

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Романовський Сергій Костянтинович

УДК 535.376; 535.8; 539.1.043; 536.521

**ОПТИЧНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ
РАДІАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ
НА ПРИСКОРЮВАЧАХ ЕЛЕКТРОНІВ**

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків–2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному науковому центрі “Харківський фізико-технічний інститут” НАН України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Уваров В'ячеслав Лаврентійович
Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, НДК «Прискорювач», начальник лабораторії.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Лазурик Валентин Тимофійович
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, декан факультету комп'ютерних наук;

кандидат фізико-математичних наук,
доктор технічних наук
Прохоренко Євген Михайлович
Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України, провідний науковий співробітник.

Захист відбудеться “11” березня 2021 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.04 Харківського національного університету радіоелектроніки, за адресою: 61166, м.Харків, пр. Науки, 14

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14 і на сайті спеціалізованої вченої ради Д64.052.04 за посиланням: <https://nure.ua/branch/d-64-052-04>.

Автореферат розісланий “4” лютого 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Є.М.Одаренко

АГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

На даний час у світі стало зростає обсяг продукції, процес виробництва якої на будь-якому етапі включає дію іонізуючим випроміненням. Метою радіаційної обробки може бути модифікація матеріалів для надання їм нових властивостей (збільшення швидкодії напівпровідників, радіаційне зшивання / деструкція полімерів і т.і.), а також стерилізація виробів медичного призначення, продукції і сировини фармацевтичної та харчової промисловості.

Найбільш ефективно радіаційна стерилізація реалізується на прискорювачах електронів з енергією до 10 MeV. Цей вид обробки відноситься до технологічних процесів високого ступеня відповідальності, що регламентуються низкою національних та міжнародних нормативних документів. При цьому не обмовляється конкретна структура та виконання системи контролю параметрів обробки. Може бути використана будь-яка надійна система, яка повністю відстежує та контролює критичні параметри процесу. Такими параметрами є енергія електронів, струм пучка, ширина потоку електронів на поверхні об'єкту, що оброблюється, швидкість його переміщення через зону опромінювання, а також поглинута доза.

Найбільш прийнятним варіантом є створення системи *on-line* моніторингу таких параметрів на основі не впливових методів вимірювання. *On-line* моніторинг критичних параметрів радіаційної обробки створює також кількісну базу для застосування обчислювальних методів оперативного визначення об'ємного розподілу поглинутої дози та оптимізації режиму обробки з урахуванням характеристик оброблюваного вантажу. У цій області активно працювали Кольчужкін А.М., Лазурик В.Т., Kovach A., Mehta K., Miller A., Zimek Z., Tabata T. та ін.

При проведенні радіаційно-технологічних процесів особливе значення має визначення поглинутої дози. Зазвичай прямі вимірювання дози виконуються в *off-line* режимі з використанням одноразових хімічних дозиметрів. Оскільки обсяги оброблюваної продукції вимірюються тисячами ящиків за зміну особливої актуальності набуває розробка *on-line* методів технологічної дозиметрії. Точність таких методів можна забезпечувати шляхом використання референтних дозиметричних систем, що підтримують простежуваність вимірювань до Національних стандартів поглинутої дози.

Основний обсяг робіт у галузі радіаційної обробки продукції пов'язаний з дією випромінення на аморфні діелектрики. До них, зокрема, відноситься картон, з якого виготовляють транспортну тару для більшості видів продукції, а також низка полімерів (поліпропілен, поліетилен, полістирол, фторопласти і ін.). Взаємодія прискорених електронів з такими середовищами супроводжується оптичним випромінюванням, природа якого та закономірності недостатньо вивчені, в зв'язку з чим обмежені можливості практичного використання цього явища.

Ще однією сферою застосування високоенергетичного електронного випромінювання є радіаційні випробування зразків продукції та матеріалів. Такі роботи виконуються на стадії відпрацювання нової технології, для вибору

та оптимізації режиму обробки або для дослідження стійкості виробів, призначених для роботи в умовах високих рівнів радіації. Перспективним напрямком, що активно розвивається в останні роки, є дослідження матеріалів ядерних реакторів, охолоджуваних водою в надкритичному стані. Особливістю умов проведення таких досліджень є поєднання великої потужності випромінювання та високої температури зразка, на який воно діє. Традиційно дистанційне вимірювання температури в таких умовах проводиться за допомогою термопар. Разом з тим, такі вимірювання надають дані тільки про локальні значення температури. Крім того, в області великих значень доз результат вимірювань може спотворюватися. Аналіз теплового випромінювання зразка в процесі його радіаційних випробувань з використанням пучка прискорених електронів забезпечує можливість контролю температури одночасно на всій області взаємодії випромінювання із матеріалом.

У зв'язку з викладеним вище існує необхідність у дослідженні основних характеристик оптичного випромінювання, що супроводжує дію прискореними електронами на технічні матеріали, в тому числі, на аморфні діелектрики, а також теплового випромінювання зразків матеріалів в процесі їх радіаційних випробувань з використанням потужних пучків електронів. Такі дослідження забезпечують можливість розвитку нових методів та засобів дистанційного моніторингу критичних параметрів радіаційних процесів з метою їх імплементації в системи контролю технологічних та дослідницьких установок з прискорювачами електронів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Ця дисертаційна робота виконана в Національному науковому центрі "Харківський фізико-технічний інститут". Тема, якій присвячена дисертація, пов'язана з програмами досліджень, у виконанні яких автор узяв безпосередню участь:

1. Був виконавцем програм з атомної науки і техніки (АНТ):

Формування, прискорення потужних і високояскравих потоків електронів та дослідження ядерно-фізичних процесів при взаємодії прискорених частинок з речовиною.

Шифр роботи – III-1-06 (НДК «Прискорювач») 2006-2010 р.

Розробка нових та модернізація існуючих лінійних прискорювачів та розвиток радіаційних і ядерних технологій для медицини та промисловості.

Шифр роботи – III-1-11 (НДК «Прискорювач») 2011-2015 р.

Дослідження методів формування і прискорення пучків заряджених частинок та радіаційних і ядерних процесів при взаємодії заряджених частинок з речовиною та структурами.

Шифр роботи – III-1-16 (НДК «Прискорювач») 2016-2020 р.

2. Брав участь у виконанні науково-дослідної роботи:

Розробка камери опромінювання для дослідження корозії матеріалів у надкритичній водній конвекційній петлі під навантаженням та її тестування на стенді.

Шифр теми ЦВ-2-35 від 08.2018р., етап 2, кінцевий.

Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є визначення фізичної природи і закономірностей оптичного випромінення, що супроводжує дію прискореними електронами на технічні матеріали, в тому числі, аморфні діелектрики, а також теплового випромінення зразків матеріалів у процесі їх радіаційних випробувань і розробка на цій основі оптичних *on-line* методів і засобів визначення поглинутої дози, а також температури на поверхні об'єктів, що піддаються дії високоенергетичного пучка електронів великої потужності в умовах промислової обробки та радіаційних випробувань.

Для досягнення цієї мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- проаналізувати фізичні процеси, що відбуваються в аморфних діелектриках під дією високоенергетичного імпульсного електронного випромінення та визначають вихід катодоліюмінісценції (КЛ);
- дослідити та визначити умови застосування сигналу КЛ для діагностики режиму обробки технічних матеріалів пучком електронів;
- розробити і створити набір апаратних засобів для дистанційної реєстрації КЛ, наведеної імпульсним пучком електронів мікросекундного діапазону, включаючи оптичний та електричний тракти;
- провести експериментальне дослідження кінетики КЛ для ряду поширених технічних матеріалів;
- провести експериментальне дослідження залежності інтенсивності сигналу люмінесценції від струму пучка, енергії електронів і товщини КЛ радіатора;
- дослідити та встановити зв'язок розподілу інтенсивності КЛ на поверхні оброблюваного об'єкта з профілем поглинутої дози;
- дослідити можливі напрямки створення КЛ радіаторів з підвищеною радіаційною стійкістю;
- розробити та виготовити систему дистанційного *on-line* контролю розподілу температури зразка, що нагрівається прискореними електронами, на основі аналізу його теплового випромінення.

Об'єкт дослідження - оптичне випромінення, що супроводжує дію на об'єкти пучком електронів в умовах радіаційних технологій та випробувань.

Предмет дослідження - процеси та закономірності формування люмінесцентного та теплового випромінення, індукованого високоенергетичним імпульсним пучком електронів, та їх реєстрація.

Основними методами вирішення поставлених завдань є:

- методи математичної фізики для аналізу закономірностей формування КЛ сигналу в аморфному діелектрику;
- комп'ютерне моделювання методом Монте-Карло (МК) процесів взаємодії електронного випромінення з речовиною;

методи геометричної оптики для розрахунку тракту дистанційної реєстрації оптичного випромінення, що збуджується пучком електронів;
методи оптичних вимірювань для реєстрації сигналів КЛ і теплового випромінення малої інтенсивності;
методи цифрової обробки зображень;
методи математичної статистики та обробки експериментальних даних.

Наукова новизна отриманих результатів. При виконанні дисертаційної роботи вперше одержані наступні результати:

- отримано аналітичні вирази для опису механізмів випромінення, а також умов застосування сигналу КЛ для діагностики режиму радіаційної обробки технічних діелектричних матеріалів;
- встановлена та експериментально підтверджена лінійна залежність між інтенсивністю сигналу КЛ і величиною потужності поглинутої дози електронного випромінення для ряду поширених технічних матеріалів;
- розроблений метод *on-line* контролю розподілу щільності потоку високоенергетичних електронів і потужності поглинутої дози на поверхні оброблюваного об'єкта;
- отримані в *on-line* режимі дані щодо розподілу температури в мішеневому пристрої стенду, що створений на базі прискорювача електронів великої потужності для імітації умов ядерного реактора з охолодженням водою у надкритичному стані.

Практичне значення одержаних результатів.

Проведений у роботі комплекс досліджень сприяє більш глибокому розумінню процесів генерації оптичного випромінення, що супроводжує дію високоенергетичних електронів на технічні матеріали, зокрема, аморфні діелектрики та метали. Найбільше значення для практики мають наступні результати дисертаційної роботи:

- Досліджено механізм і основні закономірності генерації оптичного випромінення при дії високоенергетичного імпульсного пучка електронів мікросекундного діапазону на аморфні діелектрики, в тому числі матеріали, які використовуються в радіаційних технологіях.
- Показана можливість і запропоновані технічні рішення щодо створення апаратного комплексу з використанням сигналу КЛ для безконтактної *on-line* діагностики режиму радіаційної обробки, зокрема стерилізації продукції на прискорювачі електронів.
- Розроблено та впроваджено приладовий комплекс для дистанційного *on-line* вимірювання температури зразків матеріалів під дією потоку електронів високої потужності в умовах, що відповідають характеристикам перспективного ядерного реактора з охолодженням водою в надкритичному стані.

Особистий внесок здобувача.

Всі оригінальні результати, наведені в дисертації отримані особисто автором. Дисертантом особисто розроблена апаратура для підготовки та проведення експериментів. Розробка методик проведення експериментів,

аналіз механізмів формування сигналу люмінесценції та обговорення результатів експериментів проведені спільно з науковим керівником. В роботах [1,7-9] автором досліджено розроблену систему візуалізації взаємодії прискорених електронів з діелектриками. В роботах [3,5] автор дослідив умови застосування сигналу КЛ для діагностики режиму радіаційної обробки. В роботах [4,6,11,13,14] дисертант дослідив та встановив зв'язок розподілу інтенсивності КЛ на поверхні оброблюваного об'єкту з профілем поглинутої дози. В роботах [2,10,15] автор безпосередньо приймав участь у реєстрації теплового випромінювання при проведенні радіаційних випробувань матеріалів ядерних реакторів та обробці отриманих результатів.

Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів забезпечується:

- зіставленням та узгодженням результатів, отриманих з використанням різних методів дослідження;
- використанням сертифікованих методів вимірювань;
- використанням засобів виміральної техніки, які пройшли держперевірку і калібрування;
- калібруванням робочих дозиметричних систем за допомогою референтних дозиметрів;
- публікаціями основних результатів роботи в рецензованих виданнях (фахових виданнях);
- апробацією результатів роботи на профільних міжнародних конференціях та семінарах.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи докладались і одержали позитивну оцінку на наступних міжнародних конференціях та семінарах:

XXI Міжнародний семінар з прискорювачів заряджених частинок (Алушта, Україна, 2009); XXII Міжнародний семінар з прискорювачів заряджених частинок (Алушта, Україна, 2011); XI міжнародна конференція з фізики високих енергій, ядерної фізики та прискорювачів (Харків, березень 2013); XXIII Міжнародний семінар з прискорювачів заряджених частинок (Алушта, Україна, 2013); XXIV Міжнародний семінар з прискорювачів заряджених частинок (Харків, Україна, 2015); XIV міжнародна конференція з фізики високих енергій, ядерної фізики та прискорювачів (Харків, березень 2016); XV міжнародна конференція з фізики високих енергій, ядерної фізики та прискорювачів (Харків, березень 2017); XVI міжнародна конференція з фізики високих енергій, ядерної фізики та прискорювачів (Харків, березень 2018); XXVI Міжнародний семінар з прискорювачів заряджених частинок (Харків, Україна, 2019).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані в 15 роботах, 6 з них у наукових журналах, 9 – у матеріалах і тезах доповідей на науково-технічних конференціях та семінарах. Із зазначених робіт відповідають вимогам ВАК України до публікацій 6 статей у наукових журналах [1-6] (серед них 5 реферовано в наукометричній базі Scopus).

Структура та об'єм дисертації. Дисертація містить вступ, п'ять розділів основного тексту, висновки та список використаних джерел. Повний об'єм дисертації - 144 сторінки, у тому числі 65 рисунків, 6 таблиць та список використаних джерел з 85 найменувань на 8 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність досліджень за темою дисертації, приведений зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами, сформульовані мета і задачі дослідження, наукова новизна та практичне значення отриманих результатів і особистий внесок здобувача, відомості про апробацію та публікації, описано структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У **першому розділі** проведено огляд видів катодолюмінісценції та особливостей її застосування в діагностиці пучків, космічних дослідженнях і в твердотільній дозиметрії. Розглянуто методи контролю режимів обробки, що застосовуються на промислових прискорювачах електронів, включаючи промислову дозиметрію та пірометрію об'єктів, що нагріваються пучком високоенергетичних електронів. Літературний огляд показав, що електромагнітне випромінювання тіл, що опромінюються пучком електронів, як рівноважне (теплове), так і нерівноважне (люмінесценція) несе в собі інформацію, яку можна використовувати в діагностиці радіаційно-технологічних процесів. Основною перевагою такого підходу є можливість контролю критичних параметрів радіаційних технологій в режимі реального часу. Це не виключає вживаних в даний час інших працюючих *on-line* та *off-line* методів контролю, а створює можливість підвищення якості радіаційної обробки продукції.

У **другому розділі** розглянуті механізми некогерентної КЛ аморфних діелектриків під впливом прискорених електронів. Оптичне випромінювання, що утворюється при цьому, обумовлено взаємодією наведених опроміненням носіїв заряду в зоні провідності з пастками електронів. Схематично ці процеси можна представити у вигляді, показаному на рис.1.

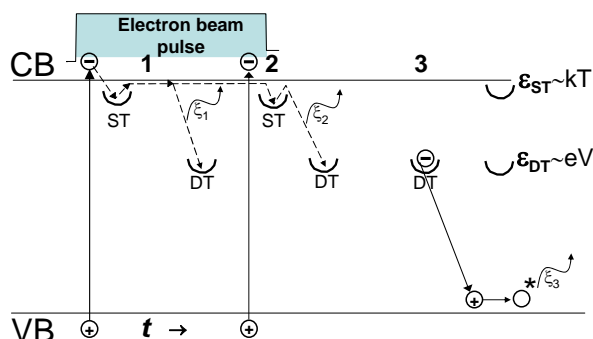


Рис.1. Механізми КЛ в аморфних діелектриках

Як видно з рис.1, КЛ діелектрика в оптичній області може відбуватися за такими основними сценаріями:

1 - в результаті переходу квазівільних електронів на глибокі пастки безпосередньо в процесі опромінення (миттєвий компонент КЛ);

2 - внаслідок термічно індукованого переходу в зону провідності

електронів, що збереглися на дрібних пастках після завершення опромінення, з подальшим їх захопленням на глибокі пастки (затриманий компонент КЛ);

3 - в результаті випромінювальної рекомбінації електронів, локалізованих на глибоких пастках, з позитивно зарядженими центрами.

Миттєвий компонент КЛ, в основному, визначає таке явище як флуоресценція. Затриманий компонент КЛ, як правило, пов'язують з фосфоресценцією.

Величина пов'язаного з першим механізмом потоку оптичних фотонів, приведена до одиниці об'єму, області взаємодії пучка електронів з діелектриком, ξ_1 , визначається швидкістю заповнення глибоких пасток електронами безпосередньо із зони провідності.

$$\xi_1 = \frac{dn_{DT}}{dt}, \quad (1)$$

де n_{DT} – концентрація електронів на таких пастках, t – час опромінення.

При проведенні радіаційно-технологічних процесів використовують прискорювачі електронів, що працюють в імпульсному режимі при тривалості імпульсу $10^{-6} - 10^{-5}$ с, енергії частинок до 10 МеВ і середньої потужності пучка десятки кВт. Необхідна доза обробки продукції зазвичай становить десятки кГр, звідки час впливу випромінювання становить \sim с. На цей період локалізовані на глибоких пастках електрони можна вважати «замороженими». Крім того, в цій області доз впливом радіаційних дефектів на електрофізичні характеристики матеріалу, а отже вихід КЛ, можна знехтувати. Тоді залежність концентрації вакантних глибоких пасток від часу опромінення можна представити у вигляді

$$N_{DT}(t) = N_{DT}^0 - n_{DT}(t), \quad (2)$$

де N_{DT}^0 - вихідна концентрація глибоких пасток.

Слід зазначити, що в рамках даної моделі величина n_{DT} збігається з наведеним флюенсом фотонів миттєвого компонента КЛ, Φ_{ph}^1 .

Концентрація електронів в зоні провідності n_{CB} в процесі опромінення діелектрика визначається виразом

$$n_{CB} = \frac{\sigma_{rs}}{e\mu_0}, \quad (3)$$

де e – заряд електрона, μ_0 – мікроскопічна рухливість електронів, σ_{rs} – радіаційна провідність (РП) діелектрика. За відсутності сильного електричного поля її величина визначається виразом

$$\sigma_{rs}^0 = K\dot{D}, \quad (4)$$

де K - так званий коефіцієнт миттєвого компонента РП, \dot{D} - потужність поглиненої дози.

У разі тонкої мішені потужність поглиненої дози буде визначатися виразом

$$\dot{D} = \dot{\Phi}_e \frac{dE_e}{dz}, \quad (5)$$

де $\dot{\Phi}_e$ – щільність потоку електронів, $\frac{dE_e}{dz}$ – середні іонізаційні втрати енергії електронів E_e на масову одиницю довжини їх пробігу в матеріалі.

Як правило, в процесі обробки продукції параметри пучка підтримуються постійними. Для забезпечення необхідного значення поглиненої дози оброблювані об'єкти за допомогою конвеєра переміщуються через зону опромінення із заданою швидкістю, змінюючи таким чином, час впливу випромінювання. Крім швидкості конвеєра та енергії електронів, одним з критичних параметрів процесу є розподіл щільності потоку електронів на поверхні об'єкту $\dot{\Phi}_e$.

Практично будь-який діелектричний матеріал, що обробляється пучком електронів, можна розглядати як люмінесцентний радіатор. Наприклад, цю властивість має целюлоза - природний полімер, який є основою такого широко поширеного пакувального матеріалу як картон.

В ході експериментів було показано, що при опроміненні поширених технічних матеріалів (полістирол, поліпропілен, картон та ін.) в умовах, відповідних технологічних процесів, сигнал КЛ практично збігається з імпульсом пучка, тобто затриманий компонент випромінювання проявляється слабо.

Звідси випливає, що інформацію про потужність поглиненої дози несе сигнал флуоресценції ξ_1 , який супроводжує імпульс пучка, затриманий компонент випромінювання $\xi_2 + \xi_3$, є фоновим. Отже, точність відтворення поглиненої дози за величиною потоку КЛ визначається співвідношенням амплітуд сигналів $\xi_1 / (\xi_2 + \xi_3)$.

Якщо тривалість імпульсу пучка τ_p задовольняє умові

$$\tau_p \ll \frac{N_{DT}}{n_{CB}} \tau_{CB}, \quad (6)$$

де N_{DT} – концентрація вакантних глибоких пасток, n_{CB} – концентрація електронів в зоні провідності, τ_{CB} – час життя квазівільних електронів в зоні провідності до захоплення на глибоку пастку,

то інтенсивність швидкого компонента люмінесценції виявляється пропорційною потужності дози \dot{D} (щільності потоку електронів $\dot{\Phi}_e$) на поверхні об'єкту, що опромінюється. У свою чергу, величина $\dot{D} t$ відповідає поглиненій дозі D в матеріалі. При виконанні умови

$$g \rho D \ll N_{DT}^0, \quad (7)$$

де g – радіаційно-хімічний вихід носіїв заряду, ρ - щільність матеріалу, N_{DT}^0 - вихідна концентрація глибоких пасток, доза може бути визначена за величиною флюенсу швидкого компонента КЛ Φ_{ph}^1 .

Виконання умов (6) та (7) дозволяє за інтенсивністю КЛ визначати в *on-line* режимі розподіл щільності струму сканованого пучка, а також потужність та величину поглиненої дози на поверхні об'єкта, що опромінюється. Разом з тим, при використанні сигналу катодолюмінісценції для діагностики режиму опромінення необхідне попереднє калібрування вимірювального каналу з урахуванням особливостей матеріалу, що використовується в якості радіатора люмінесценції. Чутливість такого вимірювального каналу можна регулювати як вибором матеріалу люмінесцентного радіатора, так і зміною його оптичної товщини.

Розділ 3 присвячений експериментальному дослідженню КЛ, збудженої імпульсним пучком електронів. Лінійні прискорювачі електронів з енергією близько 10 MeV працюють, як правило, в імпульсному режимі з частотою посилок близько 200-300 Гц. Тривалість імпульсу при цьому становить 3-4 мкс з тривалістю фронту та спаду близько 100-200 нс.

Особливістю реєстрації КЛ, збудженої пучком прискорювача електронів, є необхідність радіаційного захисту вимірювального пристрою, а також його екранування від електромагнітних завад. З урахуванням цих умов була розроблена схема вимірювань наведена на рис.2.

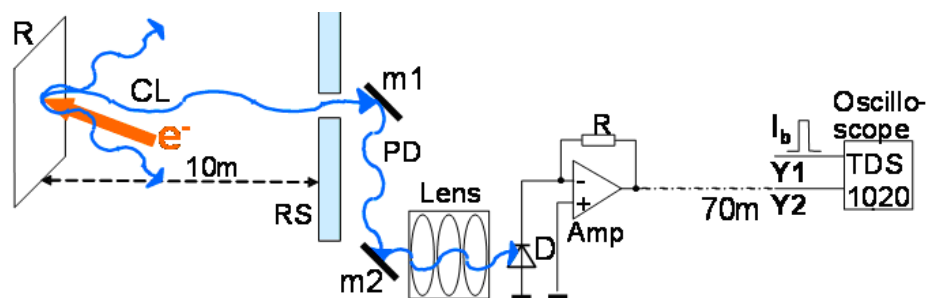


Рис.2. Схема реєстрації сигналу КЛ на прискорювачі ЛУ-10

На люмінесцентний радіатор **R**, показаний на схемі зліва, впливає спрямований пучок електронів, позначений помаранчевою стрілкою **e**. Катодолюмінісценція **CL**, що виникає при цьому, призводить до випускання фотонів, позначених синіми хвилястими стрілками.

Фотоприймач поміщається за радіаційним захистом **RS**, розташований на відстані 10 м від конвеєра. Для пропуску оптичного випромінювання в захисті було зроблено отвір, за яким розміщувався перископічний пристрій **PD**. Він складається з двох дзеркал **m1**, **m2**, які здійснюють паралельний перенос оптичної осі спостереження КЛ і служить для захисту апаратури від фонового іонізуючого випромінювання. Світловий потік з виходу **PD** за допомогою об'єктива **Lens** фокусується на чутливій поверхні фотоприймача **D** (pin-фотодіод).

Для посилення сигналу КЛ і передачі його в приміщення оператора був розроблений підсилювач **Amp** з використанням спеціалізованих ОУ фірми Analog Devices. В ході експериментів було досліджено кінетику КЛ для аморфних діелектриків з числа поширених технічних матеріалів. В якості

люмінесцентних радіаторів були випробувані полістирол товщиною 10 мм, а також система картон + поліпропілен (ПП) у вигляді стрічки товщиною 32 мкм, покладеної в n шарів. На рис.3 наведено характерні осцилограми сигналу КЛ для кожного виду радіатора (нижня розгортка).



Рис.3. Осцилограми сигналів КЛ, збудженої імпульсним пучком електронів у полістиролі (а) та системі картон+ПП (б).

Верхня розгортка відповідає сигналу струму пучка. Видно, що в межах похибки умов реєстрації обидва сигнали практично збігаються. Це дозволяє зробити висновок, що миттєвий компонент КЛ для обох матеріалів значно переважає над затриманим компонентом. При цьому амплітуда сигналу на виході фотоелектричного перетворювача, що збуджується КЛ, прямо пропорційна величині потужності поглиненої дози на поверхні радіатора.

На рис.4 наведена залежність амплітуди сигналу КЛ від товщини ПП плівки. Видно, що в діапазоні товщини від 32 мкм до 320 мкм (тобто при числі шарів ПП від 1 до 10) залежність лінійна.

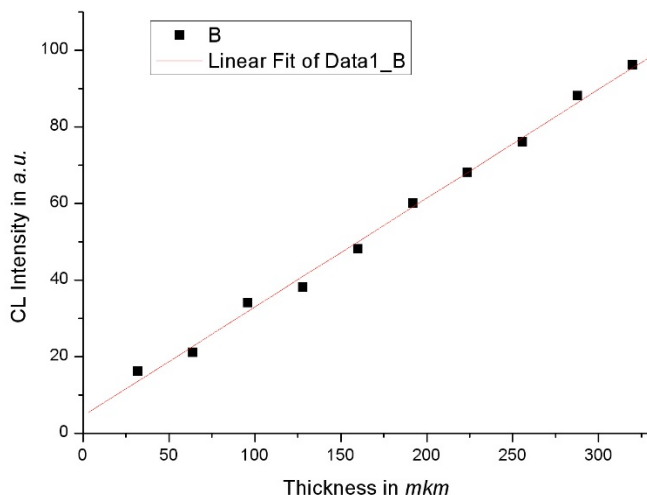


Рис.4. Залежність інтенсивності КЛ (CL Intensity) в відн. од. від товщини (Thickness) радіатора з ПП в мкм (датчик – матриця фотокамери)

Для дослідження залежності інтенсивності КЛ від енергії та середнього струму пучка радіатор з картону та ПП з нанесеними на ньому маркером масштабними мітками переміщався через зону дії сканованого пучка електронів за допомогою конвеєра. Зйомка проводилася з використанням цифрової дзеркальної фотокамери (ЦДФК) Canon. Отримані дані представлені на рис.5.

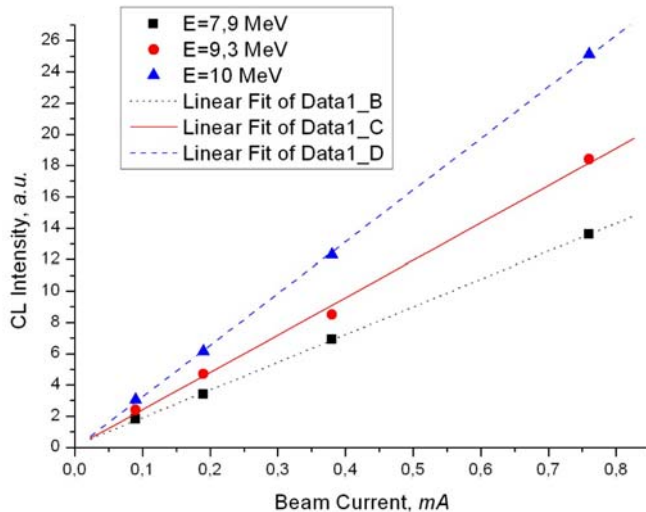


Рис.5. Залежність інтенсивності КЛ (CL Intensity) в відн.од. від середнього току пучка (Beam Current) для трьох різних енергій електронів в системі картон + ПП

Видно, що ця залежність практично лінійна. На рис.6 показана залежність інтенсивності КЛ від енергії. Вона має нелінійний характер. Спостережуване зростання інтенсивності КЛ можна пояснити збільшенням щільності струму пучка на поверхні мішені за рахунок зменшення його поперечного розміру внаслідок зниження розсіювання електронів.

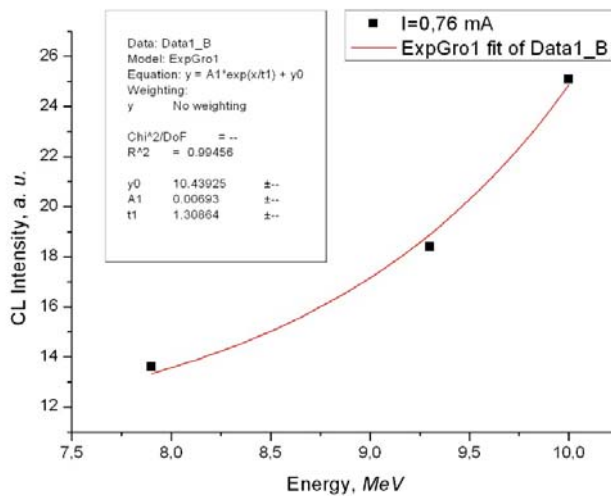


Рис.6. Залежність інтенсивності КЛ (CL Intensity) в відн.од. системи картон + ПП від енергії електронів (Energy)

Як впливає з моделі КЛ, щільність потоку фотонів флуоресценції пропорційна потужності поглиненої дози (див. формулу (5)). Таким чином, реєстрація сигналу КЛ на плоскому екрані (КЛ-радіаторі) розміром, що перевищує розміри потоку електронів і розміщеному нормально потоку, дозволяє отримувати інформацію про розподіл щільності потоку частинок в площині спостереження. На цьому ж радіаторі розміщувалася дозиметрична плівка ВЗ, яка після опромінення була оброблена за стандартною методикою. Отримані таким чином профіль поглинутої дози та профіль інтенсивності КЛ представлені на рис.7.

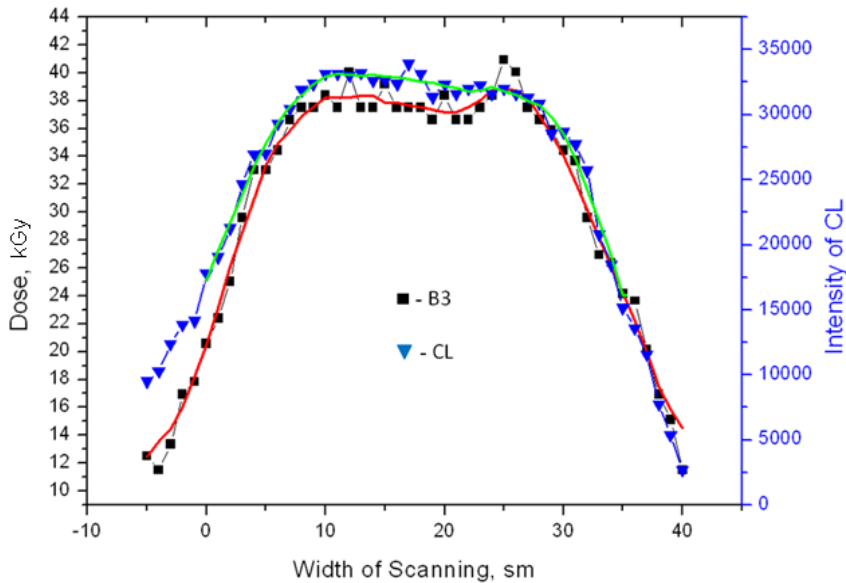


Рис.7. Профілі інтенсивності КЛ (червона лінія) та поглинутої дози (синя лінія) в системі картон + ПП. Горизонтальна вісь відповідає осі сканування пучка (Width of Scanning)

Видно, що обидві криві збігаються в межах похибки визначення поглиненої дози ($\pm 6\%$ для плівки ВЗ).

У *розділі 4* наведені результати дослідження можливості застосування КЛ для юстування вихідних пристроїв прискорювачів електронів.

Для забезпечення безперервного *on-line* моніторингу поглиненої дози в ННЦ ХФТІ розроблений метод, заснований на основі аналізу електронного випромінення за оброблюваним об'єктом. Зокрема, на прискорювачі ЛУ-10 використовують широкоапертурний стек-монітор для *on-line* контролю струму пучка, енергії електронів і середнього значення поглиненої дози в площині сканування пучка. Метод передбачає поглинання пластинами стек-монітора основної частини потоку електронів за задньою площиною об'єкта, що опромінюється. Це забезпечується розміщенням монітора строго симетрично відносно площини розгортки пучка та контролем розподілу потоку електронів на його поверхні. Для досягнення цієї мети був використаний КЛ аналіз. Попередня оцінка умов його застосування проводилася з використанням методу комп'ютерного моделювання на основі транспортного коду GEANT4, розробленого в CERN для симуляції проходження елементарних частинок крізь речовину за допомогою методу Монте-Карло.

Для експериментальних досліджень на поверхні СМ був розміщений радіатор у вигляді полотна з картону розміром 1200x850 мм. На радіаторі були нанесені горизонтальні масштабні лінії з кроком 50 мм, а також дві вертикальні лінії. Одна відповідала правому краю СМ, а інша його середині.

На рис.8 наведені результати порівняння розподілів потужності поглиненої дози, розрахованої за допомогою пакета GEANT, а також виміряної в експерименті інтенсивності КЛ уздовж горизонтальної осі СМ.

Видно, що результати, отримані обома методами, добре узгоджуються, що підтверджує точність юстування СМ в потоці електронів.

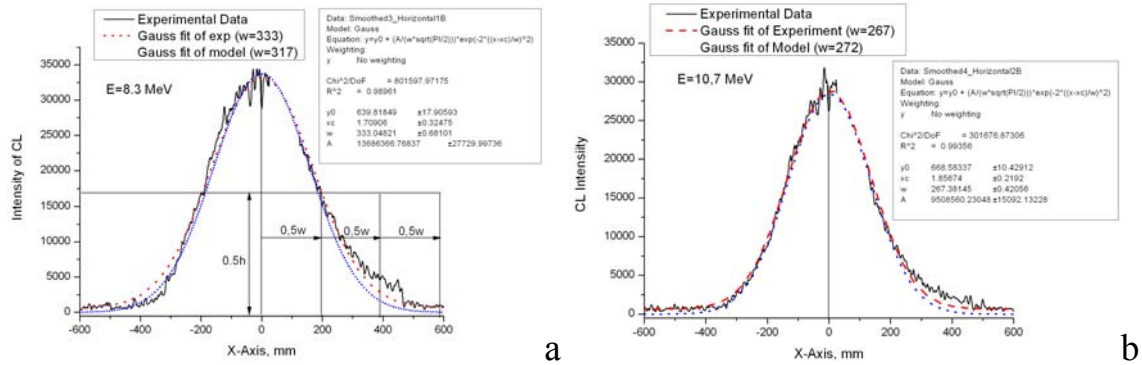


Рис.8. Порівняння розрахованого та виміряного розподілу інтенсивності КЛ (CL Intensity) в відн. од. та поглиненої дози для енергії електронів: a – 8,3 МэВ і b – 10,7 МэВ

Ширина розгорнутого пучка на поверхні оброблюваного об'єкта є одним з критичних параметрів радіаційної технології. Для перевірки відповідності ширини розгортки, що задається оператором, проводяться її періодичні контрольні заміри. На ділянці радіаційної обробки (ДРО) прискорювача ЛУ-10 після модернізації системи контролю було потрібне підстроювання системи контролю ширини розгортки пучка. Для цього був застосований КЛ метод. В процесі підстроювання проводилася зйомка цифровою дзеркальною фотокамерою (ЦДФК) області взаємодії пучка електронів з поверхнею люмінесцентного радіатора із картону з трьома шарами ПП плівки. Для отримання профілів розгорнутого пучка фотознімки були оцифровані в середовищі Origin. На 9 представлені профілі інтенсивності КЛ, відповідні різній ширині розгортки.

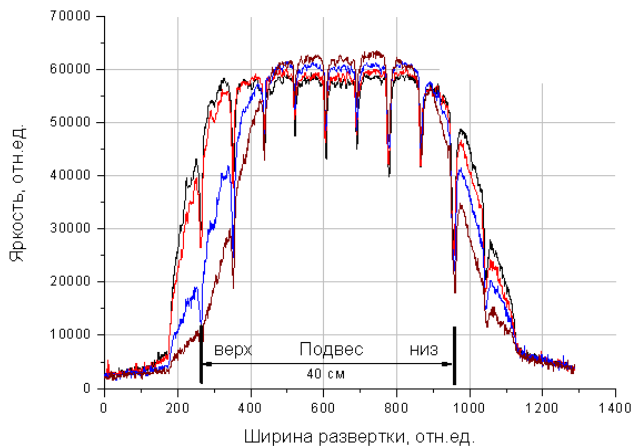


Рис.9. Профілі інтенсивності КЛ, збудженої в системі картон+ПП для різної ширини розгортки пучка (коричневий – 360 мм, блакитний – 420 мм, червоний – 480 мм, чорний – 500 мм).

Розділ 5 присвячений розробці та застосуванню пірометричної системи для дистанційного вимірювання температури радіаційно-оброблюваних об'єктів.

В останні роки набула особливої актуальності проблема підвищення ефективності атомних станцій, зокрема, за рахунок використання нових теплоносіїв. Одним з найбільш перспективних розглядається вода в надкритичному стані. При цьому виникають питання про швидкість корозії матеріалів, що контактують з подібним середовищем в умовах інтенсивних полів іонізуючого випромінювання. Виявилось, що такі дослідження зручно

проводити на потужнострумовому прискорювачі електронів. Його пучок забезпечує можливість одночасно набирати дозу в досліджуваному зразку, а також нагрівати до необхідної температури як його самого, так і воду, що циркулює в петлі.

Розроблена пірометрична система та методика безконтактного вимірювання температури були застосовані в ході експерименту по опроміненню спеціально розробленої в ХФТІ надкритичної водної конвекційної петлі (НВКП) з камерою опромінення, для проведення випробувань на прискорювачі ЛУ-10. НВКП дозволяє проводити корозійні тести потенційних конструктивних матеріалів реакторів IV покоління. Зразки в потоці води, що має температуру 350 ... 400 ° С, при тиску 23 ... 25 МПа, опромінюються електронним пучком 10 МеВ / 10 кВт.

Для забезпечення безперервного дистанційного контролю температури петлі була розроблена система, особливістю якої є використання в якості датчика теплового випромінювання матриці цифрової дзеркальної фотокамери. Система включає в себе дистанційно керовану фотокамеру, робочий спектр якої розширено в бік ближнього інфрачервоного діапазону, спеціально розроблений оптичний тракт, перетворювач інтерфейсу USB-TCP, лінію зв'язку і персональний комп'ютер з відповідним програмним забезпеченням.

Калібрування вимірювального каналу проводилося на стенді. Випробуваний зразок нагрівався електричним струмом, ступінь нагріву регулювалася автотрансформатором. Температура вимірювалася цифровим термометром «ТЕРА» з використанням термопари хромель-алюмель, закріпленої посередині зразка. Зразок був виготовлений з того ж матеріалу, який в подальшому призначався для випробувань на прискорювачі в складі петлі з надкритичною водою.

На рис.10 показана залежність зміни інтенсивності теплового випромінювання від температури зразка в діапазоні 340°C - 540°C.

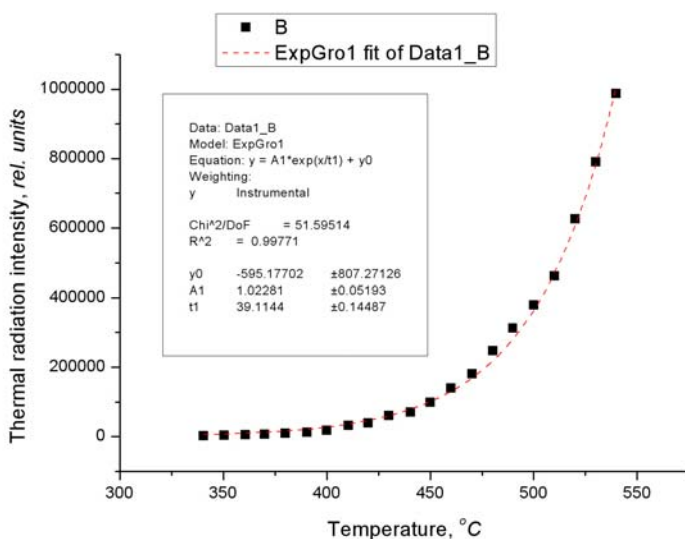


Рис.10. Залежність інтенсивності теплового випромінювання (Thermal radiation intensity) в відн.од. від температури.

Експеримент з опромінення надкритичної водяної петлі тривав понад 500 годин. В ході експерименту контролювалися тиск води, швидкість її потоки,

а також температура за допомогою 12 термопар, розміщених в різних точках петлі за межами прямого впливу потоку випромінювання.

У сталому температурному режимі після оцифровки знімку в середовищі Origin було визначено профіль температури на поверхні камери опромінення (див. Рис.11).

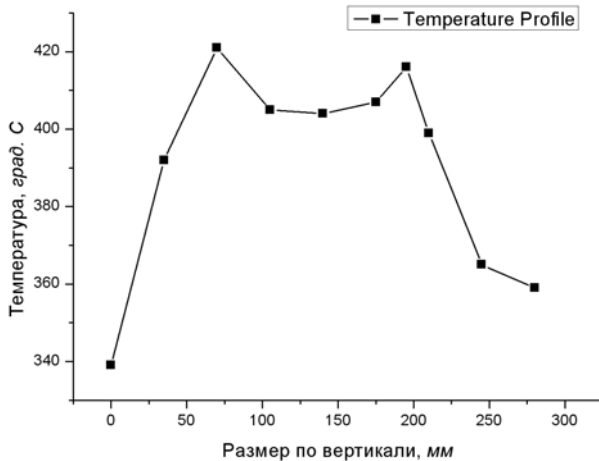


Рис.11. Профіль розподілу температури ділянки петлі, що опромінювалася сканованим пучком електронів.

Нульова відмітка по вертикалі відповідає нижній межі мішені. Отримані дані добре узгоджуються з показаннями термопар і результатами розрахунків.

У **висновках** сформульовані основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

Метою роботи було визначення фізичної природи та закономірностей оптичного випромінювання, що супроводжує дію прискорених електронів на технічні матеріали, в тому числі, аморфні діелектрики, а також теплового випромінювання зразків у процесі їх радіаційних випробувань та розробка на цій основі методів та засобів *on-line* вимірювання поглинутої дози і температури на поверхні об'єктів в умовах промислової радіаційної обробки та радіаційних випробувань. Проведені дослідження дозволяють зробити наступні висновки та відзначити наукові та практичні результати цієї роботи:

1. Аналіз процесів, що відбуваються при дії імпульсного електронного випромінювання високої потужності на аморфні діелектрики, які широко використовуються в радіаційно-технологічних процесах, показав, що інтенсивність катодолюмінісценції (КЛ), що супроводжує такі процеси, визначається, головним чином, її миттєвим компонентом, який залежить від наведеної опромінюванням концентрації електронів у зоні провідності, а також концентрації глибоких пасток у забороненій зоні та швидкості їх заповнення електронами з зони провідності.

2. За умови, що тривалість імпульсу випромінювання коротше характерного часу, що визначається швидкістю заповнення глибоких пасток та їх концентрацією, інтенсивність миттєвого компонента пропорційна потужності поглинутої дози на поверхні оброблюваного об'єкта. Ця закономірність може бути використана для контролю параметрів радіаційно-технологічних процесів.

3. Результати експериментального дослідження КЛ у ряді поширених технічних матеріалів, що застосовуються в радіаційних технологіях, підтвердили висновки теоретичного аналізу. Це дозволило знайти технічні рішення для впровадження вимірювального каналу з використанням КЛ сигналу до складу програмно-апаратного комплексу промислового прискорювача електронів для автоматизованого *on-line* контролю режиму обробки продукції, а також визначити напрямки розробки перспективних КЛ радіаторів з підвищеною радіаційною стійкістю.

4. Застосування розроблених методів та апаратурних засобів, що основані на реєстрації сигналу КЛ, забезпечує можливість прямого візуального контролю зони взаємодії сканованого пучка промислового прискорювача електронів з мішеневими пристроями, зокрема, поточне коригування режиму обробки продукції.

5. Розроблена система візуалізації області взаємодії потоку електронів великої потужності з речовиною може бути застосована як для реєстрації нерівноважного випромінення (КЛ), так і для реєстрації рівноважного (теплого) випромінення об'єкта. Це дозволяє, використовуючи практично той же набір апаратних засобів, проводити дистанційне вимірювання розподілу температури зразків під час радіаційних випробувань і тим самим розширити можливості системи контролю радіаційних процесів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

1. V.N.Boriskin, V.V. Zakutin, N.G.Reshetniak, **S.K.Romanovsky**, A.Eh.Tenishev, V.J. Titov, I.A.Chertishev, V.A.Shevchenko, I.N.Shlyakhov, V.L.Uvarov. Visualization of Electron Beam Image // *Problems of Atomic Science and Technology* (PAST). NPI. 2014. №3(91)., p. 208-210.

2. V.N.Boriskin, **S.K.Romanovsky**, V.A.Momot, Yu.A.Titarenko, D.V. Titov, V.L.Uvarov, V.A.Shevchenko, S.V.Shelepko. Optical Monitoring the Temperature of Objects Irradiated at an Electron Accelerator // *Problems of Atomic Science and Technology* (PAST).NPI. 2015. №6(100)., p. 105-107.

3. **С.К.Романовский**, В.Л.Уваров. Люминесценция аморфных диэлектриков, индуцированная высокоэнергетичными электронами // *Радиотехника*, 2016, вып.187, с.105-111.

4. **S.K.Romanovsky**, V.A.Shevchenko, A.Eh.Tenishev, V.Yu.Titov, D.V.Titov, V.L.Uvarov. Dynamics of Amorphous Dielectrics Luminescence Induced by Pulse Electron Beam // *Problems of Atomic Science and Technology* (PAST). NPI. 2017. №6(112)., p. 152-156.

5. **S.K.Romanovsky**, V.L.Uvarov. Mechanisms of Luminescence of Amorphous Dielectrics Exposed to High Energy Electrons // *Problems of Atomic Science and Technology* (PAST). NPI. 2018. №3(115)., p. 91-95.

6. R.I.Pomatsalyuk, **S.K.Romanovsky**, V.A.Shevchenko, A.Eh.Tenishev, V.Yu.Titov, D.V. Titov, V.L.Uvarov, A.A.Zakharchenko. Application of Cathodoluminescence for On-line Monitoring of Regime of an Industrial Electron Accelerator // *Problems of Atomic Science and Technology* (PAST). NPI. 2019. №6(124)., p. 168-171.

7. В.Н.Борискин, **С.К.Романовский**, А.Э.Тенишев, В.Л.Уваров, В.А.Шевченко, И.Н.Шляхов. Визуализация режима обработки продукции на технологическом ускорителе электронов ЛУ-10. *Тезисы докладов XXII-го международного семинара по ускорителям заряженных частиц* (Алушта, 22 - 28 сентября 2011 года), ННЦ ХФТИ, с.125.

8. В.Н.Борискин, В.В.Закутин, **С.К.Романовский**, А.Э.Тенишев, В.Л.Уваров, В.А.Шевченко. Использование излучения в оптическом диапазоне для визуального контроля сканируемого пучка электронов. *Тезисы докладов XI-й международной конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям* (Харьков, 11-15 марта 2013 года), ННЦ ХФТИ, с.114.

9. В.Н.Борискин, В.В.Закутин, Н.Г.Решетняк, **С.К.Романовский**, А.Э.Тенишев, В.Ю.Титов, В.Л.Уваров, И.А.Чертищев, В.А.Шевченко, И.Н.Шляхов. Визуализация отображения отпечатка пучка электронов. *Тезисы докладов XXIII-го международного семинара по ускорителям заряженных частиц* (Алушта, 08 - 14 сентября 2013 года), ННЦ ХФТИ, с.159-160.

10. В.Н.Борискин, **С.К.Романовский**, В.А.Момот, Ю.А.Титаренко, Д.В.Титов, В.Л.Уваров, В.А.Шевченко, С.В.Шелепко. Оптический мониторинг температуры объектов, облучаемых на ускорителе электронов. *Тезисы докладов XXIV-го международного семинара по ускорителям заряженных частиц*. (Харьков, 21-25 сентября 2015 г.), ННЦ ХФТИ с.84.

11. **С.К.Романовский**, В.Л.Уваров, В.А.Шевченко, Д.В.Титов. Люминесцентный анализ профиля пучка электронов. *Тезисы докладов XIV-й международной конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям* (Харьков, 22-25 марта 2016 года), ННЦ ХФТИ, с.92-93.

12. **С.К.Романовский**, В.Ю.Титов, В.Л.Уваров, В.А.Шевченко. Динамика люминесценции аморфных диэлектриков, индуцированной пучком электронов. *Тезисы докладов XV-й международной конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям* (Харьков, 21-24 марта 2017 года), ННЦ ХФТИ, с.37-38.

13. **С.К.Романовский**, Р.И.Помацалюк, А.Э.Тенишев, В.Ю.Титов, Д.В.Титов, В.Л.Уваров, В.А.Шевченко. Люминесцентная диагностика сканируемого пучка электронов. *Тезисы докладов XVI-й международной конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям* (Харьков, 20-23 марта 2018 года), ННЦ ХФТИ, с.39-40.

14. R.I. Pomatsalyuk, **S.K. Romanovsky**, V.A. Shevchenko, A.Eh. Tenishev, V.Yu. Titov, D.V. Titov, V.L. Uvarov, A.A. Zakharchenko. Application of Cathodoluminescence for On-line Monitoring of Regime of an Industrial Electron Accelerator. *XXVI International Conference on Charged Particle Accelerators. Abstracts*. September 23-27, 2019. Ukraine, Kharkiv, p.67-68.

15. Yu.I.Akchurin, A.S.Bakai, V.N.Boriskin, M.I.Bratchenko, V.A.Bocharov, Ye.V.Voloshin, V.N.Gomocky, Yu.V.Gorenko, R.N.Dronov, S.V. Duldya, L.V.Yeran, M.V.Ivahnenko, M.P.Lazarev, V.A.Momot, S.Ph.Neshcheret, N.G.Reshetniak, **S.K.Romanovsky**, A.N.Savchenko, A.A.Sarvilov, V.I.Solodovnikov, V.I.Tatanov, V.Yu.Titov, V.V. Handak, S.V. Shelepko, G.N.

Tcebenko. Test Facility for Investigation of the Corrosion of the Surface of Stressed Specimens under the Influence of Water in Subcritical and Supercritical States and Electrons with Energies of 10MeV. *XXVI International Conference on Charged Particle Accelerators. Abstracts*. September 23-27, 2019. Ukraine, Kharkiv, p.12-13.

АНОТАЦІЯ

Романовський С.К. Оптичні методи контролю радіаційно-технологічних процесів на прискорювачах електронів. – 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» - Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут" . - Харків, 2021 .

Дисертацію присвячено дослідженню основних характеристик оптичного випромінювання, що супроводжує вплив прискорених електронів на аморфні діелектрики, в тому числі, технічні матеріали, а також теплового випромінювання зразків в процесі їх радіаційних випробувань і розвитку на цій основі методів і засобів дистанційного моніторингу критичних параметрів радіаційних процесів з метою їх імплементації в системи контролю технологічних і дослідницьких установок з прискорювачами електронів.

В ході досліджень отримано аналітичні вирази для опису механізмів випромінювання, а також умов застосування сигналу катодолюмінісценції (КЛ) для діагностики режиму радіаційної обробки технічних діелектричних матеріалів. Для ряду поширених технічних матеріалів встановлено та експериментально підтверджено лінійну залежність між інтенсивністю сигналу КЛ і величиною потужності поглиненої дози електронного випромінювання.

Проведено експериментальне дослідження залежності інтенсивності сигналу люмінесценції від струму пучка, енергії електронів і товщини КЛ радіатора. Розроблені методика та набір технічних засобів для визначення в *on-line* режимі розподілу поглиненої дози на поверхні об'єкта, оброблюваного високоенергетичним сканованим пучком електронів великої потужності. Розроблена, виготовлена та використана при проведенні радіаційних випробувань пірометрична система, яка забезпечила вимір в *on-line* режимі розподілу температури ділянки надкритичної водної петлі в умовах впливу на неї пучка електронів великої потужності.

Ключові слова: радіаційні технології, лінійний прискорювач електронів, катодолюмінісценція, поглинена доза випромінювання, радіаційна стійкість, пірометрія.

АННОТАЦИЯ

Романовский С.К. Оптические методы контроля радиационно-технологических процессов на ускорителях электронов. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – физика приборов, элементов и систем. – Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”. – Харьков, 2021.

Диссертационная работа посвящена исследованию основных характеристик оптического излучения, сопровождающего воздействие ускоренных электронов на аморфные диэлектрики, в том числе, технические материалы, а также теплового излучения образцов в процессе их радиационных испытаний и развитию на этой основе методов и средств дистанционного мониторинга критических параметров радиационных процессов с целью их имплементации в системы контроля технологических и исследовательских установок с ускорителями электронов.

Анализ процессов, происходящих при воздействии высокоэнергетичного импульсного электронного облучения на аморфные диэлектрики, к числу которых относятся многие материалы, используемые в радиационно-технологических процессах, показал, что интенсивность катодолюминесценции (КЛ), образующейся при этом, определяется, главным образом, ее мгновенным компонентом, зависящим от концентрации электронов в зоне проводимости, генерируемых облучением, а также концентрации глубоких ловушек в запрещенной зоне и скорости их заполнения электронами из зоны проводимости.

В ходе исследований получены аналитические выражения для описания механизмов излучения, а также условий применения сигнала КЛ для диагностики режима радиационной обработки технических диэлектрических материалов. Для ряда распространенных технических материалов установлена и экспериментально подтверждена линейная зависимость между интенсивностью сигнала КЛ и величиной мощности поглощенной дозы электронного излучения.

Проведено экспериментальное исследование зависимости интенсивности сигнала люминесценции от тока пучка, энергии электронов и толщины КЛ радиатора. Результаты экспериментального исследования КЛ в ряде распространенных технических материалов, применяемых в радиационных технологиях, подтвердили выводы теоретического анализа. Это позволило найти технические решения для внедрения измерительного канала с использованием КЛ сигнала в состав программно-аппаратного комплекса промышленного ускорителя электронов для автоматизированного *on-line* контроля режима обработки продукции, а также определить направления разработки перспективных КЛ радиаторов с повышенной радиационной стойкостью. Разработаны методика и комплект аппаратуры, а также получены данные кинетики КЛ аморфных диэлектриков, облучаемых высокоэнергетичным пучком электронов микросекундного диапазона. Разработаны методика и набор технических средств для определения в *on-line* режиме распределения поглощенной дозы на поверхности объекта, обрабатываемого высокоэнергетичным сканируемым пучком электронов большой мощности. Явление КЛ, возбуждаемой высокоэнергетичными

электронами в технических диэлектрических материалах, может быть использовано как для визуализации профиля потока частиц на облучаемом объекте, так и для юстировки выходных устройств ускорителя.

Разработана, изготовлена и использована при проведении радиационных испытаний пирометрическая система, обеспечивающая измерение в *on-line* режиме распределения температуры участка сверхкритической водяной петли в условиях воздействия на него пучка электронов большой мощности.

Ключевые слова: радиационные технологии, линейный ускоритель электронов, катодолуминесценция, поглощенная доза излучения, радиационная стойкость, пирометрия.

ABSTRACT

Romanovsky S.K. Optical methods for monitoring of radiation-technological processes at electron accelerators. - Qualifying scientific work as a manuscript.

The dissertation for the degree of candidate of physical and mathematical sciences, specialty 01.04.01 – «Physics of devices, elements and systems». Kharkiv National University of Radio Electronics of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The dissertation work is devoted to the study of the main characteristics of optical radiation accompanying the effect of accelerated electrons on amorphous dielectrics, including technical materials, as well as thermal radiation of samples during their radiation tests and the development on this basis of methods and means for remote monitoring of critical parameters of radiation processes in order to their implementation in control systems of technological and research installations with electron accelerators.

In the course of the research, analytical expressions were obtained to describe the mechanisms of radiation, as well as the conditions for using the CL signal for diagnosing the mode of radiation processing of technical dielectric materials. For a number of common technical materials, a linear relationship between the intensity of the CL signal and the value of the absorbed dose of electron radiation has been established and experimentally confirmed. An experimental study of the dependence of the luminescence signal intensity on the beam current, electron energy, and CL radiator thickness has been carried out.

A methodology and a set of technical means have been developed to determine the distribution of the absorbed dose on the surface of an object processed by a high-energy scanned electron beam of high power in the *on-line* mode. A pyrometric system has been developed, manufactured and used in radiation tests, which provides *on-line* measurement of the temperature distribution of a section of a supercritical water loop under conditions of exposure to a high-power electron beam.

Key words: radiation technologies, linear electron accelerator, cathodoluminescence, absorbed radiation dose, optical pyrometry.

Підп. до друку 22.01.21. Формат 60x84 1/16. Умов. друк. арк. 1,16.
Тираж 100 прим. Ціна договірна.

Віддруковано в типографії ФОП Андреев К.В.
61166, Харків, вул. Богомольця, 9, кв. 50.
Свідоцтво про державну реєстрацію
№24800170000045020 від 30.05.2003 р.
ep.zakaz@gmail.com
тел. 063-993-62-73

