

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

АБСОЛЮТНИЙ ВИХІД ФОТОНІВ ПІД ЧАС ЕЛЕКТРОННОГО ОПРОМІНЕННЯ ПОВЕРХНІ КВr

М. Приходько, М. Лінтур, Л. Маркович, С. Поп

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

Методом електрон-фотонної спектроскопії досліджено спектральний склад оптичного випромінювання, яке виникає при бомбардуванні електронами середніх енергій поверхні монокристалу КВr. Отримано спектр електрон-фотонної емісії КВr з урахуванням чутливості системи реєстрації. В досліджуваному спектрі встановлено два види випромінювання, які є різними за місцем локалізації і механізмом генерації. Виміряні залежності інтенсивності досліджуваного випромінювання від параметрів пучка електронів. Обраховано абсолютний вихід фотонів при опроміненні монокристалу КВr електронами з енергією 600 еВ.

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

Взаємодія електронів з поверхнею лужно-галогенних кристалів (ЛГК) супроводжується їх ефективним розпорошенням [1–4]. Хоча було проведено багато робіт з дослідження десорбції іонів і нейтралей у збудженому або основному стані з поверхні ЛГК під дією пучка електронів, дані сумарного виходу розпорошення та абсолютного виходу фотонів у наукових джерелах не трапляються. З іншого боку, ці величини можуть бути важливими для можливості технологічного використання явища електрон-стимульованої десорбції. Крім цього, вони можуть допомогти нам у детальнішому розумінні механізмів та процесів електронного розпорошення ЛГК, оскільки на сьогодні немає єдиної думки щодо механізму формування збуджених станів десорбованих атомів та іонів [2, 3, 5–7]. У літературі ми знайшли лише одні дані про сумарний вихід розпорошення ЛГК електронами, які були виміряні Шиманські та ін. [1] на кристалі NaCl під час бомбардування електронами з енергією 500 еВ. Цей вихід було визначено методом вимірювання розміру кратера пошкодження і становив приблизно 14 ат./ел. Даних про абсолютний вихід фотонів для ЛГК в літературі ми не знайшли, тому має зміст проведення цих експериментів.

Метою цієї роботи є отримання експериментальних даних щодо спектрального складу оптичного випромінювання, що виникає під час бомбардування електронами поверхні КВr, та поглиблення уявлень про механізми генерації як характеристичного, так і неперервного випромінювання.

Дослідження виконано з використанням електрон-фотонного спектрометра, який ми виготовили за надвисоковакуумною системою УСУ-4 [8]. Як досліджуваний зразок було використано пластинку монокристала КВг. Поверхню зразка перед встановленням у вакуумну камеру взаємодій шліфували і полірували. Подальше доочищення мішені відбувалося за високого вакууму ($P_{\text{зал.}} \leq 1 \cdot 10^{-6}$ Тор) нагріванням до температур $\sim 500^\circ\text{C}$ та опроміненням високоенергетичними електронами. Під час експериментів фоновий тиск залишкових газів у камері зіткнень становив $P_{\text{зал.}} \leq 5 \cdot 10^{-7}$ Тор. Бомбардування досліджуваного зразка здійснювалось під кутом $\alpha = 15^\circ$ відносно нормалі до поверхні, а кут спостереження випромінювання вибирали близьким до нормалі.

Випромінювання в області довжин хвиль від 200 до 800 нм аналізували за допомогою світлосильного монохроматора МДР-12. Вхідна і вихідна щілини монохроматора становила 0,25 мм, що забезпечувало роздільну здатність 4 Å. Інтенсивність виділеного монохроматором випромінювання вимірювали в режимі лічби фотоелектронів з використанням у якості детектора фотоелектронного помножувача ФЭУ-106, а записували спектри за допомогою електричного потенціометра КСП-4. Для отримання виду спектра електрон-фотонної емісії (EFE) КВг та розрахунку абсолютного виходу фотонів з його поверхні було використано виміряну нами спектральну чутливість системи реєстрації, яку показано на рис. 1.

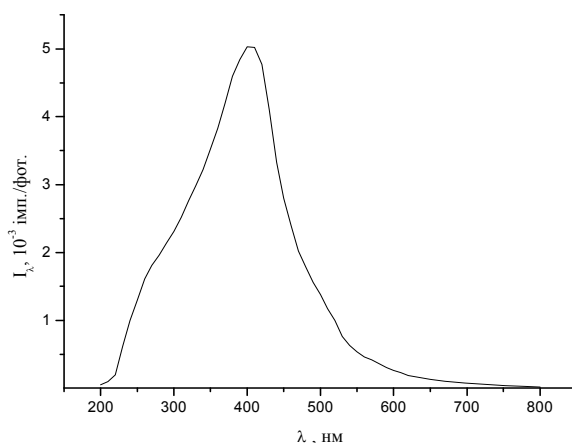
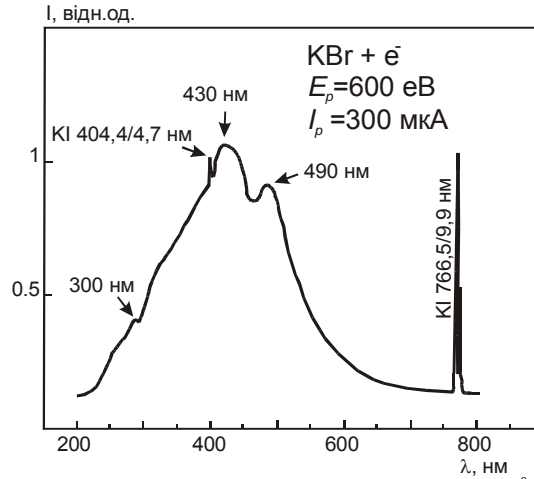


Рис. 1. Спектральна чутливість системи реєстрації

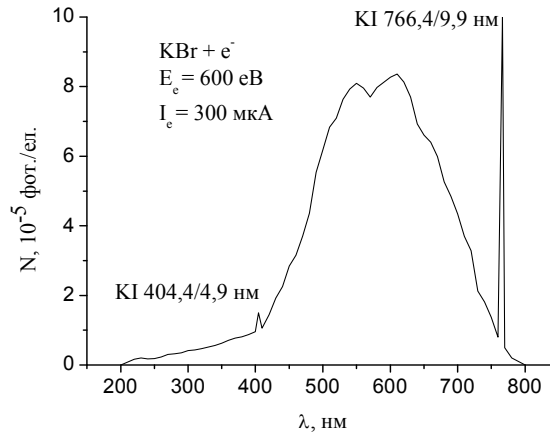
Спектрограму свічення, яке емітується з поверхні КВг під час бомбардування електронами з енергією 600 еВ показано на рис. 2. Температура зразка під час проведення експериментів була близькою до кімнатної ($T \approx 300\text{--}320$ К).

У досліджуваному спектрі простежено неперервне випромінювання з двома явними максимумами та характеристичне випромінювання атомів калію.

Рис. 2. Спектрограма ЕФЕ кристала КВг ($\alpha=15^0$, $\theta=0^0$)

Характеристичного випромінювання збуджених атомів галогена у спектрі не було виявлено. Зі спостережень випромінювання під різними кутами до поверхні (у т. ч. вздовж поверхні) визначено, що досліджуване неперервне випромінювання емітується безпосередньо бомбардуваною поверхнею, а випромінювання збуджених атомів лужного металу локалізоване у прилеглому до поверхні просторі, тобто воно емітується відлітаючими від поверхні збудженими атомами.

На рис. 3 показано спектри ЕФЕ кристала КВг при бомбардуванні електронами з урахуванням спектральної чутливості системи реєстрації, показаної на рис. 1, унаслідок чого відбувається суттєве зміщення максимумів неперервного випромінювання.

Рис. 3. Спектр ЕФЕ кристала КВг з урахуванням чутливості системи реєстрації ($\alpha=15^0$, $\theta=0^0$)

На рис. 4 показано залежності інтенсивності ліній КІ 766,5 і КІ 404,4 нм для кристала КВг від струму первинних електронів (рис. 4). Ці результати, як зазначено далі, сприяють уточненню механізму досліджуваних процесів.

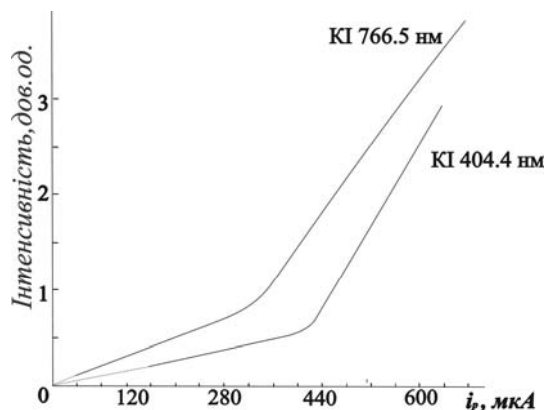


Рис. 4. Залежності інтенсивності ліній КІ 766,5 і КІ 404,4 нм від струму первинних електронів для кристала КВг

Якщо керуватися спектром, представленим на рис. 3, ми розрахували абсолютний вихід фотонів для кристала КВг під час бомбардування електронами з енергією 600 еВ, який становить, відповідно:

$$N = 2 \cdot 10^{-2} \text{ фот./ел.}$$

Різні компоненти дослідженого спектра мають різну природу. Зокрема, неперервне випромінювання з кількома максимумами, яке простежено в області довжин хвиль 220–650 нм (рис. 2), може бути пов'язане зі збудженням у кристалі дефектів типу F-центрів різної кратності. Механізм утворення дефектів іонізуючим випромінюванням у ЛГК детально описано у праці [5]. До того ж встановлено, що за кімнатної температури та вище процеси формування F-центрів у ЛГК домінують [7]. Таке неперервне випромінювання простежене і раніше під час бомбардування ЛГК електронами середніх енергій ($E_p=500$ еВ) [1] та іонами інертних газів ($E_p=20$ кеВ) [5]. Крім F-центрів у ЛГК іонізуючим випромінюванням продукуються і складніші типи дефектів (F_2^- , F_3^- -центрів), які також мають свої смуги люмінесценції у спектрах свічення ЛГК [5].

Що стосується розпорошення електронами атомів калію у збудженому стані, то виявлені раніше аномальні коефіцієнти розпорошення електронами поверхонь ЛГК [1,3,7] підтверджуються обчисленим високим значенням абсолютного виходу фотонів для кристала КВг ($\sim 10^{-2}$ фот./ел.). Вважаємо, 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 його відльоту від поверхні у збудженому стані. На користь цієї думки свідчить і отримана нами залежність інтенсивності ліній КІ 766,5 і КІ 404,4 нм від струму пучка первинних електронів для кристала КВг (рис. 4). З рисунка бачимо, 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 у газовій фазі. Ці результати узгоджуються з даними праць [2, 6, 7]. За вищих значень струму первинних електронів простежено стрімкіший лінійний ріст ефективності утворення збуджених атомів К. Імовірно, дієвим є додатковий чинник, який спричинює збільшення потоку десорбованих атомів К. Імовірний вплив густини струму первинних електронів на деяку зміну температури зразка, що може зумовити до збільшення ефективності розпорошення атомів лужного металу електронами.

Отримано дані про спектральний склад оптичного випромінювання у разі бомбардування електронами поверхні КВг. Визначено, що в спектрі наявні два типи випромінювання, які є різними за природою випромінювачів, місцем локалізації та механізмом генерації. Це неперервне випромінювання, яке локалізоване на поверхні кристала і пов'язане з утворенням і збудженням F-центрів та комплексів F-центрів кристала та характеристичне випромінювання атомів лужного металу – це стимульована електронами десорбція з поверхні атомів лужного металу у збудженому стані. Розраховано абсолютний вихід фотонів для кристала КВг при бомбардуванні електронами з енергією 600 eV, який становить $2 \cdot 10^{-2}$ фот./ел.

1. *Postawa Z., Rutkowski J., Poradzisz A., Szymonski M.* Optical excitations in electron-induced desorption of sodium from NaCl surface // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. 1988. B. 34. P. 23–31.
2. *Hudson L.T., Tolk N.H., Bao C., Nordlander P., Russell D.P.* Electron- and photon-stimulated desorption of atomic hydrogen from radiation-modified halide surfaces // Phys. Rev B. 2000. Vol. 62. N 15. P. 10535–10543.
3. *Postawa Z., Rutkowski J., Poradzisz A., and et. al.* Atomic excitation electron- and ion-induced sputtering of alkali halides // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. 1987. B. 18. P. 574–581.
4. *Сушкова Ю.В., Еловигов С.С., Шахурин Е.С., Куницина А.А.* Распыление ионами и электронами щелочно-галогенидных материалов // Поверхность: физ., хим., мех. 1992. № 12. С. 99–101.
5. *Yan Q., Barnes A., 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. B. 115. P. 415–420.
6. *Дробнич В.Г., Мастюгин В.А., Охрименко С.В., Пон С.С.* Дифференциальные характеристики эмиссии возбужденных атомов Na при бомбардировке поверхности NaCl ионами К // Изв. РАН. Сер. физ. 1998. Т. 62. № 4. С. 836–899.
7. *Tolk N., Feldman L., Kraus J.* Optical radiation from electron-stimulated desorption of excited particles // Phys. Res. Lett. 1981. B. 46. N 2. P. 134–137.
8. *Лінтур М.І., Маркович Л.М., Мастюгін В.О., Приходько М.В., Шароді Ш.С.* Надвисоковакуумний електрон-фотонний спектрометр // Наук. вісник Ужгород. ун-ту. Серія фіз. 2001. № 10. С. 191–194.

**ABSOLUTE YIELD OF PHOTONS UNDER ELECTRONS IRRADIATION
OF KBr SURFACE****M. Prikhodko, M. Lintur, L. Markovich, S. Pop**

*Uzhgorod National University, Department of Quantum Electronics
Voloshin Str., 54, UA-88000 Uzhhorod, Ukraine
e-mail: qel@univ.uzhgorod.ua*

The spectrum of photon emission from the surface of monocrystal KBr, bombarded by medium-energy electrons, was investigated using the method of electron-photon spectroscopy. Spectrum of the electron-photon emission of KBr including the curve of sensitivity of the registering system was obtained. In the investigated spectrum two species of light emission, with different localization and mechanism of the generation was detected. The intensities of the investigated emission versus the electron beam parameters are plotted. The absolute yield of the photons was calculated under bombardment by 600 eV electron beam monocrystal KBr

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

Стаття надійшла до редколегії 17.05.2006
Прийнята до друку 09.06.2008