояниях. Известно, что при больших дозах облучения быстрыми нейтронами реактора уровень Ферми близок к середине запрещенной зоны кремния и расположен на нейтральном уровне дивакансий в первой конфигурации с сильной дисторсией [2]. Облучение монокристаллического германия р-типа большими дозами γ -квантов ^{60}Co и быстрыми нейтронами реакторного спектра показало, что предельное положение уровня Ферми изменилось от $\sim E_v + 0.24$ эВ до $E_v + 0.125$ эВ соответственно. Получение толстослойных релаксированных кристаллов $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ [3] позволило определить энергетические уровни дивакансий и других дефектов в запрещенной зоне в зависимости от концентрации Ge в Si n-, p-типа. В работе [4] экспериментально показано, что с увеличением концентрации германия в кремнии уровни радиационных дефектов как акцепторные так и донорные понижают свою энергию в запрещенной зоне (ΔE). Энергия Hubbard между уровнями дивакансии $V_2(=/-)$ и $V_2(-/0)$ при увеличении концентрации германия в кремнии сохраняется ≈ 0.2 эВ. Дивакансия в отрицательно-заряженном состоянии в верхней половине запрещенной зоны $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x < 0.25$) привлекательна для захвата электрона, а в нижней половине запрещенной зоны ($x > 0.25$) привлекательна для захвата дырки. Наблюдалось отсутствие непрерывности ~ 0.07 эВ в положении $V_2(-/0)$ уровня дивакансии, когда он пересекает середину запрещенной зоны. Наблюдаемый разрыв ~ 0.07 эВ как раз и связан с конфигурационным переходом дивакансии из Q_1 конфигурации в Q_2 . Зная положение уровней радиационных дефектов в запрещенной зоне в $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x = 0.5$) были определены их положения в германии. Из таблицы видно, что у радиационных дефектов в Ge отсутствуют донорные уровни, а энергия Hubbard у дефектов такая же как и в Si. Уровень дивакансии $V_2(-/0)$ в Q_1 конфигурации $E_v + 0.085$ эВ определяет концентрацию дырок в валентной зоне p-Ge $2.2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и положение уровня Ферми $E_v + 0.125$ эВ в кластерах дефектов, созданных быстрыми нейтронами в Ge. Концентрация дефектов $\sim 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в кластерах образуют примесную зону около валентной зоны шириной 0,08 эВ.

К настоящему времени стала очевидна необходимость экспериментально уточнить электронные уровни дивакансий, А – центров, Е – центров в запрещенной зоне германия.

$V_2(Q_1)$, эВ	$V_2(Q_2)$, эВ	PV, эВ	VO ₁ , эВ	VOI _{Ссв} , эВ	I _{Ссв} , эВ	I _{Хсв} , эВ	V, эВ	Зарядовое состояние
Ev+0.25	Ec-0.30	Ec-0.37			Ev+0.13	Ec-0.30	Ec-0.27	≠/-
Ev+0.085	Ev+0.11	Ev+0.10	Ec-0.20	Ec-0.23		Ev+0.20	Ev+0.06	-/0
0.17	0.13	0.105	0.025	0.025	0.18*	0.15*	0.18*	ΔE, эВ
0.165	0.25	0.195				0.165	0.33	E _н , эВ

* отсутствуют надежные значения.

1. *Моливер С.С.* // ФТТ. - 1999. - Т. 44(3). - С. 404.
2. *Долголенко А.П.* // ВАНТ. - 2012. - Т. 5(81). - С. 13 - 20.
3. *Larsen Arne Nylandsted, Mesli Abdelmadjid* // Physica. - 2007. - Vol. B401 - 402. - P. 85 - 90.
4. *Larsen A. Nylandsted, Hansen A. Bro, Mesli A.* // Mater. Sci. Eng. - 2008. - Vol. B154 - 155. - P. 85 - 89.

НОВІ ЯДЕРНІ МЕМБРАНИ

**А. Є. Борзаковський¹, К. Г. Гусакова², А. Г. Зелінський¹,
В. І. Сахно¹, О. М. Файнлейб²**

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

² Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України, Київ

Обговорюється створена фахівцями НАН України (ІЯД та ІХВМС) технологія наноматеріалів для ядерних мембран нового покоління. Такі мембрани створені на основі новітніх полімерних сполук, розроблених в Україні і захищених патентами. Технічні характеристики цих органічних матеріалів суттєво перевищують попередні покоління мембран (лавсан, тефлон) і дозволяють створювати промислові та побутові мікрофільтруючі системи підвищеної надійності. Технології виготовлення мембран базуються на традиційних трекових методах формування нанодефектів, їх сенсibiliзації та хімічному травленні. Але, на відміну від попередніх методів опромінювання важкими іонами чи осколками поділу трансуранових елементів, використовуються більш доступні види радіаційної обробки.

Обговорюється розроблена і випробувана радіаційна технологія наномембран, за якою для утворення треків поліціануритові плівки завтовшки 30 - 50 мкм опромінюються α-частинками 12 МеВ на циклотроні У-120, а сенсibiliзація опромінених зразків здійснюється гальмівними гама-квантами з широким енергетичним спектром. Нова технологія створює перспективу успіш-

ного подальшого виробництва наномембран на існуючій в ІЯД НАН України та ІХВМС НАН України технічній базі і не потребуватиме залучення дорогих і відносно дефіцитних джерел важких іонів.

Обговорюються результати випробувань нової технології та отримані характеристики ядерних наномембран з поліціануритів.