

# ЕЛЕКТРОН-ФОТОННА ЕМІСІЯ ЛУЖНО-ГАЛОГЕННИХ КРИСТАЛІВ

М.В.Приходько

Ужгородський національний університет,  
кафедра квантової електроніки,  
вул. Волошина, 54, Ужгород, 88000  
e-mail: qel@univ.uzhgorod.ua

Досліджено спектральний склад оптичного випромінювання, що виникає при бомбардуванні електронами середніх енергій поверхонь деяких лужно-галогенних кристалів (NaCl, KBr, LiF, NaF). Встановлено два види досліджуваного випромінювання, різні за місцем локалізації і механізмом генерації, а саме характеристичне випромінювання атомів лужного металу і неперервне випромінювання в широкій області довжин хвиль. Виміряно залежності інтенсивності характеристичного і неперервного випромінювання від параметрів пучка електронів і температури досліджуваного зразка. Проаналізовано можливі канали утворення цього випромінювання.

## Вступ

Процеси розпорошення лужно-галогенних кристалів (ЛГК) під дією електронів вивчаються впродовж багатьох десятиріч з огляду на їх широке практичне використання та наукову зацікавленість. Вони використовуються як модель для вивчення непружних процесів, оскільки мають просту кристалографічну і електронну структуру [1, 2]. До того ж, для ЛГК виявлено високу ефективність розпорошення електронами [3, 4]. Інтерес до подібних досліджень ЛГК оптичним методом зумовлений можливістю вивчення за характеристиками фотонної емісії деталей механізмів емісії фотонів як кристалом, так і відлітаючими збудженими частинками.

Безпосереднє вибивання атомів із кристала електронами первинного пучка неможливе, тому вищезгадане розпорошення пояснюють як багатостадійний процес, пов'язаний з розпадом збуджених станів кристала або поліатомних комплексів на поверхні. Запропоновано кіль-

ка моделей розпорошення [5], але жодна з них не дає можливості пояснити всі отримані на даний час експериментальні дані. Для ЛГК наявна емісія фотонів і безпосередньо з опромінюваної електронами поверхні. Її пов'язують зі збудженням дефектів у кристалі. Типовими дефектами кристалічної структури у ЛГК є F-центри та їх сукупності [6].

Метою даної роботи є отримання даних про спектральний склад оптичного випромінювання, що виникає при бомбардуванні електронами поверхонь деяких ЛГК, та встановлення механізмів генерації як характеристичного, так і неперервного випромінювання.

Нами досліджено оптичне випромінювання в спектральному діапазоні 200–800 нм, що виникає при опроміненні кристалів NaCl, KBr, LiF, NaF електронами. Вивчено види випромінювання, що виникають у спектрі електрон-фотонної емісії (ЕФЕ) ЛГК. Для кристала KBr також досліджено залежності характеристик випромінювання від параметрів бомбардуючого пучка і температури мішені.

### Експеримент

Експерименти проводилися на електрон-фотонному спектрометрі, виготовленому на базі надвисоковакуумної системи УСУ-4 [7]. У ролі мішені використовувалися монокристали ЛГК (KBr, LiF, NaCl і NaF). Поверхня зразків перед встановленням в вакуумну камеру шліфувалась і полірувалась. Подальше очищення мішені здійснювалося при високому вакуумі ( $P_{\text{зал.}} \approx 1 \times 10^{-6}$  Тор) нагріванням до температур  $\sim 500$  °C та опроміненням високоенергетичними електронами. Під час експериментів тиск залишкових газів у камері зіткнень становив  $P_{\text{зал.}} \leq 5 \times 10^{-9}$  Тор. Енергія бомбардуючих електронів під час запису спектрів свічення становила 600, 900, 950 еВ (див. рис. 1), а при дослідженні енергетичної залежності інтенсивності характеристичного та неперервного випромінювання змінювалася в діапазоні від кількох десятків до 1000 еВ. При цьому густина струму змінювалася від 0,1 до 5 мА/см<sup>2</sup>. Діаметр пучка електронів залишався незмінним і

становив  $\approx 4$  мм. Бомбардування досліджуваного зразка здійснювалося під кутом  $\alpha = 15^\circ$  відносно нормалі до поверхні. Кут спостереження вибирався близьким до нормалі ( $\theta \approx 0^\circ$ ). Температуру мішені в інтервалі 20–500 °C змінювали за допомогою підігрівного елемента і контролювали термопарою.

Випромінювання в області довжин хвиль від 200 до 800 нм аналізувалося за допомогою світлосильного монохроматора МДР-12. Вхідна і вихідна щілини монохроматора були рівними 0,25 мм, що забезпечувало роздільну здатність 4 Å. Виділене монохроматором випромінювання детектувалося фотоелектронним помножувачем ФЭУ-106, а запис спектрів здійснювався електричним потенціометром КСП-4.

### Результати і їх обговорення

Спектрограми свічення, яке емітується з поверхні деяких ЛГК при бомбардуванні електронами при кімнатній температурі, представлено на рис. 1.

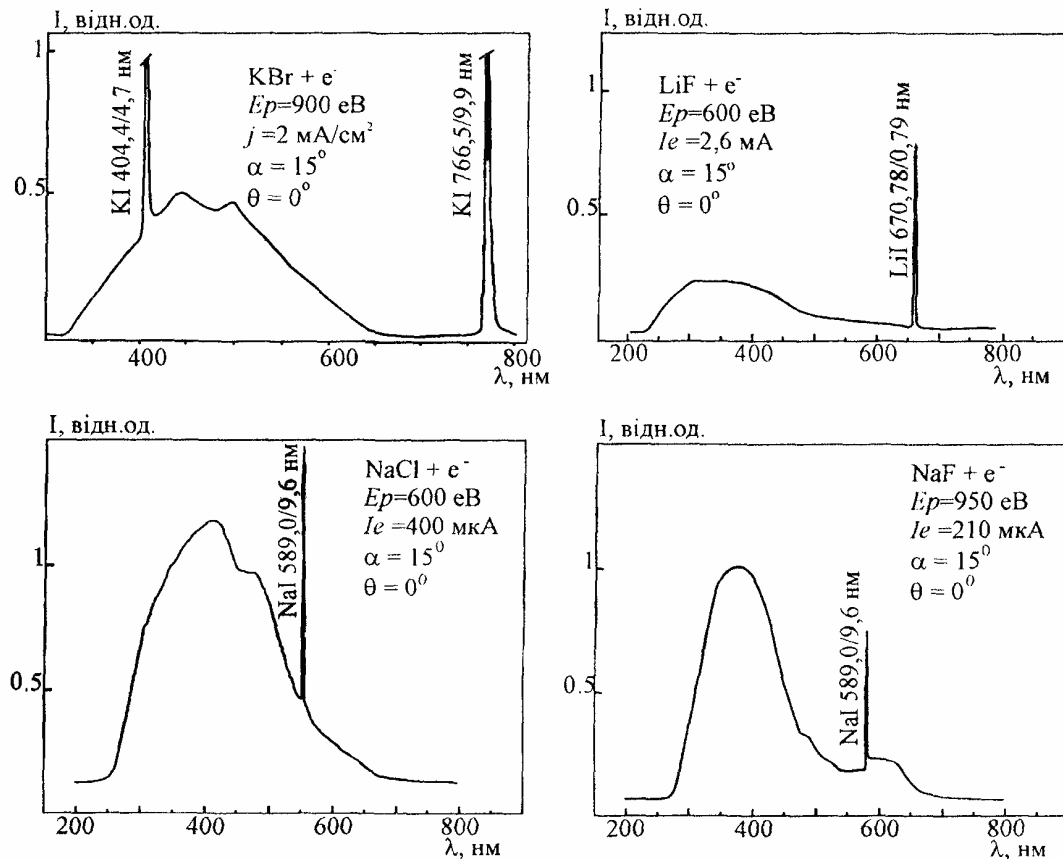


Рис. 1. Спектрограми свічення деяких ЛГК при бомбардуванні електронами.

У всіх досліджуваних спектрах спостерігається неперервне випромінювання з одним або кількома максимумами і характеристичне випромінювання атомів лужного металу. Так, для KBr характерні два максимуми ( $\lambda_1 \approx 450$  нм і  $\lambda_2 \approx 500$  нм) і спектральні лінії атомів К – два дублети KI 766,5/9,9 нм та KI 404,4/4,7 нм. У спектрі свічення кристала NaCl наявне неперервне випромінювання з двома максимумами при 400 нм і 480 нм та дублет ліній NaI 589,0/9,6 нм. У спектрі ЕФЕ NaF спостерігається неперервне випромінювання з трьома максимумами ( $\lambda_1 \approx 370$  нм,  $\lambda_2 \approx 480$  нм,  $\lambda_3 \approx 610$  нм) і спектральний дублет NaI 589,0/9,6 нм, а у спектру свічення кристала LiF – неперервне випромінювання з максимумом при  $\lambda = 300$  нм і дублет ліній LiI 679,78/0,79 нм. Для всіх досліджуваних спектрів не спостерігалось характеристичне випромінювання збуджених атомів галогену.

Із спостережень випромінювання під різними кутами до поверхні (в 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.

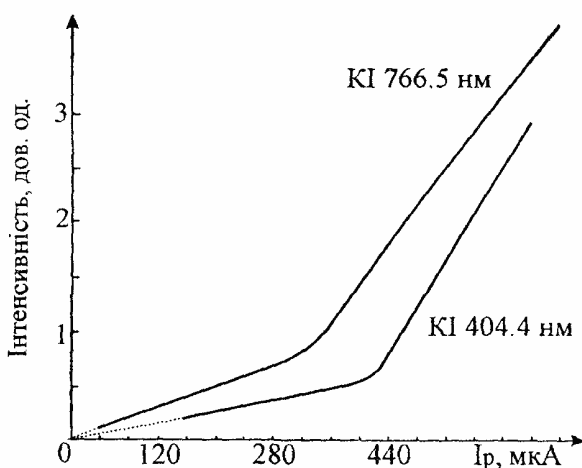


Рис. 2. Залежності інтенсивності ліній KI 766,5 нм і KI 404,4 нм від струму первинних електронів для кристала KBr.

На рис.2 представлено залежності інтенсивності ліній KI 766,5 нм і KI 404,4 нм для кристала KBr від струму первинних електронів, а на рис.3 – інтенсивності цих же ліній та неперервного випромінювання ( $\lambda_{max} = 450$  нм) від енергії бомбардуєчих електронів.

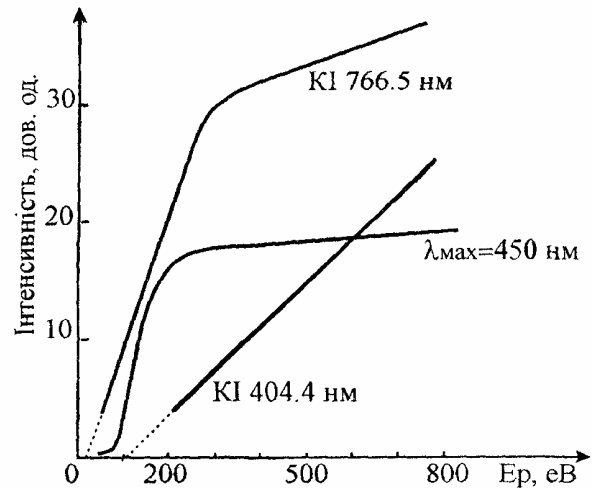


Рис. 3. Залежності інтенсивності ліній KI 766,5 нм і KI 404,4 нм від енергії первинних електронів для кристала KBr.

Різні компоненти досліджених спектрів, певно, мають різну природу. Так, неперервне випромінювання (з одним або кількома максимумами), яке спостерігається в області довжин хвиль 250–650 нм, може бути пов'язане зі збудженням у кристалі дефектів типу F-центрів різної кратності. Механізм утворення дефектів іонізуючим випромінюванням у ЛГК може бути наступним. Заряджена частинка, рухаючись всередину кристала, на додаток до зміщення іонів із їх позицій в ґратці, може збуджувати міжзонні переходи, що призводить до формування "самозахопленого екситона", тобто електрона, кулонівськи зв'язаного з ковалентно зв'язаним діатомним галогенним молекулярним іоном  $X_2^-$  [6]. Після кількох пікосекунд "самозахоплений екситон" релаксує, в результаті чого може утворюватися фонон чи фотон, або шляхом безвипромінювального переходу формуватися

галогенна вакансія (F-центр) чи міжвузловий атом галогену (H-центр). Встановлено, що при кімнатній температурі і вище процеси формування F-центрів у ЛГК є домінуючими [8]. Збудження цих дефектів у кристалі і призводить до появи у досліджених спектрах смуг неперервного випромінювання. Подібне неперервне випромінювання спостерігалося при бомбардуванні кристала NaCl (100) електронами з енергією 500 еВ авторами роботи [9] та авторами роботи [6] при бомбардуванні ЛГК іонами інертних газів з енергією ~20 кеВ. Ця гіпотеза узгоджується з одержаними нами енергетичною (рис. 3) та температурною (рис. 4) залежностями неперервного випромінювання (з максимумом при 450 нм) для кристала KBr. Зростання інтенсивності при підвищенні енергії бомбардуючих електронів може бути зумовлено збільшенням глибини проникнення електрона в тверде тіло і, відповідно, збільшенням кількості F-центрів, утворених та збуджених електроном на своєму шляху. Досягнення плато пояснюється проникненням електронів на глибину, з якої ще ймовірний вихід фотонів. Зменшення інтенсивності неперервного випромінювання, яке спостерігається при підвищенні температури кристала (рис. 4), пояснюється відпалюванням дефектів у кристалі.

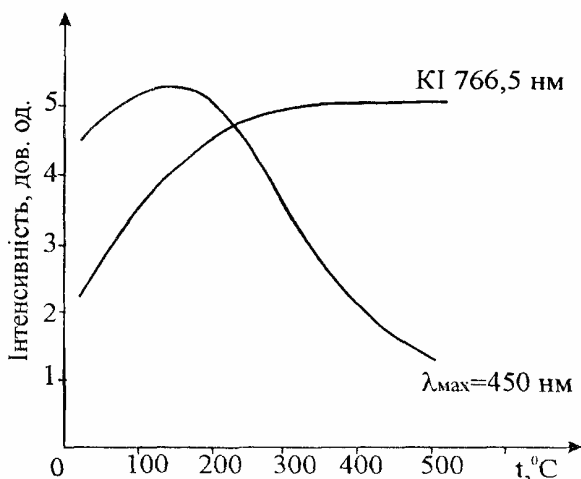


Рис. 4. Залежність інтенсивності дублету ліній KI 766,5/6,9 нм та смуги випромінювання з максимумом при 450 нм від температури мішені.

Що стосується розпорошення електронами атомів лужного металу в збудженому стані, то виявлені раніше аномальні коефіцієнти розпорошення електронами поверхонь ЛГК [3, 4] є інтегральними характеристиками, які враховують вихід атомів в основному і збудженому станах. Це відкриває можливість прямого дослідження оптичним методом процесів розпорошення. Отримана нами залежність спектральних ліній KI від енергії первинних електронів (рис. 3) вказує, що процес розпорошення має пороговий характер. Досить високі значення виявлених порогових енергій ( $E_n \geq 50$  еВ) свідчать про те, що процес електронного розпорошення може відбуватися через збудження первинними електронами електронів глибоких електронних оболонок лужного металу або галогену. Подальша анігіляція утворених дірок призведе до вивільнення енергії, яка може бути затрачена на розрив зв'язку атома лужного металу з кристалом і його відльоту від поверхні в збудженому стані. На користь цієї думки свідчить і одержана нами залежність інтенсивності ліній KI 766,5 нм і KI 404,4 нм від струму пучка первинних електронів для кристала KBr (рис. 2). Із залежності слідує, що інтенсивність спектральних ліній лінійно залежить від струму первинних електронів у широких межах, що вказує на домінуючий механізм формування збуджених станів атомів K в однократних актах зіткнень, тобто відсутній помітний вклад збудження термічно випарених атомів лужного металу первинними електронами в газовій фазі, що узгоджується з результатами робіт [10, 11]. При більш високих значеннях струму первинних електронів спостерігається більш стрімкий, лінійний ріст ефективності утворення збуджених атомів K. Імовірно, має місце включення додаткового чинника, який спричинює збільшення потоку десорбованих атомів K. Не виключається вплив густини струму первинних електронів на деяку зміну температури зразка. Її підвищення, як видно з рис. 4, веде до збільшення інтенсивності лінії KI 766,5 нм.

### Висновки

Отже, отримано дані про спектральний склад оптичного випромінювання при бомбардуванні електронами поверхонь деяких ЛГК. Встановлено, що в спектрі наявні два типи випромінювання, які є різними за природою випромінювачів, місцем локалізації та ме-

ханізмом генерації. Неперервне випромінювання, яке локалізоване на поверхні кристалу, пов'язане з утворенням "самозахоплених 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.

### Література

1. N.H.Tolk, Desorption Induced by Electronic Transitions (Springer-Verlag, Berlin, 1983).
2. N.Itoh, K.Tanimura, Radiat. Eff. 98, 269 (1986).
3. M.Szymonski, J.Rutkowski, A.Poradzisz, Z.Postawa, B.Jorgensen, in: Springer Series in Surface Science (Springer, Berlin, Heidelberg, 1984), vol. 4, p. 457.
4. N.Neidhart, M.Sporn, M.Schmid, P.Varga, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 101, 127 (1995).
5. T.E.Madey, J.T.Yates, J. Vac. Sci. Tech. 8, 525 (1971).
6. Q.Yan, A.Y.Barnes, N.Seifert, R.Albridge, N. Tolk, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 115, 415 (1996).
7. М.І.Лінтур, Л.М.Маркович, В.О.Мастюгін, М.В.Приходько, І.С.Шароді, Науковий вісник Ужгородського університету, сер. фіз. 10, 191 (2001).
8. N.Itoh, K.J.Tanimura, Phys. Chem. Solids. 51, 679 (1990).
9. Z.Postawa, J.Rutkowski, A.Poradzisz, M.Szymonski, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 34, 23 (1988).
10. N.Tolk, L.Feldman, J.Kraus, Phys. Rev. Lett. 46, 134 (1981).
11. В.Г.Дробнич, В.А.Мастюгін, С.В.Охрименко, С.С.Поп, Изв. РАН., сер. физ. 62, 836 (1998).

## ELECTRON-PHOTON EMISSION OF ALKALI HALIDE CRYSTALS

**M.V.Prikhodko**

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

The spectrum of photon emission from the surface of alkali-halide crystals (KBr, LiF, NaCl and NaF), bombarded by medium-energy electrons, is investigated. Two species of light emission with different nature, localization and mechanism of generation are detected in the spectra. These are the characteristic emission of alkali metal atoms and continuous emission in a broad range of wavelengths. The intensities of the characteristic and continuous emission versus the electron beam parameters and target temperature are plotted. Possible channels of formation of the light emission are analyzed.