

УДК 337.533,2:535,14:546,132
PACS number(s): 07.65.Gj

СПЕКТРАЛЬНИЙ СКЛАД ТА ПОЛЯРИЗАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПІД ЧАС БОМБАРДУВАННЯ ЕЛЕКТРОНАМИ ПОВЕРХНІ ЛУЖНО- ГАЛОЇДНИХ КРИСТАЛІВ

М. Приходько, Т. Ігнац, Л. Маркович, С. Поп

*Ужгородський національний університет,
вул. Волошина, 54, 88000 Ужгород, Україна
e-mail: QEL@univ.uzhgorod.ua*

Досліджено спектральний склад оптичного випромінювання, що виникає під час бомбардування електронами середніх енергій (50–1000 еВ) поверхонь деяких лужно-галоїдних кристалів (NaCl, KBr, LiF, KCl). Встановлено два види досліджуваного випромінювання, різних за місцем локалізації і механізмом генерації. Це характеристичне випромінювання атомів лужного металу і неперервне випромінювання в широкій області довжин хвиль. Виміряно залежності інтенсивності характеристичного і неперервного випромінювання від параметрів пучка електронів. Досліджено поляризаційні властивості спостережуваного випромінювання і проаналізовано можливі канали його утворення.

Ключові слова: оптичне випромінювання, розпорошення, лужно-галоїдний кристал.

Бомбардування електронами поверхні лужно-галоїдних кристалів (ЛГК) супроводжується ефективною емісією фотонів з області взаємодії [1]. У спектрах електрон-фотонної емісії (ЕФЕ) ЛГК присутні дві компоненти: а) характеристичне випромінювання, що емітується розпорошеними збудженими атомами лужного металу; б) неперервне випромінювання, що емітується безпосередньо бомбардуваною поверхнею. Що стосується характеристичного випромінювання, то на теперішній час запропоновано кілька моделей розпорошення ЛГК електронами [2], але жодна з них не дає змоги пояснити всі наявні експериментальні дані. Тому питання про механізм розпорошення ЛГК електронами загалом залишається відкритим, а вивчення емісії фотонів при такій взаємодії є одним із важливих джерел отримання експериментальної інформації, яка потрібна для поглиблення уявлень про це складне емісійне явище. Неперервне випромінювання пов'язується із збудженням електронами дефектів у кристалі. Типовими дефектами кристалічної структури у ЛГК є F-центри та їхні сукупності [3, 4].

Метою цієї статті є отримання експериментальних даних про спектральний склад оптичного випромінювання, що виникає під час бомбардування електронами

поверхонь деяких ЛГК, та поглиблення уявлень про механізми генерації як характеристичного, так і неперервного випромінювання.

Ми дослідили оптичне випромінювання (в діапазоні 200–800 нм), яке виникає при опроміненні ряду ЛГК (NaCl, KBr, LiF, KCl) електронами середніх енергій (50–1000 еВ). Для кристала KBr вивчено залежність характеристик випромінювання від параметрів бомбардуючого пучка (енергії, густини струму) та поляризаційні властивості цього випромінювання. Дослідження виконано на електрон-фотонному спектрометрі, який виготовлено на базі надвисоковакуумної системи УСУ–4 [5]. У якості досліджуваних зразків використовувалися пластинки монокристалів ЛГК (KBr, LiF, NaCl і KCl) розміром 8x10 мм завтовшки 2÷3 мм. Поверхня зразків перед встановленням у вакуумну камеру взаємодій шліфувалась і полірувалась. Подальше доочищення мішені здійснювалося при високому вакуумі ($P_{\text{зал.}} \leq 5 \cdot 10^{-7}$ Тор) нагріванням до температур $\sim 500^\circ\text{C}$ та опроміненням високоенергетичними електронами. Під час експериментів фоновий тиск залишкових газів у камері зіткнув становив $P_{\text{зал.}} \leq 1 \cdot 10^{-8}$ Тор. Під час дослідження енергетичної залежності інтенсивності характеристичного та неперервного випромінювання енергія бомбардуючих електронів змінювалася в діапазоні від 50 до 1 000 еВ. При цьому густина струму змінювалася від 0,1 до 5 мА/см². Діаметр пучка електронів залишався незмінним і становив ~ 4 мм. Бомбардування досліджуваного зразка відбувалося під кутом $\alpha = 15^\circ$ відносно нормалі до поверхні, а кут спостереження випромінювання вибрали близьким до нормалі ($\theta \approx 0^\circ$). Температуру мішені контролювали за допомогою термодари.

Випромінювання в ділянці довжин хвиль від 200 до 800 нм аналізували за допомогою світлосильного монохроматора МДР–12. Вхідна і вихідна щілини монохроматора становили 0,25 мм, що забезпечувало роздільну здатність 4 Å. Інтенсивність виділеного монохроматором випромінювання вимірювали в режимі лічби фотоелектронів з використанням як детектора фотоелектронного помножувача ФЭУ–106, а запис спектрів здійснювався електричним потенціометром КСП–4. Під час дослідження ступеня лінійності поляризації спостережуваного випромінювання між кварцовими лінзами конденсора встановлювався поляризатор (призма Глана-Фуко). Спектрограми свічення, яке емітується з поверхні деяких ЛГК при бомбардуванні електронами, показано на рис. 1. Температура зразків під час проведення експериментів була близькою до кімнатної ($T \approx 300\text{--}320$ К).

У всіх досліджуваних спектрах простежено неперервне випромінювання з кількома максимумами та характеристичне випромінювання атомів лужного металу. Характеристичного випромінювання збуджених атомів галогену не було виявлено на жодному з вивчених спектрів. Зі спостережень випромінювання під різними кутами до поверхні (у т.ч. вздовж поверхні) встановлено, що досліджуване неперервне випромінювання емітується безпосередньо бомбардованою поверхнею, а випромінювання збуджених атомів лужного металу локалізоване в прилеглому до поверхні просторі, тобто воно емітується відлітаючими від поверхні збудженими атомами. Протяжність ореолу свічення в напрямі нормалі до поверхні не перевищує розмірів вхідної щілини монохроматора, оскільки розпоршені електронами атоми лугу мають енергії менш ніж 1 еВ [6].

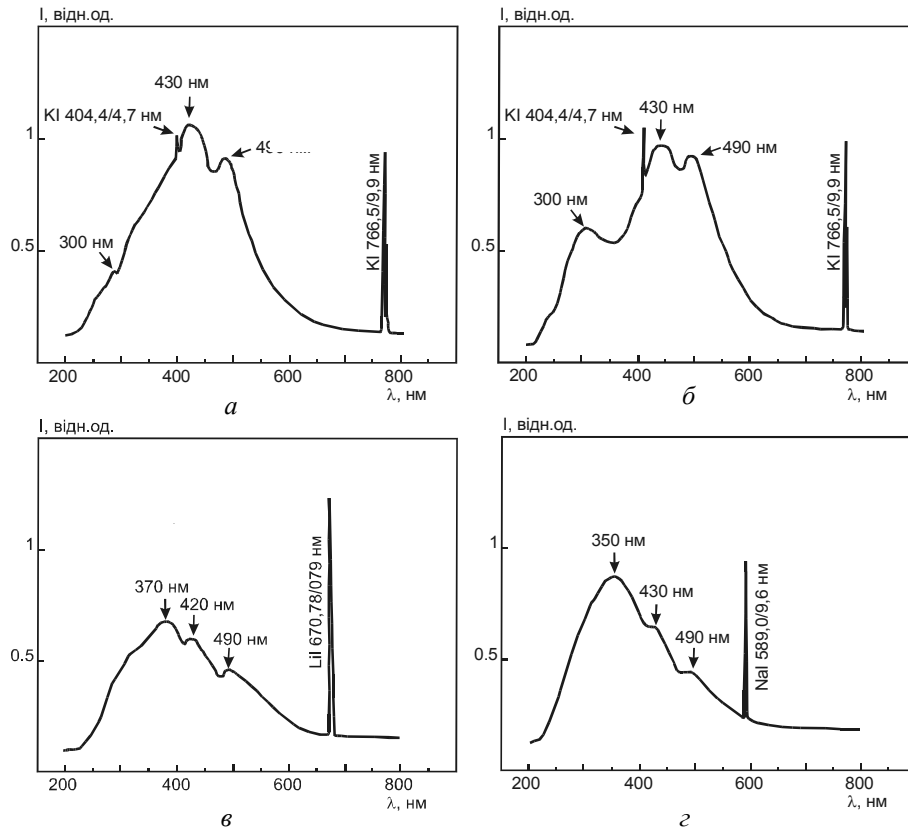


Рис. 1. Спектрограми свідчення деяких ЛГК під час бомбардування електронами: *a* – $\text{KBr} + e^-$, $E_p=600$ eВ, $I_p=300$ мкА; *б* – $\text{KCl} + e^-$, $E_p=600$ eВ, $I_p=680$ мкА; *в* – $\text{LiF} + e^-$, $E_p=600$ eВ, $I_p=660$ мкА; *г* – $\text{NaCl} + e^-$, $E_p=600$ eВ, $I_p=300$ мкА

На рис. 2 показано залежності інтенсивності ліній КІ 766,5 нм і КІ 404,4 нм для кристала KBr від струму первинних електронів (рис. 2, *a*) та інтенсивності цих же ліній та неперервного випромінювання в максимумі смуги ($\lambda_{\text{max}}=430$ нм) від енергії бомбардуючих електронів (рис. 2, *б*). Ці результати, як зазначено далі, сприяють уточненню механізму досліджуваних процесів.

Оскільки в літературі практично немає даних про поляризаційні властивості випромінювання, яке виникає при бомбардуванні ЛГК електронами, то ми виміряли ступінь поляризації як характеристичного, так і неперервного випромінювання для кристала KBr . Встановлено, що спостережуване випромінювання (як характеристичне, так і неперервне) не є лінійно поляризоване в межах похибки вимірювань ($10 \div 15\%$).

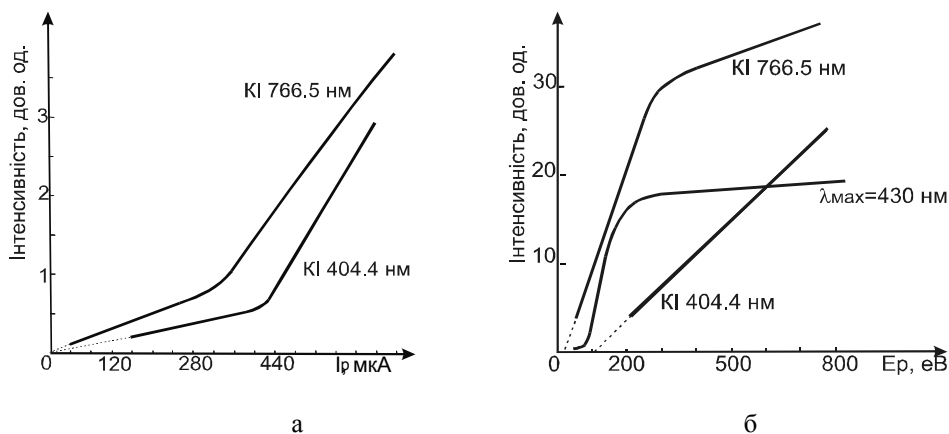


Рис. 2. Залежності інтенсивності ліній KI 766,5 і KI 404,4 нм від густини струму первинних електронів (а) і ліній KI 766,5 і KI 404,4 нм та смуги випромінювання з максимумом при 430 нм від енергії бомбардуючих електронів (б) для кристала KBr

Різні компоненти досліджених спектрів, імовірно, мають різну природу. Так, неперервне випромінювання з кількома максимумами, яке спостерігається в ділянці довжин хвиль 220-650 нм, може бути пов'язане зі збудженням у кристалі дефектів типу F-центрів різної кратності. Механізм утворення дефектів іонізуючим випромінюванням у ЛГК може бути таким: електрон, як заряджена частинка, рухаючись всередину кристала на додаток до незначного зміщення іонів із їх позицій в ґратці, може ефективно збуджувати міжзонні переходи і як результат утворювати електрон – діркові пари. Це призводить до формування автолокалізованого екситону, тобто електрона, кулонівськи зв'язаного з ковалентнозв'язаним діатомним галогенним молекулярним іоном X_2 (де X – атом галогену) [3]. Після кількох пікосекунд автолокалізований екситон релаксує, унаслідок чого може утворюватися фотон чи фонон, або шляхом безвипромінювального переходу формуватися галогенна вакансія (F-центр) чи міжвузловий атом галогену (H-центр). Визначено, що за кімнатної температури та вище процеси формування F-центрів у ЛГК є домінуючими [7]. Збудження цих дефектів мабуть і призводить до появи у досліджених спектрах смуг неперервного випромінювання. Схоже неперервне випромінювання спостерігалось і раніше під час бомбардування ЛГК електронами середніх енергій ($E_p=500 \text{ eV}$) [1] іонами інертних газів ($E_p=20 \text{ keV}$) [3] та імпульсами прискорених електронів ($E_p\sim 20 \text{ keV}$) [4]. Ця гіпотеза узгоджується з отриманою нами енергетичною залежністю неперервного випромінювання (з максимумом при 430 нм) (рис. 2, б), та з отриманою раніше [8] температурною залежністю цього ж випромінювання для кристала KBr. Зростання інтенсивності у разі підвищення енергії бомбардуючих електронів може бути зумовлено збільшенням глибини проникнення електронів у тверде тіло та, відповідно, збільшенням кількості F-центрів, утворених і збуджених на його шляху. Досягнення плато пояснюють проникненням електронів на максимальну глибину, з якої ще імовірний вихід фотонів. Крім F-центрів у ЛГК іонізуючим випромінюванням продукуються і складніші типи дефектів (F_2^- ,

F_3 -центрів), які можуть давати свої смуги люмінесценції в спектрі свічення ЛГК [3].

Що стосується розпорошення електронами атомів лужного металу в збудженому стані, то виявлені раніше аномальні коефіцієнти розпорошення електронами поверхонь ЛГК [1,7] є інтегральними характеристиками, які враховують вихід атомів в основному та збудженому станах. Останнє відкриває можливість прямого дослідження оптичним методом процесів електронного розпорошення. Отримана нами залежність спектральних ліній КІ від енергії первинних електронів (рис. 2, б) свідчить про те, що процес розпорошення має пороговий характер. Досить високі значення виявлених порогових енергій ($E_p \approx 90$ еВ) свідчать про те, що процес електронного розпорошення може здійснюватися через збудження первинними електронами електронів глибоких оболонок лужного металу або галогену. Подальша релаксація утворених дірок призведе до вивільнення енергії, яка може бути затрачена на розрив зв'язку лужного металу з кристалом і відльоту атома від поверхні в збудженому стані. На користь цієї думки свідчить і одержана нами залежність інтенсивності ліній КІ 766,5 нм і КІ 404,4 нм від струму пучка первинних електронів для кристала КВг (рис. 2, а). З рисунку видно, що інтенсивність спектральних ліній КІ лінійно залежить від струму первинних електронів у широких межах. Це свідчить про домінуючий механізм утворення збуджених станів атомів К в однократних актах зіткнень. Тобто, відсутній помітний вклад вторинного збудження термічно випарених атомів лужного металу первинними електронами в газовій фазі. Ці результати узгоджуються з даними праць [6, 7]. При вищих значеннях струму первинних електронів спостерігається стрімкіший лінійний ріст ефективності утворення збуджених атомів К. Імовірно, діє додатковий чинник, який спричинює збільшення потоку десорбованих атомів К. Є імовірність впливу густини струму первинних електронів на деяку зміну температури зразка, що може призводити до збільшення ефективності розпорошення атомів лужного металу електронами [8].

Отримано дані про спектральний склад оптичного випромінювання при бомбардуванні електронами поверхонь ЛГК. Встановлено, що в спектрі наявні два типи випромінювання, які є різними за природою випромінювачів, місцем локалізації та механізмом генерації. Неперервне випромінювання, яке локалізоване на поверхні кристала, пов'язано з утворенням автолокалізованих екситонів і збудженням F -центрів та комплексів F -центрів кристала. Характеристичне випромінювання атомів лужного металу – це стимульована електронами десорбція з поверхні атомів лужного металу у збудженому стані. Як характеристичне, так і неперервне випромінювання не є лінійно поляризованим у межах похибки вимірювань (10÷15%).

1. Yan Q., Barnes A., Barnes B., Seifert N., Albridge R., Tolk N. Optical studies of defects induced by ion bombardment of alkali halide crystals // Nucl. Instr. and Meth in Phys. Res. 1996. B115. P. 415–420.
2. Madey T.E., Yates Y.T. Electron-stimulated desorptions as a tool studies of chemisorption: a review // Y.Vac. Sci. Tech. 1971. № 8. P. 525–555.

3. *Postawa Z., Rutkowski Y., Poradzisz A., Szymonski M.* Optical excitations in electron-induced desorption of sodium from NaCl surface // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. 1988. В.34. Р. 23–31.
4. *Tolk N., Feldman L., Kraus J.* Optical radiation from electron-stimulated desorption of excited particles // Phys. Res. Lett. 1981. Vol. 46. № 2. Р. 134–137.
5. *Дробнич В.Г., Мاستюгин В.А., Охрименко С.В., Поп С.С.* Дифференциальные характеристики эмиссии возбужденных атомов Na при бомбардировке поверхности NaCl ионами K^+ // Изв. РАН. Сер. Физ. 1998. Т. 62. № 4. С. 836–839.
6. *Лисицына Л.А., Лисицын В.М., Корепанов В.Н., Гречкина Т.В.* Эффективность создания первичных радиационных дефектов в кристаллах фторидов Li и Mg // Оптика и спектроскопия. 2004. Т. 96. № 2. С. 264–268.
7. *Линтур М.І., Маркович Л.М., Мاستюгін В.О., Приходько М.В., Шароді І.С.* Надвисоковакуумний електрон-фотонний спектрометр // Наук. вісник Ужгородського ун-ту. Сер. Фізика. 2001. № 10. С. 191–194.
8. *Приходько М.В.* Електрон-фотонна емісія лужно-галогенних кристалів // Наук. вісник Ужгородського ун-ту. Серія Фізика. 2003. № 14. С. 159–163.

THE SPECTRAL CONSTITUTION AND POLARIZATION PROPERTIES OF LIGHT EMISSION UNDER ELECTRON BOMBARDING THE SURFACE OF ALKALI HALIDE CRYSTALS

M. Prikhodko, T. Ihnats, L. Markovich, S. Pop

*Uzhhorod National University,
Voloshin str., 54, UA-88000 Uzhhorod, Ukraine
e-mail: qel@univ.uzhgorod.ua*

The spectrum of photon emission from the surface of alkali halide crystals (KBr, KCl, LiF, NaCl) bombarded by medium energy electrons (50–1 000 eV) is investigated. Two species of light emission with different localization and mechanism of generation are detected. These are the characteristic emission of alkali metal atoms and continuous emission with a few maximums in a broad range of wavelengths. The intensities of the characteristic and continuous emission versus the electron beam parameters are measured. Polarization properties of the observed emission are investigated and possible channels of its formation are analyzed.

Key words: optical radiation, sputtering, alkali halide crystal.

Стаття надійшла до редколегії 19.05.2004

Прийнята до друку 21.11.2005