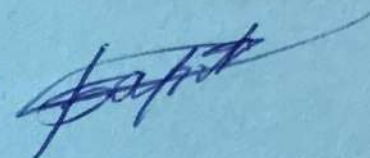


**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР
імені Б. І. Веркіна**

БАРАБАШОВ Андрій Павлович



УДК 538.958

ЕЛЕКТРОННО-СТИМУЛЬОВАНІ ПРОЦЕСИ В ТВЕРДОМУ АЗОТІ

01.04.07 – фізика твердого тіла

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Фізико-технічному інституті низьких температур імені Б. І. Веркіна НАН України, м. Харків.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Савченко Олена Володимирівна,
Фізико-технічний інститут низьких температур
імені Б. І. Веркіна НАН України,
провідний науковий співробітник відділу
спектроскопії молекулярних систем і
наноstrukturних матеріалів.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
доцент **Ламонова Карина Валентинівна**,
Донецький фізико-технічний інститут
імені О.О. Галкіна НАН України (м. Київ),
провідний науковий співробітник відділу теорії
динамічних властивостей складних систем

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Сорокін Олександр Васильович,
Інститут монокристалів НАН України,
заступник директора з наукової роботи

Захист відбудеться «18» червня 2019 року о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.175.03 при Фізико-технічному інституті низьких температур імені Б.І. Веркіна НАН України за адресою: 61103, м. Харків, пр. Науки, 47.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Фізико-технічного інституту низьких температур імені Б. І. Веркіна НАН України за адресою: 61103, м. Харків, пр. Науки, 47.

Автореферат розісланий «17» травня 2019 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.175.03,
кандидат фізико-математичних наук



Юзефович О.І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Динаміка збуджених електронних станів, зберігання та перетворення енергії у конденсованому азоті, привертають велику увагу в різних галузях науки. Електронне опромінення є одним з перспективних способів модифікації фізичних і хімічних властивостей твердих тіл. Електронно-стимульовані процеси – це підпорогові процеси, при яких управління властивостями речовини відбувається за допомогою збудження електронної підсистеми і її взаємодії з ядерною підсистемою кристала, тобто відбувається зміна структури зразка, створення в ньому дефектів і модифікація поверхні під впливом енергії нижчої, ніж порогова енергія утворення дефектів при ударному механізмі. Інтерес до сукупності електронно-стимульованих процесів, викликаних взаємодією електронного пучка з твердим тілом, диктується необхідністю розуміння механізмів цих процесів, як для вирішення фундаментальних питань фізики і хімії твердих тіл, так і для розвитку численних застосувань.

Особливий інтерес до твердого азоту пов'язаний з потенційним використанням полімерного азоту в якості екологічно чистого матеріалу з високою щільністю енергії. Інший важливий аспект пов'язаний з астрофізичними дослідженнями, оскільки азот є одним з найпоширеніших елементів Всесвіту. Зазначимо, що твердий азот, який належить до класу кріокристалів, є модельним об'єктом фізики твердого тіла. Плівки твердого N_2 використовуються як модератори, джерела азотної плазми та матриці в радіаційній фізиці та хімії. Розуміння процесів, що лежать в основі електронно-стимульованої десорбції азоту має життєво важливе значення для забезпечення безаварійної експлуатації високоенергетичних прискорювачів часток, елементи яких працюють при температурі рідкого гелію. В усіх цих галузях науки та прикладних задачах вирішальною є проблема збуджених електронних станів, їх динаміка та релаксація. Електронні збудження, індуковані фотонами або пучками електронів та іонів, можуть ефективно модифікувати властивості матеріалів. Для твердих молекулярних речовин існує велика різноманітність таких процесів, наприклад фрагментація молекул, зміна структури в об'ємі, модифікація поверхні, захоплення заряду, посилена дифузія, твердотільні реакції, викид атомів і / або молекул (десорбція). Десорбція твердого азоту вивчалась при збудженні різними видами іонізуючого випромінювання, зокрема електронами, фотонами та іонами. Більша частина досліджень проводилась за допомогою методів мас-спектроскопії, які надають інформацію про маси та кінетичні енергії десорбованих частинок, але інформація про їх електронний стан не може бути отримана за допомогою цих методів. Визначення електронного стану десорбованих частинок вимагає застосування спектроскопічних методів. Іншою проблемою, якої майже не торкалися проведені раніше дослідження, є роль зарядових станів в електронно-стимульованих процесах, зокрема десорбції.

Таким чином, **актуальність** теми дисертації визначається важливістю вище згаданих невирішених проблем, пов'язаних з низькотемпературними електронно-стимульованими явищами у твердому азоті, дослідженню яких присвячена дана робота.

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

Дослідження, які склали дисертаційну роботу, виконано у відділі спектроскопії молекулярних систем і наноструктурних матеріалів Фізико-технічного інституту низьких температур імені Б.І. Веркіна НАН України в рамках тематичного плану інституту відповідно до відомчих тем:

- тема «Елементарні збудження і фазові стани простих молекулярних твердих тіл і наноструктур» (номер державної реєстрації 0112U002639, термін виконання 2012–2016 рр.);
- тема «Термодинамічні властивості нано-структурованих систем, композитів, молекулярних твердих тіл в екстремальних умовах низьких температур» (номер державної реєстрації 117U002290, термін виконання 2017 – 2021 рр.)

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є виявлення механізмів електронно-стимульованих процесів в твердому азоті з акцентом на десорбції.

Для досягнення мети ставилися та вирішувалися такі *задачі*:

- вимірювання спектрів катодолюмінесценції твердого азоту у видимому і ВУФ діапазонах спектра та їх залежностей від дози опромінювання, енергії збуджуючих електронів і товщини зразка;
- розробка та застосування експериментального підходу до виявлення участі реакцій нейтралізації у процесі десорбції;
- визначення основних зарядових центрів, що беруть участь в рекомбінації, і аналіз каналів релаксації;
- виявлення можливого внеску збуджених молекул і атомів азоту в електронно-стимульовану десорбцію та з'ясування відповідальних за це механізмів;
- отримання даних про розподіл зарядових центрів у попередньо опроміненому твердому азоті;
- отримання нової інформації відносно смуги випромінювання на довжині хвилі 360 нм, походження якої було невідомо до теперішнього часу, її ідентифікація та з'ясування механізму формування.

Об'єктом дослідження є явища, стимульовані електронними збудженнями.

Предметом дослідження є електронно-стимульована десорбція молекул і атомів з поверхні твердого азоту та нестационарна десорбція.

Методи дослідження: катодолюмінесцентна спектроскопія у широкому діапазоні спектру від видимого до вакуумного ультрафіолету; активаційна спектроскопія – вимірювання загального і парціальних виходів термолюмінесценції, вимірювання термостимульованої екзоелектронної емісії; нестационарна люмінесценція і розроблений у роботі метод нестационарної десорбції.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше встановлено внесок зарядових центрів у процес десорбції збуджених молекул азоту в стані $C^3\Pi_u$, яка супроводжується випромінювальним переходом $C^3\Pi_u \rightarrow V^3\Pi_g$. Диссоціативна рекомбінація N_4^+ з електроном пропонується в якості ключового процесу, який лежить в основі десорбції збуджених молекул.
2. Вперше виявлено електронно-стимульовану десорбцію високозбуджених атомів азоту. Зареєстровано випромінювальні переходи десорбуючих атомів $3s \ ^4P_{5/2-1/2} \rightarrow 2p^3 \ ^4S_{3/2}$ та $2p^4 \ ^4P_{1/2-5/2} \rightarrow 2p^3 \ ^4S_{3/2}$, що співпадають з переходами у газовій фазі. Отримано докази вирішальної ролі рекомбінації зарядів в процесі десорбції збуджених атомів. Диссоціативну рекомбінацію центрів N_3^+ з електронами та рекомбінацію центрів N^+ розглянуто в якості базових реакцій..
3. Отримані нові дані стосовно просторового розподілу позитивно заряджених центрів у попередньо опромінених плівках твердого азоту. Було з'ясовано, що найбільш високий вміст стабільних автолокалізованих (N_4^+) і локалізованих (N_3^+) дірок досягається поблизу інтерфейсу зразок-підкладка.
4. Отримані нові дані про поведінку до теперішнього часу не ідентифікованої смуги випромінювання на довжині хвилі 360 нм. Висловлено припущення, що ця смуга належить нейтральному кластеру N_4 . Запропоновано можливий сценарій формування нейтрального кластера N_4 через нейтралізацію іонного кластера N_4^+ за сценарієм «sage effect».

Практичне значення отриманих результатів. Результати досліджень, які представлені в дисертаційній роботі, мають фундаментальне значення, оскільки поглиблюють знання про низькотемпературні електронно-стимульовані явища у класі молекулярних кристалів, зокрема в твердому азоті. З прикладної точки зору, отримані результати є важливими, оскільки інформація про зберігання та перетворення енергії у твердому азоті може бути використана при створенні полімерного азоту. Інформація про електронно-стимульовану десорбцію азоту є актуальною для забезпечення безаварійної експлуатації прискорювачів часток, елементи котрих працюють при низьких температурах. Отримані дані можна використовувати для моніторингу поверхонь різноманітних елементів космічної апаратури та їх очистки. Крім цього, отримана інформація з десорбції азоту може знайти застосування в вакуумній техніці, яка працює в умовах наявності іонізуючих випромінювань.

Особистий внесок здобувача. Матеріали, що складають основу дисертації опубліковані у 6 роботах (1–6), які було виконано у співавторстві. Всі результати досліджень, виконані у співавторстві, отримані та узагальнені в дисертаційній роботі при безпосередній участі автора. В роботі (1) встановлено просторовий розподіл автолокалізованих (N_4^+) та локалізованих (N_3^+) дірок у опромінених плівках твердого азоту. В роботі (2) автор приймав участь у вимірюванні дозових залежностей полоси випромінювання на довжині хвилі 360 нм, спектру термостимульованої люмінесценції твердого азоту у цій області, а також термостимульованої екзоелектронної емісії та нестационарної люмінесценції на довжині хвилі 360 нм. В роботі (3) автору належить реєстрація центрів N_3^+ у спектрі катодолюмінесценції твердого азоту. У роботах (4-6) автором було виявлено

електронно-стимульовану десорбцію збуджених молекул і атомів азота. Здобувач приймав активну участь на всіх етапах наукового дослідження, а саме: у підготовці експериментального обладнання й проведенні експерименту, аналізі отриманих результатів, формулюванні висновків і написанні статей та оприлюдненні їх на семінарах та конференціях. Таким чином, особистий внесок дисертанта є визначальним.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень, які викладені в дисертації, обговорювалися на таких вітчизняних та міжнародних наукових конференціях і симпозиумах:

- XXXIX Max Born Symposium: 5th International Symposium on Optics & its applications (OPTICS-2017, 3-7 July, 2017, Wroclaw, Poland);
- VII International Conference for Young Scientists “Low Temperature Physics” (ICYS-LTP-2017, Kharkiv, Ukraine, May 29 – June 2, 2017);
- V International Conference on Radiation and Applications in various fields of research (RAD 2017, 12 – 16 June, 2017, Budva, Montenegro);
- 4th International Conference “Nanotechnologies” (Nano-2016, 24 – 27 October, 2016, Tbilisi, Georgia);
- IV International Conference on Radiation and Applications in various fields of research (RAD 2016, 23 – 27 May, 2016, Nis, Serbia);
- VI International Conference for Young Scientists “Low Temperature Physics” (ICYS-LTP-2016, Kharkiv, Ukraine, June 6 – 10, 2016);
- 19th International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids (DPC16, July 17-22, 2016, Paris, France);
- Surface Processes, Gas Dynamics, and Vacuum Technology of Cryogenic Vacuum Systems (77-th IUVESTA Workshop, 17-21 August, 2016, Fuefiki, Japan);
- Third International Conference on Radiation and Applications in Various Fields of Research (RAD 2015, 8-12 June, Budva, Montenegro);
- V International Conference for Young Scientists “Low Temperature Physics” (ICYS-LTP-2015, Kharkiv, Ukraine, June 2 – 5, 2015);

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 17 наукових працях: 6 статей у провідних спеціалізованих наукових журналах [1–6] та 11 тез доповідей у збірниках праць міжнародних наукових конференцій [7–17].

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, оглядового розділу, розділу з методикою експериментальних досліджень, чотирьох оригінальних розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації 125 сторінок, вона містить 54 рисунки, 3 таблиці та список використаних джерел з 103 найменувань на 10 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** наведена коротка характеристика напрямку досліджень, розкрито суть і стан наукової проблеми, обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, визначено мету і завдання досліджень та методи їх проведення, сформульовані основні результати роботи, їх наукова новизна і практична значимість, наведено дані про публікації здобувача, апробацію роботи та описано структуру дисертації.

Перший розділ «Азот: електронні стани та радіаційні процеси (огляд)» містить стислий огляд наявної наукової літератури щодо структури, електронних станів та радіаційно-стимульованих процесів у конденсованому азоті. Розділ складається з семи підрозділів.

У **підрозділі 1.1** наведено короткий огляд загальних відомостей про кріокристали, а також надано огляд структури і фізичних властивостей твердого азоту.

Підрозділ 1.2 присвячений електронним станам газоподібного азоту, де розглянуто як атомарний, так і молекулярний азот.

У **підрозділі 1.3** розглянуто електронні стани у твердому азоті. Наведено дані, що були отримані за допомогою вимірювання спектрів поглинання твердого азоту.

Підрозділ 1.4 містить інформацію про дефектоутворення через упругі процеси при опроміненні високоенергетичними електронними пучками.

У **підрозділі 1.5** розглянуто попередні дані стосовно десорбції стимульованої збудженням електронної підсистеми, які було отримано на прикладі кріокристалів інертних елементів.

У **підрозділі 1.6** наведено інформацію про десорбцію твердого азоту досліджену раніше методами мас-спектроскопії. Були знайдені маси десорбуючих частинок та їх кінетичні енергії. Зазначено, що ці методи не дають відомостей стосовно електронних станів десорбуючих частинок.

Підрозділ 1.7 містить стисло інформацію про методи активаційної спектроскопії.

В результаті аналізу літературних даних стала очевидною доцільність дослідження ролі зарядових центрів у електронно-стимульованих явищах, зокрема десорбції, і необхідність нового експериментального підходу до вирішення цієї проблеми із застосуванням методів люмінесцентної спектроскопії в поєднанні з оптичними та токовими методами активаційної спектроскопії, нестаціонарною люмінесценцією, а також розробка нового методу нестаціонарної десорбції.

У **другому розділі** «Експериментальні методики» викладено новий підхід до вивчення електронно-стимульованої десорбції та наведено загальну інформацію про вимірювальний комплекс – спектральний багатофункціональний комплекс, який використовувався для вирішення завдань дисертації. Описано приготування зразків, наведені основні характеристики та схеми вузлів експериментальної установки. Основними методами досліджень були катодолюмінесцентна спектроскопія у видимому та ВУФ діапазонах, термостимульована люмінесценція і екзоелектронна емісія, вимірювання нестаціонарної люмінесценції, а також запроваджений

дисертантом метод нестационарної десорбції. Коротко подана процедура вимірювань нестационарної десорбції. Плівка N_2 спочатку опромінювалась інтенсивним пучком електронів для створення високої концентрації зарядових центрів, а потім тиск у комірці, що вказує на вихід десорбції, вимірювали під час нагрівання плівки під дією пучка малої інтенсивності щоб мінімізувати створення нових радіаційно-стимульованих центрів. Усі релаксаційні емісії вимірювалися одночасно. Загальний вихід десорбції вимірювався іонізаційним датчиком. Щоб розділити спектральні особливості, пов'язані з об'ємом зразка та з його поверхнею, зразки зондувалися по глибині шляхом зміни енергії збуджуючих електронів, а також порівнянням характеристик зразків різної товщини. Температурні залежності реєструвалися при лінійному нагріванні. У більшості експериментів швидкість нагріву становила $6 \text{ K} \cdot \text{хв}^{-1}$.

Третій розділ «Електронно-стимульована десорбція збуджених молекул з твердого азоту» присвячений результатам досліджень радіаційно-стимульованих явищ у твердому азоті в інтервалі температур 4–45 К.

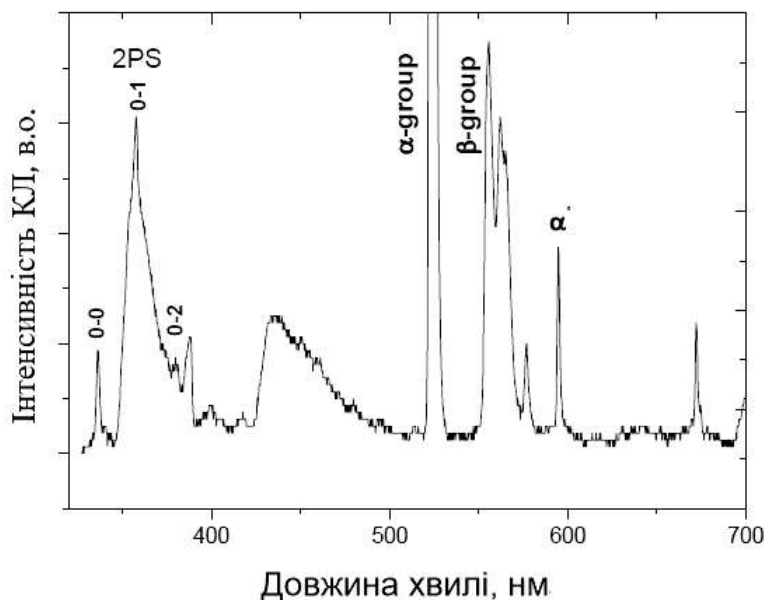


Рис.1. Люмінесценція N_2 , збудженого пучком з енергією 1 кеВ, у видимому та близькому УФ-діапазонах.

У близькому УФ-діапазоні була зареєстрована емісія другої позитивної системи (позначеної на рис. 1 як 2PS) - переходи між високозбудженими молекулярними станами $C^3\Pi_u$ і $V^3\Pi_g$. Відмінною рисою цієї емісії є збіг спостережуваних смуг з тими, що були зареєстровані в спектрі газової фази. Також спостерігалася α -група, яка відповідає випромінюванню атомів азоту, ініційованого за допомогою матричних фононів. β -група виникає з кисневої домішки і відповідає переходу атома $O(^1S) \rightarrow O(^3P)$. Рисунок 2 більш детально показує люмінесценцію твердого N_2 у діапазоні другої позитивної системи, записаної при температурі 5 К. Було виявлено не тільки коливально релаксовану емісію, тобто переходи з рівня v'

Приведені експериментальні дослідження десорбції збуджених молекул з твердого азоту. З огляду на велику ширину забороненої зони твердого N_2 (15,6 еВ) були проведені вимірювання спектрів люмінесценції в широкому діапазоні довжин хвиль - від видимої області до області вакуумного ультрафіолету (ВУФ).

= 0, а і так звану "гарячу" люмінесценцію – переходи з більш високих коливальних рівнів ($v' = 1, 2$) стану $C^3\Pi_u$. Форму смуг досить важко проаналізувати через їх пере-

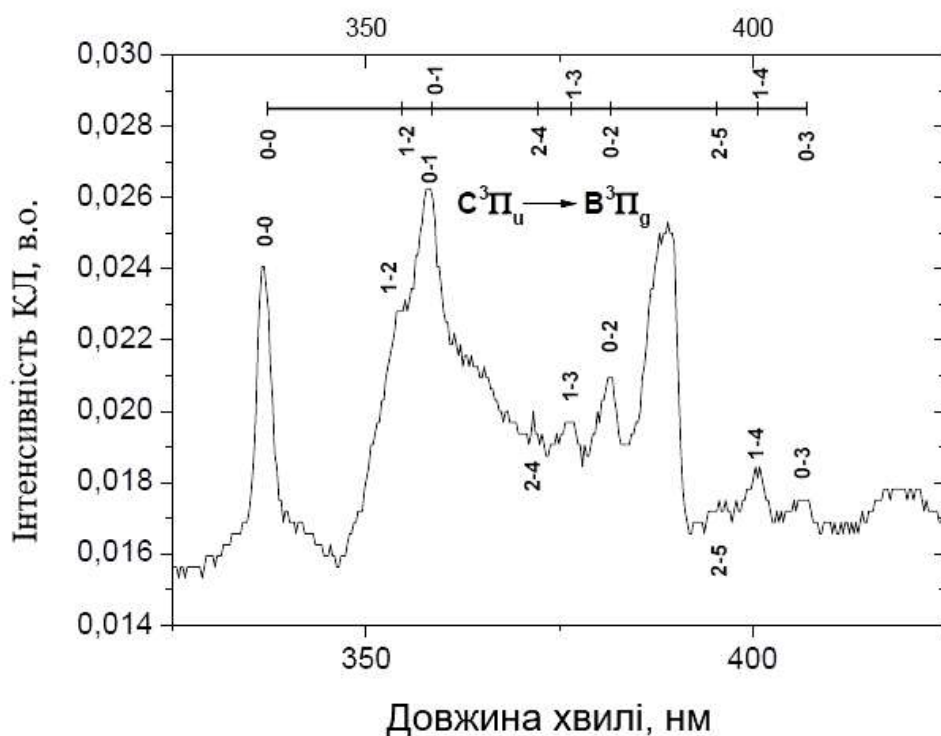


Рис.2. Друга позитивна система у спектрі люмінесценції твердого азоту опроміненого електронним пучком з енергією 500 еВ.

криття з широкою смугою при 360 нм, природу якої буде розглянуто у розділі 3.4. Єдиною смугою, вільною від перекриття, є смуга, яка відповідає переходу 0-0. Максимум цієї смуги та максимуми інших електронно-коливальних смуг збігаються з їх положенням у спектрі газової фази збудженої електронним пучком. Було зроблено припущення, що цей збіг пов'язаний з

емісією молекул азоту які десорбують у високозбудженому стані $C^3\Pi_u$.

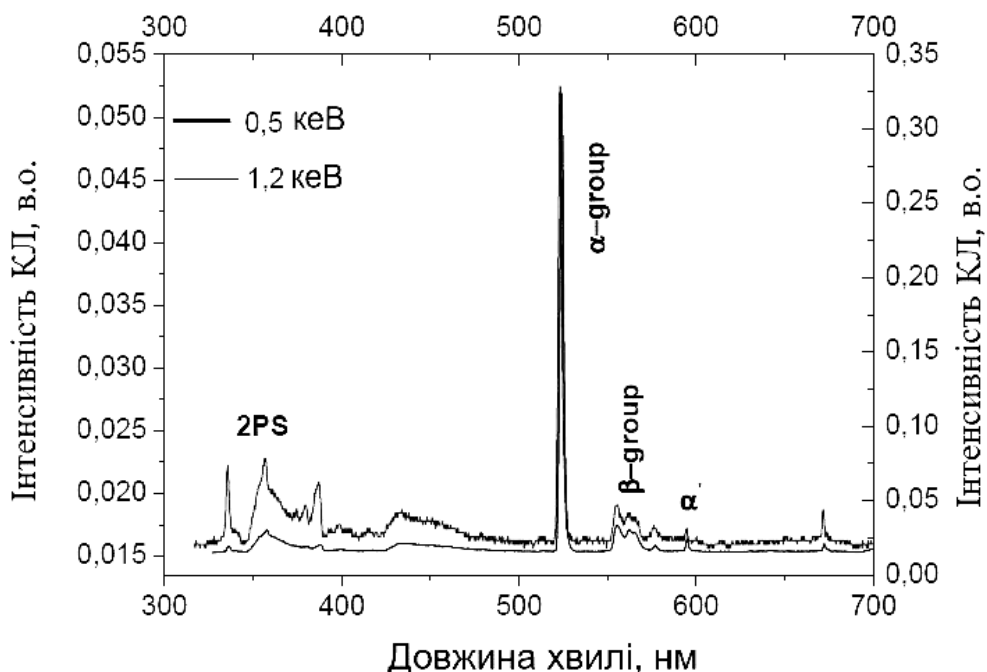


Рис. 3. Спектри люмінесценції твердого N_2 , збудженого електронним пучком з енергією 0,5 кеВ та 1,2 кеВ.

Додаткові експерименти з зондування зразків по глибині за допомогою зміни енергії пучка електронів та експерименти з тонкими плівками (<100 нм) підтверджують це припущення. Чітко видно збільшення співвідношення інтенсивності другої позитивної системи до інтенсивності α -смуги при більш низькій енергії електронного пучка (рис. 3). Глибина проникнення відрізняється на порядок (від ~ 10 нм до ~ 100 нм) коли енергія електронного пучка змінюється від 0,5 кеВ до 1,2 кеВ. Подібний ефект росту молекулярного випромінювання спостерігався у тонких плівках, що показано на рисунку 4.

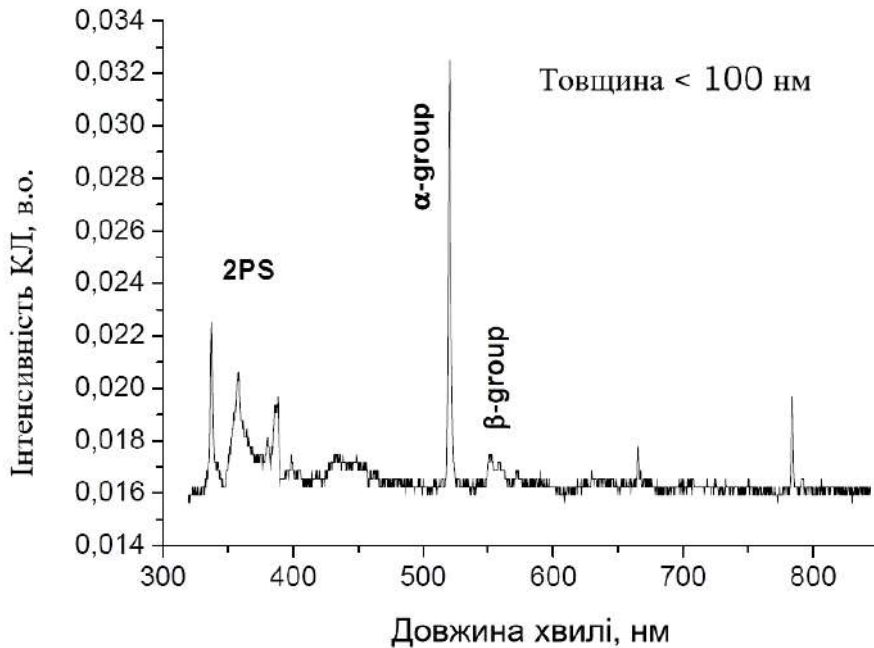
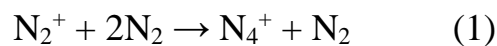


Рис. 4. Спектр люмінесценції тонкої плівки N_2 (<100 нм)

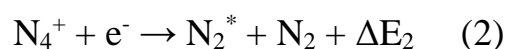
Для того, щоб підтвердити внесок заряджених центрів в десорбцію збуджених молекул азоту, була виміряна термічно стимульована люмінесценція (ТСЛ) на різних довжинах хвиль, у тому числі на довжинах хвиль смуг другої позитивної системи. Одночасно був виміряний вихід термічно стимульованої екзоелектронної емісії (ТСЕЕ).

Рисунок 5 показує вихід ТСЕЕ у порівнянні з виходом ТСЛ, виміряною на смузі 0-1 діапазону системи $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$. Температурна залежність рекомбінаційної люмінесценції на смузі переходу $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ корелює зі струмом ТСЕЕ, що вказує на те, що процесом, який лежить в основі десорбції збудженої молекули азоту, є рекомбінація електрона з позитивно зарядженим іонним центром N_4^+ .

Реакція димеризації добре відома за низкою матеріалів, і спостерігалась у газовій фазі азота під тиском:



Рекомбінація іону з електроном веде до дисоціації нейтралізованого продукта реакції з появою збудженої молекули:



Аналіз експериментів по газовій фазі, які було виконано під тиском близьким до атмосферного, довів, що диссоціативна рекомбінація N_4^+ з електроном призводить

до появи молекули азоту в збудженому стані $C^3\Pi_u$. Схожий процес відбувається на поверхні твердого азоту.

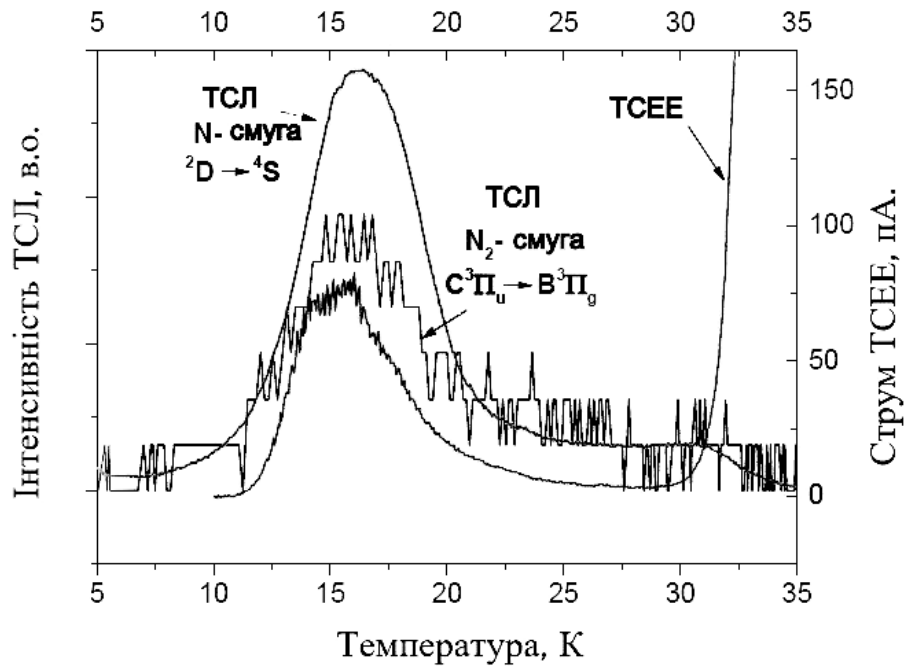
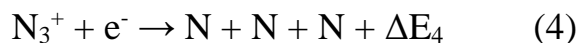


Рис. 5. Виходи термічно стимульованої люмінесценції, виміряної на смузі 0-1 другої позитивної системи та α -смузі у порівнянні до виходу термічно стимульованої екзоелектронної емісії.

Найбільш інтенсивна риса спектру ТСЛ у видимому діапазоні це α -група, пов'язана з атомним переходом $^2D \rightarrow ^4S$, який формується в об'ємі зразка. Її спостереження у ТСЛ та кореляція виходу ТСЛ зареєстрованого на α -смузі з виходом ТСЕЕ вказує на зв'язок процесу генерації атомних центрів із реакцією рекомбінації зарядових центрів. В твердому азоті при електронному бомбардуванні також формуються N_3^+ центри. У попередніх експериментах на кільці зберігання важких іонів CRYRING було встановлено, що існують два екзотермічні канали дисоціативної рекомбінації катіона N_3^+ з електроном - двокомпонентний та трьохкомпонентний:



Була встановлена сильна схильність до дисоціації через канал (3). Енергія, що виділяється у двокомпонентному каналі - ΔE_3 , перевищує 10 еВ, що створює передумови для дисоціації з появою атомних центрів у збудженому стані, наприклад, $N(^2D)$. Аналіз отриманих даних вказує на канал (3) як основний канал, що створює радикали $N(^2D)$ в твердому азоті. Перехід $^2D \rightarrow ^4S$ змінює атомний стан до основного, залишаючи дефект у атомній решітці.

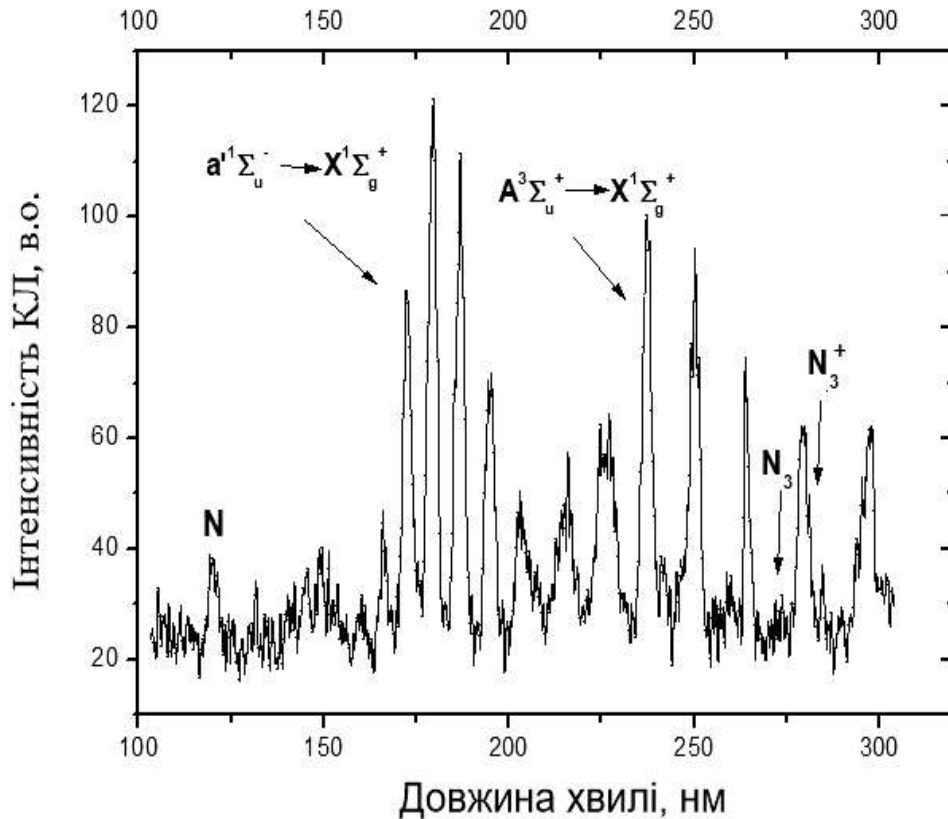


Рис. 6. Спектр катодолумінесценції твердого азоту при температурі 5 К.

Формування іонних центрів N_3^+ було зареєстровано у спектрі катодолумінесценції (КЛ) в області вакуумного ультрафіолету, зображеному на рисунку 6, на довжині хвилі 281 нм. Ця смуга належить до переходу $A^3\Pi_u(000) \rightarrow X^3\Sigma_g(000)$ катіона N_3^+ і збігається зі смугою, виявленою у ВУФ спектрі поглинання N_2 . Окрім того, були виявлені атомні лінії N в спектрі катодолумінесценції в області вакуумного ультрафіолету, які будуть розглянуті у розділі 4.

У четвертому розділі «Електронно-стимульована десорбція збуджених атомів з твердого азоту» викладені результати досліджень спектрів катодолумінесценції твердого азоту з акцентом на десорбцію збуджених атомів. У найбільш короткохвильовій області спектру, записаного в діапазоні ВУФ зареєстровано піки атомного випромінювання на довжинах хвиль 120 і 113.4 нм, як показано на рис. 7. Відмінною рисою цих ліній є збіг з спектром газової фази на відміну від молекулярних емісій у ВУФ області – $a^1\Sigma_u^- \rightarrow X^1\Sigma_g^+$ та $A^3\Sigma_u^+ \rightarrow X^1\Sigma_g^+$, які зміщені в довгохвильову сторону по відношенню до їх положення в спектрах газової фази. Лінія при 120 нм належить електронним переходам $3s\ 4P_{5/2-1/2} \rightarrow 2p^3\ 4S_{3/2}$. Більш слабка лінія при менших довжинах хвиль походить від $2p^4\ 4P_{1/2-5/2} \rightarrow 2p^3\ 4S_{3/2}$ переходів. Ширина ліній в спектрі КЛ визначається роздільною здатністю спектрометра. Реєстрація слабких емісій проводилась із широкими щілинами, що не дозволяло виявити тонку структуру цих ліній.

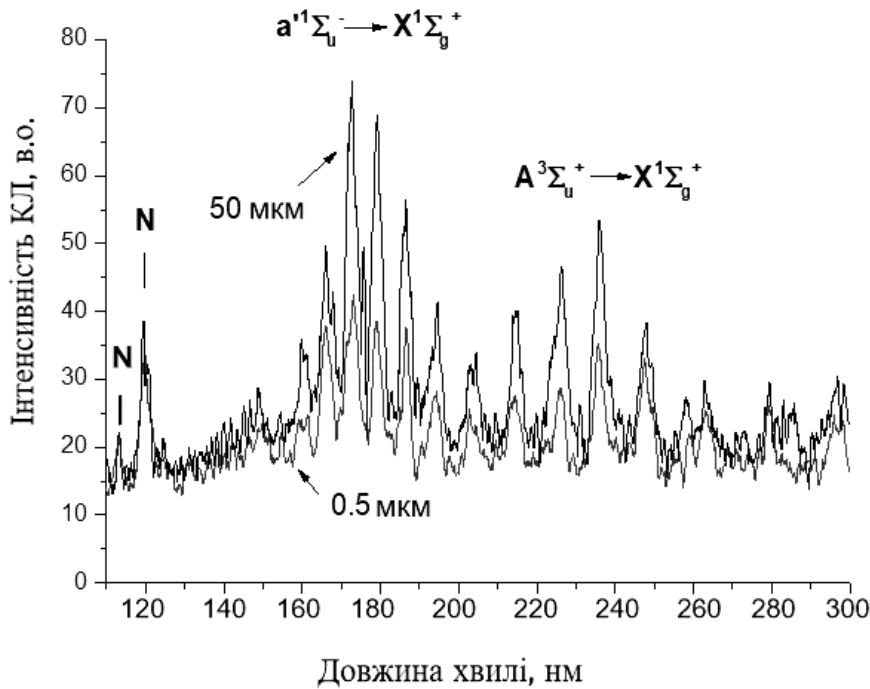


Рис.7. Катодолюмінесценція (КЛ) твердого азоту для зразків різної товщини при збудженні електронами з енергією 700 еВ.

Зазначимо, що ці лінії, зареєстровані в Нематриці, допованій азотом, мають синій зсув. Відсутність зсуву у спектрах чистого азоту дає підставу припустити, що ми спостерігаємо світіння частинок, що покинули поверхню зразка. Відносна інтенсивність атомної люмінесценції щодо молекулярних смуг, які належать об'ємним центрам світіння, в більш тонкому зразку істотно вище, що свідчить про більш значний внесок в емісію поверхневого шару зразка.

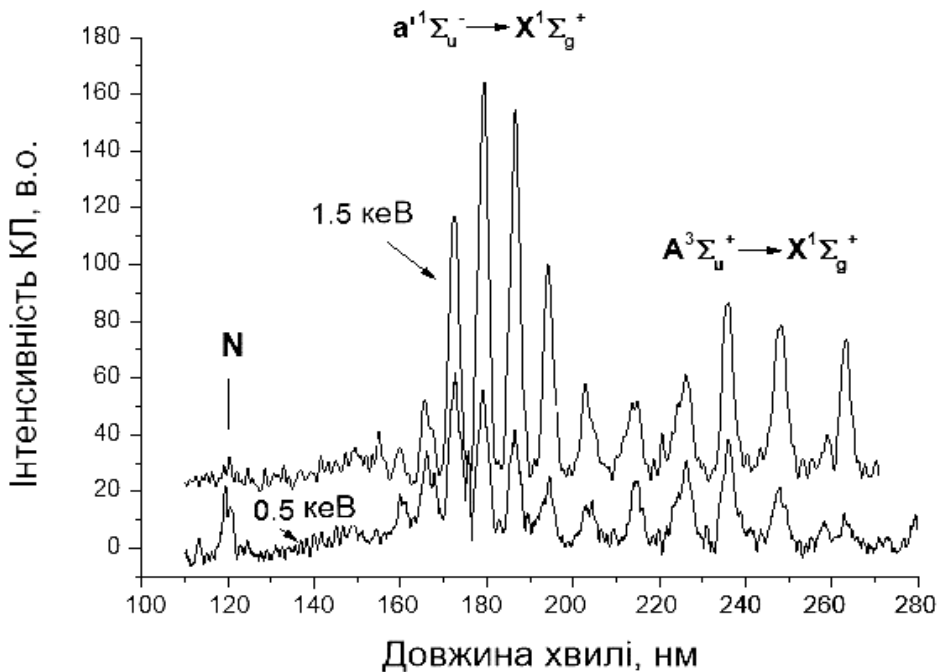


Рис.8. Зондування зразків по глибині.

Для підтвердження цього припущення було проведено зондування зразка по глибині електронами з різною енергією. На рисунку 8 представлені спектри люмінесценції азоту під впливом електронного пучка з енергією 0.5 кеВ і 1.5 кеВ. Окрім збігу піку атомного світіння зі спектром газової фази, як і спостерігалось в спектрах зразків різної товщини,

з графіка також видно, що при опроміненні зразка більш повільними електронами з меншою глибиною проникнення (10 нм для електронів з енергією 0.5 кеВ, тоді як для електронів з енергією 1.5 кеВ – 100 нм) відносна інтенсивність атомного світіння значно вище. Це є додатковим підтвердженням того, що виявлене нами атомне випромінювання ($3s\ ^4P_{5/2-1/2} \rightarrow 2p^3\ ^4S_{3/2}$ і $2p^4\ ^4P_{1/2-5/2} \rightarrow 2p^3\ ^4S_{3/2}$ переходи) відповідає випромінюванню атомів, що десорбують з поверхні твердого азоту в збудженому стані.

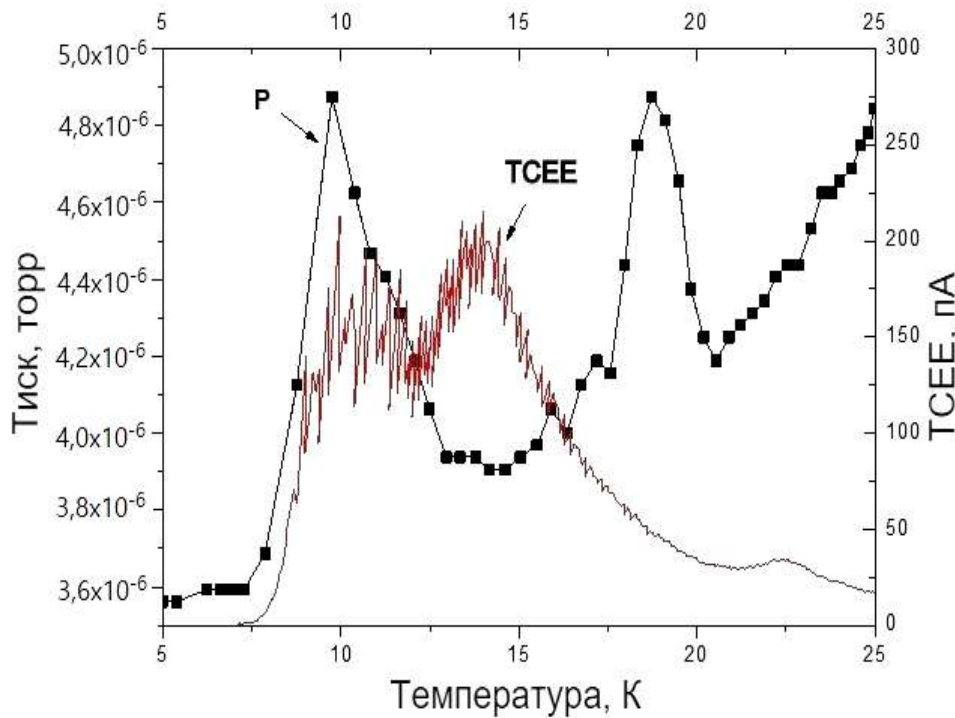


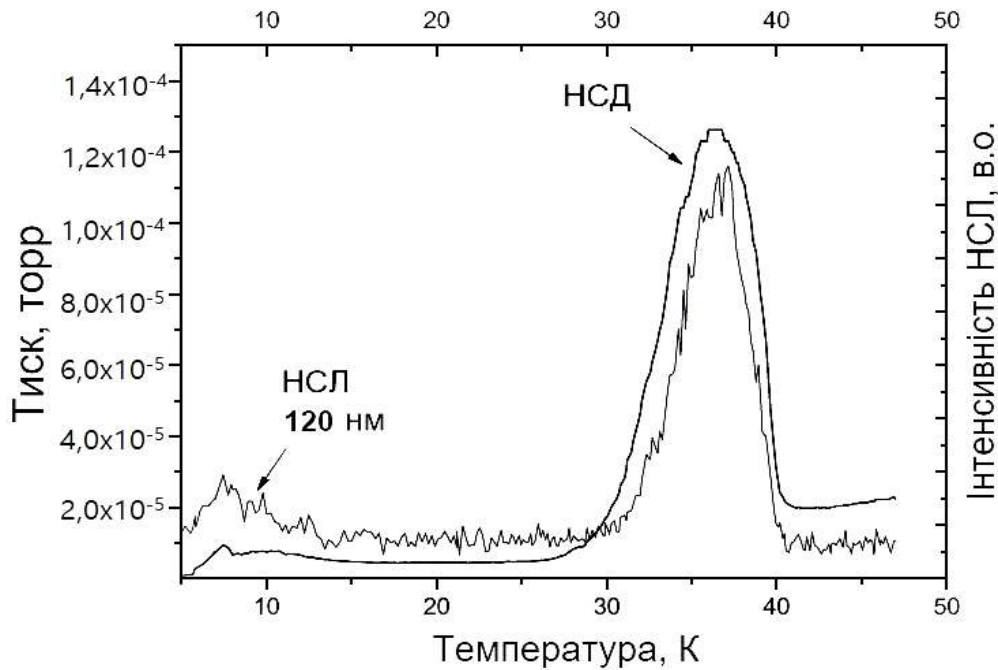
Рис.9. Вихід нестаціонарної десорбції (P) порівняний з виходом струму TSEE.

Кореляція спектрів нестаціонарної люмінесценції, яка вимірювалась на довжині хвилі 120 нм, та нестаціонарної десорбції (що буде наведено у наступному розділі) вказує на зв'язок десорбції збуджених атомів у стані 4P з процесом рекомбінації зарядів. Як було відмічено вище, джерелом збуджених атомів може бути реакція (3) – диссоціативна рекомбінація центрів N_3^+ з електронами.

Енергія, що виділяється у цій реакції дорівнює 10.5 еВ, що створює умови для десорбції збуджених атомів у стані $3s\ ^4P_{5/2-1/2}$. Але цієї енергії недостатньо для стимуляції виходу атомів азоту у стані $2p^4\ ^4P_{1/2-5/2}$. Це передбачає існування додаткового механізму десорбції збуджених атомів. Найбільш ймовірно, що створення іонів N^+ на поверхні (через збудження внутрішніх оболонок) з подальшою їх нейтралізацією може також призвести до десорбції збуджених атомів N^* . Для перевірки вкладу реакцій нейтралізації в електронно-стимульовану десорбцію були проведені експерименти з використанням методу нестаціонарної десорбції. Плівка N_2 спочатку опромінювалась інтенсивним пучком електронів для створення зарядових центрів, а потім тиск, що вказує на вихід десорбції, вимірювали під час нагрівання плівки під дією слабого електронного пучка. На відміну від монотонної зміни тиску при нагріванні неопромінених плівок, була виявлена немонотонна поведінка нестаціонарної десорбції НСД з вираженими максимумами при низьких температурах, як показано на рисунку 9. Перший пік при близько 10 К корелює з виходом TSEE, що вказує на його зв'язок з реакціями нейтралізації. Електрони, що

виділяються з неглибоких пасток, рекомбінують з позитивно зарядженими центрами N_4^+ та N_3^+ , і ініціюють реакцію диссоціативної рекомбінації з викидом частинок.

У п'ятому розділі «Просторовий розподіл зарядових центрів у опромінених плівках азоту» викладена отримана інформація стосовно просторового розподілу зарядових центрів. Результати одночасного вимірювання НСЛ на довжині хвилі (120 нм) атомного переходу $3s^4P_{5/2-1/2} \rightarrow 2p^3S_{3/2}$ поряд з виходом НСД представлені на рис. 10.



Кореляція виходів НСЛ та НСД чітко простежується у всьому інтервалі температур, демонструючи зв'язок десорбції збуджених атомів з процесом нейтралізації позитивно заряджених центрів. Максимум біля 10 К свідчить про рекомбінацію зарядових центрів з електронами, що були звільнені з пасток, пов'язаних з радіаційно-стимульованими дефектами.

Рис.10. Нестационарна люмінесценція (НСЛ) та нестационарна десорбція (НСД) на довжині хвилі 120 нм (атомний перехід $^4P \rightarrow ^4S$)

Як було обговорено у розділі 4, найбільш ймовірними центрами, що рекомбінують з електронами, приводячи в результаті до десорбції збуджених атомів у стані $3s^4P_{5/2-1/2}$, є центри N_3^+ . Найбільша інтенсивність виходів НСЛ і НСД у «високотемпературній» області вказує на локалізацію цих позитивно заряджених центрів N_3^+ переважно у шарах, близьких до інтерфейсу зразок-підкладка. Для того, щоб отримати інформацію про просторовий розподіл N_4^+ центрів була виміряна у широкому діапазоні температур від 4 до 45 К ТСЛ на довжині хвилі молекулярного переходу. Спектрально розділений вихід був порівняний із інтегральним виходом ТСЛ і виходом термостимульованої екзоелектроної емісії (рис.11). Широкий пік між 10 та 20 К походить від рекомбінації центрів N_4^+ з електронами, що були звільнені з неглибоких пасток. Наступний пік у ТСЛ біля 27 К формується в процесі рекомбінації близьких електрон-діркових пар. Найбільш інтенсивні піки ТСЛ та ТСЕЕ були виявлені у «високотемпературному діапазоні», де вступають до гри шари зразка близькі до межі поділу зразок-підкладка, що вказує на більшу концентрацію N_4^+ .

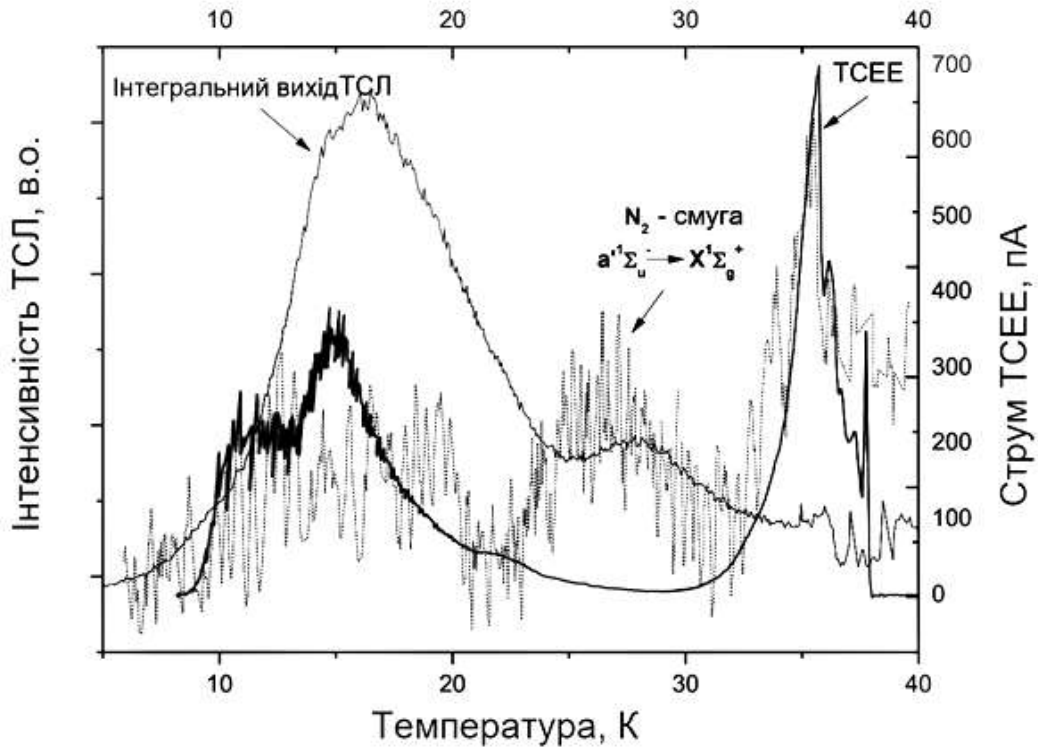


Рис.11. Інтегральний вихід ТСЛ з попередньо опроміненого твердого азоту у порівнянні з ТСЛ, яка вимірювалась на довжині хвилі молекулярного переходу $a^1\Sigma_u^-(0) \rightarrow X^1\Sigma_g^+(5)$, та вихід ТСЕЕ.

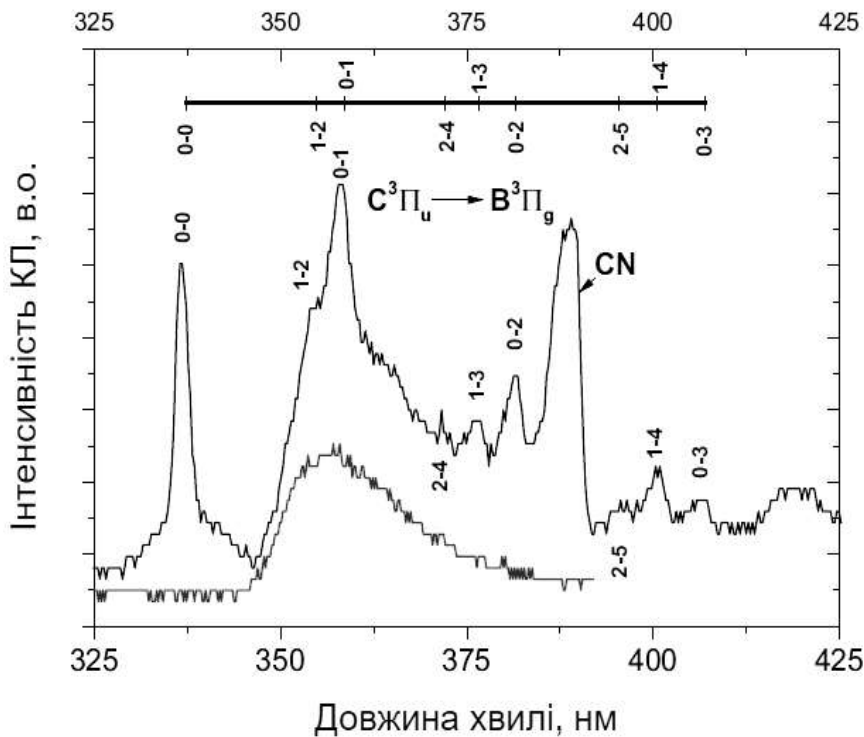


Рис.12. Спектр КЛ в діапазоні другої позитивної системи записаний при опроміненні електронним пучком з енергією 0,5 кеВ (верхня крива) та 1,2 кеВ (нижня крива)

У шостому розділі «Виявлення радіаційно-сформованих нейтральних кластерів N_4 » викладено результати досліджень донині не ідентифікованої смуги випромінювання на довжині хвилі 360 нм. Спектр, ідентичний тому, що був описаний у розділі 3, показано на рис. 12 (верхня крива). Встановлено, що пік біля 388 нм походить від сформованого у матриці азота домішкового центру CN ($B^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Sigma^+$ лінії 0-0).

Щоб "ізолювати" смугу при 360 нм був записаний спектр КЛ у діапазоні ближнього ультрафіолету за умов, коли десорбція була зменшена, тобто при збудженні електронами з більшою енергією (1.2 кеВ).

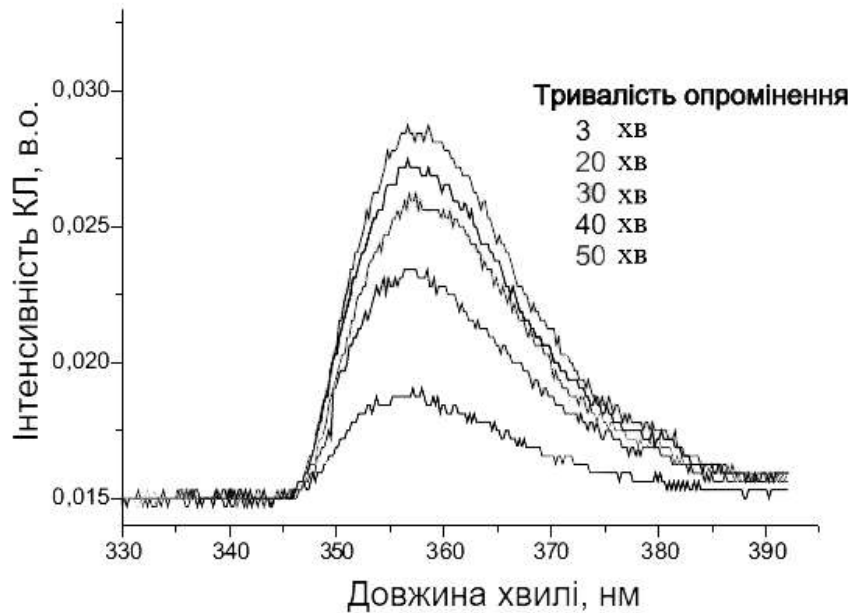


Рис.13. Дозова залежність люмінесцентної смуги 360 нм.

Відмінною рисою цієї смуги є сильна дозова залежність. Її інтенсивність збільшується з часом поромінення, і після 30-хвилинного опромінення показує тенденцію до насичення, що вказує на накопичення радіаційно-стимульованих центрів (рис. 13). Смуга 360 нм також присутня у спектрі ТСЛ, що вказує на зв'язок цієї смуги з реакцією нейтралізації (рис. 14).

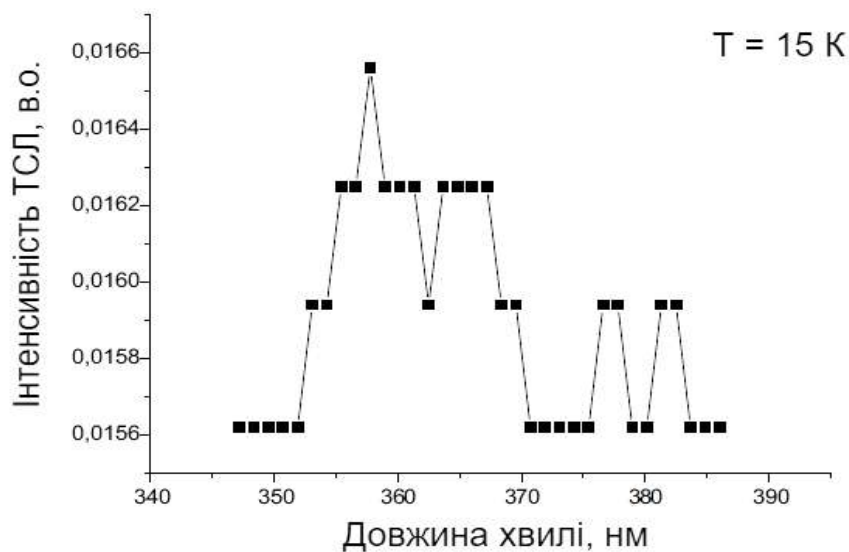


Рис.14. Відповідна частина спектру термічно стимульованої люмінесценції попередньо опроміненої плівки твердого азоту.

Порівняння виходу ТСЛ та ТСЕЕ з виходом нестаціонарної люмінесценції (НСЛ), записаного на довжині хвилі 360 нм (рис.15) та кореляція піків НСЛ на ТСЛ вказує на суттєвий внесок процесу нейтралізації у катодолюмінесценцію.

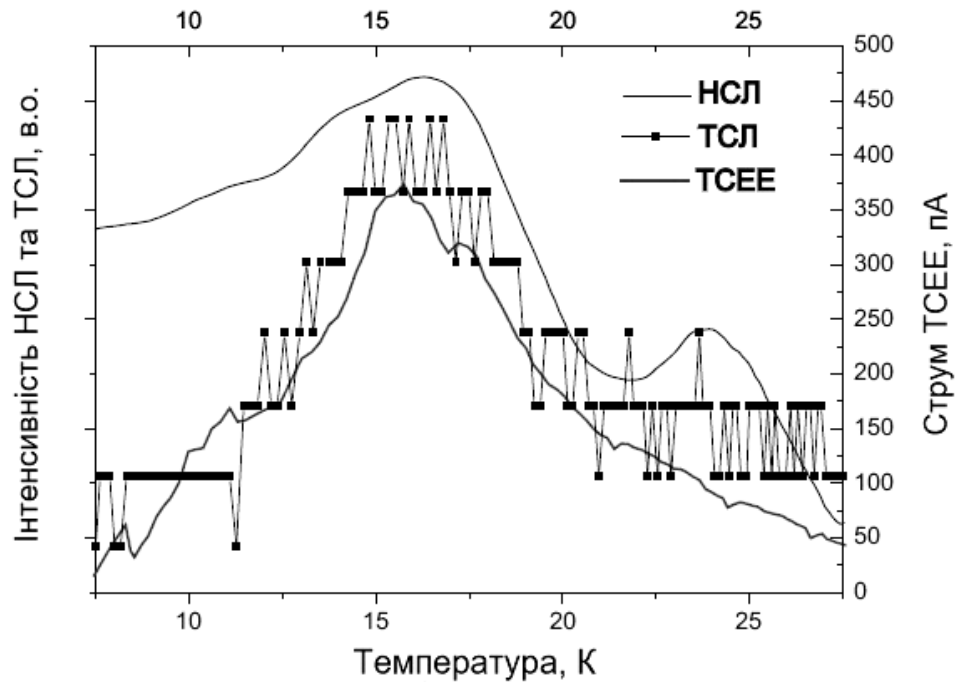
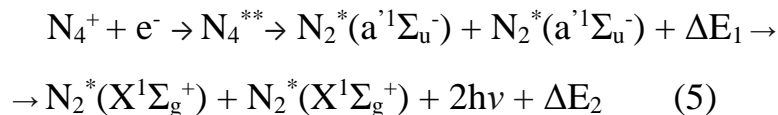


Рис.15. ТСЛ, ТСЕЕ та НСЛ, записані на довжині хвилі 360 нм.

Кореляція між кривою світіння ТСЛ та струмовим виходом ТСЕЕ також свідчить про зв'язок емісії на довжині хвилі 360 нм з реакцією нейтралізації.

Для того, щоб виявити різницю між центрами N_2 в азотному середовищі та ізолюваними центрами N_2 , були виміряні спектри термостимульованої люмінесценції як з твердого азоту, так і з N_2 вбудованого до матриці Ne (концентрація N_2 складала 0,5%) Варто зазначити, що смуга біля 360 нм відсутня в ТСЛ центрів N_2 , вбудованих до матриці Ne, що показано на рис. 16. Відсутність смуги поблизу 360 нм у ТСЛ матрично-ізолюваних центрів N_2 вказує на її зв'язок зі складним азотним центром, що містить більше двох атомів. Було зроблене припущення, що центрами, які беруть участь у процесі нейтралізації, є центри N_4^+ . Нейтралізація центрів N_4^+ через диссоціативну рекомбінацію відбувається наступним чином:



Збуджена молекула N_2^* виходить з "клітки" своєї решітки, де N_4^+ рекомбінував з електроном. Цей сценарій (5) відповідає випадку "клітинного виходу" з незворотною дисоціацією перехідних продуктів N_4^{**} до N_2^* та подальшим їх випромінювальним переходом до основного стану.

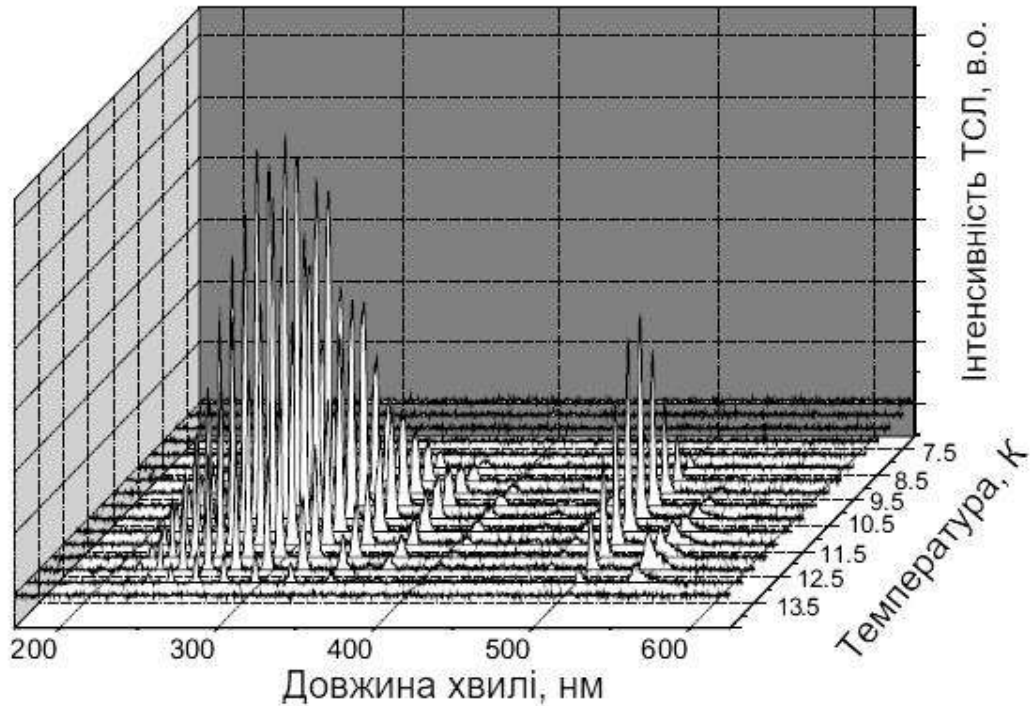
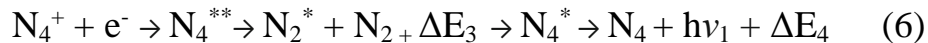


Рис.16. Спектр ТСЛ матриці Ne з домішкою азоту 0.5%

Також може існувати інший сценарій. Молекула N_2^* може провзаємодіяти з молекулою в основному стані N_2 та сформувати N_4^* , а потім N_4 шляхом радіаційного переходу:



Сценарій (6) відображає так званий матричний «клітинний ефект». Можливість співіснування цих сценаріїв визначається потенційними кривими кластерів N_4 та розгалуженням шляхів релаксації.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена важлива задача в області фізики твердого тіла, а саме: досліджені механізми електронно-стимульованих процесів в твердому азоті, зокрема десорбції. Основні результати, які отримані в дисертаційній роботі, можна сформулювати наступним чином:

1. Вперше надійно встановлено внесок зарядових центрів у процес десорбції молекул азоту у високозбудженому електронному стані $C^3\Pi_u$. Доведено, що десорбуючі молекули знаходяться не тільки у коливально релаксованому стані з $v' = 0$, а і на більш високих коливальних рівнях ($v' = 1, 2$) стану $C^3\Pi_u$, що вказує на сповільнену релаксацію і високу швидкість відриву молекул від поверхні. Диссоціативна рекомбінація N_4^+ з електроном пропонується в якості ключового процесу, який лежить в основі десорбції збуджених молекул.
2. Вперше виявлено електронно-стимульовану десорбцію збуджених атомів азоту у станах $3s \ ^4P_{5/2-1/2}$ та $2p^4 \ ^4P_{1/2-5/2}$. Запропоновано два можливих канали десорбції збуджених атомів – генерація атомів азоту в результаті

диссоціативної рекомбінації центрів N_3^+ з електронами і створення іонів N^+ через збудження внутрішніх оболонок з подальшою нейтралізацією і появою збуджених атомів.

3. Отримано нові дані стосовно просторового розподілу зарядових центрів у попередньо опромінених плівках твердого азоту. Було з'ясовано, що автолокалізовані (N_4^+) і локалізовані (N_3^+) дірки розташовані переважно біля поверхні зразка, що межує з підкладкою, є найбільш стабільними.
4. Розроблено та впроваджено нову методику виявлення участі реакцій нейтралізації у процесі десорбції – нестационарну десорбцію. Здобуто доказів внеску реакцій електрон-іонної рекомбінації, стимульованої термічно звільненими електронами, у вихід десорбції, і проаналізовані основні процеси, які можуть бути за це відповідальні.
5. Отримано нові дані про поведінку до теперішнього часу не ідентифікованої смуги випромінювання на довжині хвилі 360 нм. Запропоновано можливий сценарій нейтралізації N_4^+ через так званий "клітинний ефект" і формування нейтрального кластера N_4 , як центру, відповідального за випромінювання на довжині хвилі 360 нм.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Radiation effects in nitrogen and methane “ices” / E.V. Savchenko, I.V. Khyzhniy, S.A. Uyutnov, M.A. Bludov, **A.P. Barabashov**, G.B. Gumenchuk, V.E. Bondybey // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2018. –V.435, – P.38–42.
2. Radiation effects in solid nitrogen / E.V. Savchenko, I.V. Khyzhniy, S.A. Uyutnov, M.A. Bludov, **A.P. Barabashov**, G.B. Gumenchuk, V.E. Bondybey // J. Low Temp. Phys., 187 (2017) P. 62-70.
3. Charged defects and defect-induced processes in nitrogen films / E.V. Savchenko, I.V. Khyzhniy, S.A. Uyutnov, M.A. Bludov, **A.P. Barabashov**, G.B. Gumenchuk, V.E. Bondybey // Phys. Status Solidi (c) 12 (2015) 49-54.
4. Excitation-induced processes in model molecular solid – N_2 / E.V. Savchenko, I.V. Khyzhniy, S.A. Uyutnov, M.A. Bludov, **A.P. Barabashov**, G.B. Gumenchuk, V.E. Bondybey // J. Luminescence, 191 (2017) 73-77.
5. Электронно-стимулированная десорбция возбужденных атомов из твердого азота / **А.П. Барабашов**, И.В. Хижный, С.А. Уютнов, М.А. Блудов, Е.В. Савченко // ФНТ, 42, (2016) 1512-1515.
6. Radiation-induced defects, energy storage and release in nitrogen solids / E.V. Savchenko, I.V. Khyzhniy, S.A. Uyutnov, M.A. Bludov, **A.P. Barabashov**, G.B. Gumenchuk, V.E. Bondybey // IOP Conf. Series: Material Science and Engineering, **169** (2017) 012007.
7. Radiation-induced desorption of excited molecules from pre-irradiated nitrogen films / **A.P. Barabashov**, I.V. Khyzhniy, S.A. Uyutnov, E.V. Savchenko, A.N. Ponomaryov, V.E. Bondybey // Third International Conference on Radiation and

- Applications in Various Fields of Research (RAD 2015), June 8 – 12, 2015 : book of abstr. – Montenegro, Budva. – P. 42.
8. Radiation effects in atomic and molecular cryocrystals / I.V. Khyzhniy, S.A. Uyutnov, E.V. Savchenko, **A.P. Barabashov**, A.N. Ponomaryov, V.E. Bondybey // Third International Conference on Radiation and Applications in Various Fields of Research (RAD 2015), June 8 – 12, 2015 : book of abstr. – Montenegro, Budva. – P. 46.
 9. Charge accumulation and energy storage in solid nitrogen / I.V. Khyzhniy, S.A. Uyutnov, E.V. Savchenko, **A.P. Barabashov**, G.B. Gumenchuk, A.N. Ponomaryov, V.E. Bondybey // VI International Conference for Young Scientists “Low Temperature Physics”, June 2 – 5, 2015 : book of abstr. – Ukraine, Kharkiv, 2015. – P. 77.
 10. Radiation-induced desorption of excited molecules from solid nitrogen / **A.P. Barabashov**, I.V. Khyzhniy, S.A. Uyutnov, E.V. Savchenko, A.N. Ponomaryov, V.E. Bondybey // VI International Conference for Young Scientists “Low Temperature Physics”, June 2 – 5, 2015 : book of abstr. – Ukraine, Kharkiv, 2015. – P. 79.
 11. Electron-stimulated desorption of excited atoms from solid nitrogen / **A.P. Barabashov**, I.V. Khyzhniy, S.A. Uyutnov, E.V. Savchenko, A.N. Ponomaryov, V.E. Bondybey // 4th International Conference “Nanotechnologies” (Nano-2016), October 24 – 27, 2016 : book of abstr.- Georgia, Tbilisi, 2016. – P.17.
 12. Radiation-induced defects, energy storage and release in nitrogen solids / E.V. Savchenko, I.V. Khyzhniy, S.A. Uyutnov, **A.P. Barabashov**, A.N. Ponomaryov, V.E. Bondybey // 19th International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids (DPC16), July 10–15, 2016 : book of abstr.- France, Paris, 2016. – P.57.
 13. Electron-stimulated desorption of excited atoms from nitrogen films / **A.P. Barabashov**, I.V. Khyzhniy, S.A. Uyutnov, E.V. Savchenko, A.N. Ponomaryov, V.E. Bondybey // VII International Conference for Young Scientists “Low Temperature Physics”, June 6 – 10, 2016 : book of abstr. – Ukraine, Kharkiv, 2016. – P. 114.
 14. Super–strong low-temperature post-desorption from pre-irradiated solidified gases / E.V. Savchenko, I.V. Khyzhniy, S.A. Uyutnov, **A.P. Barabashov**, G.B. Gumenchuk, V.E. Bondybey // 77-th IUVSTA Workshop, Fuefiki, Japan, 17-21 August, 2016. – P. 84.
 15. Excitation-stimulated processes on the surface of solid N₂ / I.V. Khyzhniy, E.V. Savchenko, S.A. Uyutnov, **A.P. Barabashov**, A.N. Ponomaryov, V.E. Bondybey // VIII International Conference for Young Scientists “Low Temperature Physics”, May 29 – June 2, 2017 : book of abstr. – Ukraine, Kharkiv, 2017. – P. 123.
 16. Excitation-stimulated processes in the films of solid N₂ / **A.P. Barabashov**, I.V. Khyzhniy, S.A. Uyutnov, E.V. Savchenko, A.N. Ponomaryov, V.E. Bondybey // XXXIX Max Born Symposium: 5th International Symposium on Optics & its applications (OPTICS-2017), July 3-7, 2017: book of abstr. – Poland, Wroclaw, 2017 – P. 43.

17. The modification of solid nitrogen by an electron / E.V. Savchenko, I.V. Khyzhniy, S.A. Uyutnov, **A.P. Barabashov**, A.N. Ponomaryov, V.E. Bondybey // Fifth International Conference on Radiation and Applications in Various Fields of Research (RAD 2017), May 23 – 27, 2017 : book of abstr. – Serbia, Nis. – P. 200.

АНОТАЦІЯ

Барабашов А.П. Електронно-стимульовані процеси в твердому азоті. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України, Харків, 2019.

Дисертація присвячена експериментальному виявленню механізмів електронно-стимульованих явищ у твердому азоті з акцентом на десорбцію. Було виявлено десорбцію збуджених молекул та атомів з поверхні твердого азоту та отримана інформація стосовно електронних станів десорбуючих часток. Було з'ясовано, що молекули десорбують у стані S^3P_u , в той час як атоми покидають зразок у стані 4P . Визначено механізм десорбції збуджених молекул – диссоціативна рекомбінація автолокалізованих дірок. Наведено два можливих канали десорбції збуджених атомів – диссоціативна рекомбінація центрів N_3^+ з електронами та рекомбінація іонів N^+ , сформованих через збудження внутрішніх оболонок. Виявлено істотний внесок рекомбінації зарядів в електронно-стимульовану десорбцію. Представлений новий метод нестационарної десорбції, розроблений в даній роботі. Отримано нові дані стосовно просторового розподілу зарядових центрів у попередньо опромінених плівках твердого азоту. Було з'ясовано, що найбільший вміст стабільних автолокалізованих (N_4^+) і локалізованих (N_3^+) дірок досягається у шарах, близьких до інтерфейсу зразок-підкладка. Отримано дані про поведінку до цього часу не ідентифікованої смуги випромінювання на довжині хвилі 360 нм. Запропоновано можливий сценарій нейтралізації N_4^+ через так званий "клітинний ефект" і формування нейтрального кластера N_4 , як центру, відповідального за світіння на довжині хвилі 360 нм.

Ключові слова: кристалічний азот, електронно-стимульована десорбція, диссоціативна рекомбінація, десорбція збуджених часток, зарядові центри.

АННОТАЦИЯ

Барабашов А.П. Электронно-стимулированные процессы в твердом азоте. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела. – Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины, Харьков, 2019.

Диссертация посвящена экспериментальному установлению механизмов электронно-стимулированных явлений в твердом азоте с акцентом на десорбцию. Было обнаружено десорбцию возбужденных молекул и атомов с поверхности

твердого азота и получена информация об электронных состояниях десорбирующих частиц. Была получена информация о формировании и накоплении радиационно-стимулированных центров N_3^+ и N_4^+ в твердом азоте. Было обнаружено, что молекулы десорбируют в состоянии $S^3\Pi_u$, в то время как атомы покидают образец в состоянии 4P . Определен механизм десорбции возбужденных молекул - диссоциативная рекомбинация автолокализованных дырок. Приведены два возможных канала десорбции возбужденных атомов - диссоциативная рекомбинация центров N_3^+ с электронами и рекомбинация ионов N^+ , сформированных с помощью возбуждения внутренних оболочек. Выявлен существенный вклад рекомбинации зарядов в электронно-стимулированную десорбцию. Представлен новый метод нестационарной десорбции, разработанный в данной работе. Получены новые данные о пространственном распределении зарядовых центров в предварительно облученных пленках твердого азота. Корреляция выходов нестационарной люминесценции и нестационарной десорбции на длине волны атомного перехода, а также их максимум около 10К указывает на рекомбинацию зарядовых центров с электронами, которые были высвобождены из ловушек, связанных с радиационно-стимулированными дефектами. Было обнаружено, что наибольшее содержание стабильных автолокализованных (N_4^+) и локализованных (N_3^+) дырок достигается в слоях, близких к краю образца, граничащего с подложкой. Получены новые данные о поведении до сих пор не идентифицированной полосы излучения на длине волны 360 нм. Увеличение интенсивности этой полосы со временем облучения указывает на накопление радиационно-стимулированных центров в твердом азоте. Анализ спектров термостимулированной люминесценции указывает на связь полосы 360 нм с реакцией нейтрализации. Была исследована разница между центрами N_2 в азотной среде и матрично-изолированными центрами N_2 . Отсутствие полосы около 360 нм в спектре термостимулированной люминесценции матрично-изолированных центров N_2 указывает на связь этих центров с азотным центром, содержащим более чем 2 атома. Предложено возможный сценарий нейтрализации N_4^+ с помощью так называемого "клеточного эффекта" и формирование нейтрального кластера N_4 , как центра, ответственного за свечение на длине волны 360 нм.

Ключевые слова: кристаллический азот, электронно-стимулированная десорбция, диссоциативная рекомбинация, десорбция возбужденных частиц, зарядовые центры.

ABSTRACT

Barabashov A.P. Electron-stimulated processes in solid nitrogen. – Manuscript.

Thesis for a candidate's degree in physics and mathematics by speciality 01.04.07 – solid state physics. – В. I .Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of the NAS of Ukraine, Kharkov, 2019.

The dissertation presents the experimental revealing of electron-stimulated processes in solid nitrogen. The desorption of excited molecules and atoms from the surface of solid nitrogen was detected for the first time and the information on the electronic states of desorbing particles was obtained. It was found that the molecules leave the sample in the

$C^3\Pi_u$ state, while the atoms leave the sample in the 4P state. The mechanism of excited molecules desorption was determined - dissociative recombination of autolocalized holes. Two possible channels of excited atoms desorption are presented - dissociative recombination of N_3^+ centers with electrons and recombination of N^+ ions formed by excitation of internal shells. Significant contribution of charge recombination in electronically stimulated desorption was revealed. A new method of non-stationary desorption, developed in this work, is presented. New data on the space distribution of charge centers in pre-irradiated solid nitrogen films were obtained. It was found that the highest concentration of stable self-localized (N_4^+) and localized (N_3^+) holes is achieved in the layers close to the sample-substrate interface. Data on the unidentified 360 nm band were obtained. The N_4^+ neutralization scenario with the help of the so-called "cage effect" was proposed and the formation of a neutral cluster N_4 as the center responsible for the emission near 360 nm.

Keywords: crystalline nitrogen, electron-stimulated desorption, dissociative recombination, desorption of excited particles, charged centers.

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 0.9. Тир. 100 прим. Зам. № 243-19.
Підписано до друку 16.05.2019. Папір офсетний.

Надруковано з макету замовника у ФОП Бровін О.В.
61022, м. Харків, вул. Трінклера, 2, корп.1, к.19. Т. (057) 758-01-08, (066) 822-71-30
Свідоцтво про внесення суб'єкта до Державного реєстру
видавців та виготовників видавничої продукції серія ДК 3587 від 23.09.09 р.