

# ВІСНИК ЛЬВІВСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Серія фізична

ВИПУСК 36



Львівський національний університет імені Івана Франка

2003

**Вісник Львівського університету. Серія фізична. 2003. Вип. 36.**

**Visnyk of Lviv University. Series Physical. 2003. № 36.**

У "Віснику Львівського університету. Серія фізична" опубліковані статті з актуальних проблем теоретичної фізики, матеріалознавства, фізики металів, напівпровідників та діелектриків.

Для наукових працівників, аспірантів і студентів старших курсів.

Papers on current problems in theoretical physics, matherial science, physics of metal, semiconductors and insulators are published in the Visnyk.

For researchers, post-graduates and senior students.

**Редакційна колегія:** д-р фіз.-мат. наук, проф. *І. Вакарчук* (відп. ред.), д-р фіз.-мат. наук, проф. *Й. Стахіра* (заст.відп.ред.), д-р фіз.-мат. наук, проф. *І. Болеста* (відп.секр.), д-р фіз.-мат. наук, проф. *Л. Блажисєвський*, д-р фіз.-мат. наук, проф. *М. Ваврух*, д-р фіз.-мат. наук, проф. *І. Половинко*, д-р фіз.-мат. наук, проф. *М. Романюк*, д-р фіз.-мат. наук, проф. *З. Стасюк*, д-р фіз.-мат. наук, проф. *П. Якібчук*, канд. фіз.-мат. наук, проф. *Р. Луців*.

**Editorial board:** *I. Vakarchuk* (editor-in-chief), *Y. Stakhira* (associoate editor), *I. Bolesta* (responsible editor), *L. Blazhyevskyy*, *M. Vavrukh*, *I. Polovynko*, *M. Romanyuk*, *Z. Stasyuk*, *P. Yakibchuk*, *R. Luciv*.

Адреса редакційної редколегії:  
Львівський національний університет  
імені Івана Франка, фізичний  
факультет,  
вул. Драгоманова, 50,  
79005 Львів  
тел.(0322) 72-93-45, 79-43-29

Editorial address:  
Ivan Franko National University  
of Lviv  
Physics department  
Dragomanova st. 50  
UA-79005 Lviv, Ukraine  
tel. +(38) (0322) 72-93-45, 79-43-29

Відповідальний за випуск *І. Болеста*

Редактор *М. Мартиняк*

Комп'ютерна верстка *О. Дуда, С. Вельгош*

Рекомендовано до друку Вченою Радою  
Львівського національного університету імені Івана Франка

© Львівський національний університет імені  
Івана Франка, 2003



## ЗМІСТ

<i>А. Волошиновський.</i> Остовно-валентна люмінесценція широкощілинних діелектричних кристалів	3
<i>М. Ковальчук, М. Гірняк.</i> Дослідження фізичних умов формування фаунгоферових ліній у сонячній фотосфері	19
<i>О. Миколайчук, Н. Луцик, В. Присяжнюк, О. Буберняк.</i> Вплив умов осадження на структуру конденсатів Gd-Fe	24
<i>В. Грабовський, О. Дзендзелюк, Г. Дуцяк.</i> Визначення вмісту $^{137}\text{Cs}$ в окремих видах нижчих рослин та грибів Шацького національного природного парку (Волинська область)	30
<i>Я. Довгий, А. Франів, С. Тернавська.</i> Комбінаційне розсіяння світла в системі $\text{In}_x\text{Tl}_{1-x}\text{J}$ : теоретико-груповий аналіз	34
<i>В. Купрієвич, О. Капітанчук, О. Шрамко.</i> Багатозарядові аніони фулере-ну $\text{C}_{60}$ : ікосаедрична симетрія та електронна кореляція	42
<i>Н. Богуславська, Є. Венгер, Ю. Пасічник, К. Шпортко.</i> Дисперсійна залежність та просторова структура поля сингулярних поверхневих поляритонів в 6H-SiC	49
<i>В. Маслюк, В. Різак, І. Різак.</i> <i>Ab initio</i> розрахунок фізичних властивостей аніонів безводних боратів $[\text{B}_3\text{O}_6]^{3-}$ , $[\text{B}_3\text{O}_7]^{5-}$ і $[\text{B}_4\text{O}_9]^{9-}$	55
<i>Г. Чуйко, В. Івченко, Н. Дон.</i> Отримання гамільтонової матриці для кристалів класу $A_3^{\text{II}}B_2^{\text{V}}$ з симетрійних міркувань	61
<i>В. Рубін, В. Лазур, М. Меліка.</i> Метод ВКБ і релятивістичні потенціальні моделі	67
<i>К. Шпортко, Ю. Пасічник, Н. Богуславська, Є. Венгер.</i> Фононні поляритони $\text{ZnSiP}_2$	77
<i>А. Заворотний, В. Касьянюк.</i> Парето-оптимальна інтерполяція зображення об'єкта, сформованого оптичною системою	86
<i>С. Субота.</i> Виникнення фазової дислокації під час самодії гаусового пучка світла в нематіку	91
<i>О. Шпотюк, І. Гадзаман, Р. Охримович, М. Ваків, І. Брунець.</i> Товстоплівкові терморезисторні елементи на основі твердих розчинів $(\text{Ni}, \text{Co}, \text{Mn}, \text{Cu})_3\text{O}_4$	97
<i>І. Вірт, М. Білик.</i> Шумова спектроскопія дефектів у кристалах CdTe	102
<i>Т. Шаповал, Л. Бекен'юв, Д. Богайчук.</i> Вплив особливостей будови $\text{Fe}_{4-y}\text{Al}_y\text{C}_x$ -фази на орієнтування $\alpha$ -мартеситу в сплавах Fe-Al-C	106
<i>М. Приходько, М. Лінтур, Л. Маркович.</i> Емісія фотонів у разі взаємодії електронів з поверхнею лужно-галогенних кристалів	110
<i>І. Проценко, А. Чорноус, І. Шпетний.</i> Дифузійні процеси у двошарових металевих плівках	116
<i>М. Лінтур, Н. Аль-Дургам, Л. Маркович, І. Шароді, О. Штайнкулглер.</i> Електрон-фотонна емісія кремнію	123
<i>Ю. Гончаренко, Ф. Кієва.</i> Деякі моделі впливу сонячних спалахових подій на умови далекого тропосферного поширення радіохвиль	128
<i>Д. Кайнц, О. Грабар, А. Горват.</i> Доменна структура кристалів сегнето-електриків-напівпровідників	134



УДК 537.533.2: 535.14: 546.132  
PACS number(s): 07.65.Gj

## ЕМІСІЯ ФОТОНІВ У РАЗІ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОНІВ З ПОВЕРХНЕЮ ЛУЖНО-ГАЛОГЕННИХ КРИСТАЛІВ

М. Приходько, М. Лінтур, Л. Маркович

Ужгородський національний університет,

88000, м. Ужгород, вул. Волошина, 54, Україна

e-mail: [OEL@univ.uzhgorod.ua](mailto:OEL@univ.uzhgorod.ua)

Методом електрон-фотонної спектроскопії досліджено спектральний склад оптичного випромінювання, що виникає під час бомбардування електронами середніх енергій (100-1000 eV) поверхонь деяких лужно-галогенних кристалів, зокрема KBr, LiF, NaCl і NaF. Визначено два види досліджуваного випромінювання, різні за місцем локалізації і механізмом генерації. Це характеристичне випромінювання атомів лугу, розпорошених у збудженому стані бомбардувальним електронним пучком і неперервне випромінювання в широкій ділянці довжин хвиль, емітоване безпосередньо бомбардуваною поверхнею. Проаналізовано можливі канали утворення цього випромінювання. Виміряно залежності інтенсивності характеристичного і неперервного випромінювання від параметрів пучка електронів та від температури досліджуваного зразка.

*Ключові слова:* електрон-фотонна емісія, розпорошення, лужно-галогенні кристали.

Процеси розпорошення лужно-галогенних кристалів (ЛГК) електронними пучками вивчали впродовж багатьох десятиріч з огляду на їхнє широке практичне застосування [1,2]. Лужно-галогени часто використовують і як модель для вивчення непружних процесів, оскільки вони мають просту кристалографічну й електронну структуру. До того ж, для ЛГК виявлено високу ефективність розпорошення електронами [3,4]. Безпосереднє вибивання атомів мішені електронами первинного пучка неможливе. Тому згадане вище розпорошення пояснюють як багатостадійний процес, пов'язаний з розпадом збуджених станів кристала або поліатомних комплексів на поверхні. Запропоновано кілька моделей розпорошення [5-8], проте жодна з них не може пояснити всі експериментальні дані чи описати деталі фізичних процесів, що відбуваються в разі розпорошення цих матеріалів. У ЛГК виникає також емісія фотонів безпосередньо з опромінюваної електронами поверхні. Причиною такого випромінювання є збудження дефектів у кристалі. Типовими дефектами структури у ЛГК є F-центри і сукупності F-центрів [9].

Ми дослідили оптичне випромінювання (200-800 nm), що виникає в разі опромінення поверхні ряду ЛГК (NaCl, KBr, LiF, NaF) електронами з енергіями



50-1000 еВ і густиною струму 0,1-5 мА/см<sup>2</sup>. Вивчено види випромінювання, що виникають у спектрі електрон-фотонної емісії (ЕФЕ) ЛГК, а також залежності характеристик випромінювання від параметрів бомбардувального пучка і температури досліджуваних зразків.

Інтерес до дослідження ЛГК оптичним методом зумовлений перспективою одержання за характеристиками фотонної емісії інформації, яка важлива для з'ясування деталей механізмів емісії фотонів як із кристала, так і відлітаючими збудженими частинками (розпорошеними або десорбованими).

Експерименти проводили на електрон-фотонному спектрометрі, виготовленому на базі надвисоковакуумної системи УСУ-4 [10]. Схема експерименту показана на рис. 1. Як мішень використовували монокристали ЛГК (KBr, LiF, NaCl і NaF). Поверхню мішеней перед встановленням у вакуумну камеру взаємодій шліфували і полірували. Подальше очищення мішеней виконували у вакуумній камері нагріванням зразка до температури близько 500° С і опроміненням енергетичними електронами. Тиск залишкових газів у камері зіткнень становив  $P_{\text{зп.}} \leq 5 \cdot 10^{-9}$  Тор. Мішень бомбардували пучком моноенергетичних електронів із зміною їхньої енергії  $E_p$  від кількох до 1000 еВ. Густина струму електронів змінювалась від 0,1 до 5 мА/см<sup>2</sup>. Діаметр пучка електронів був незмінним і становив  $\approx 4$  мм. Бомбардування досліджуваного зразка виконували під кутом  $\alpha = 15^\circ$  відносно нормалі до поверхні. Кут спостереження вибирали близьким до нормалі ( $\theta \approx 0^\circ$ ). Температуру мішеней в інтервалі 20-500° С змінювали за допомогою підігрівного елемента і контролювали термопарою.

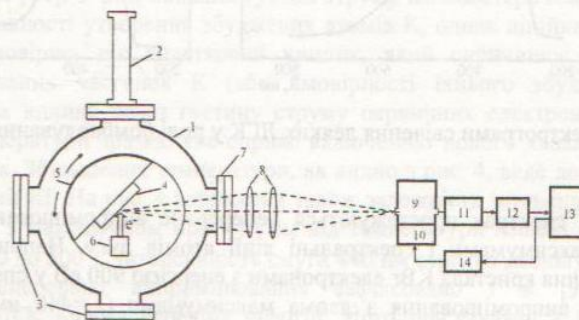


Рис. 1. Схема експерименту. 1 - робоча камера; 2 - шток шлюзового пристрою; 3 - допоміжні фланці; 4 - досліджуваний зразок; 5 - робочий стіл; 6 - електронна гармата; 7 - сапфірове віконце; 8 - конденсор; 9 - монохроматор; 10 - кроковий двигун обертання дифракційної ґратки; 11 - фотопомножувач; 12 - підсилювач - дискримінатор; 13 - потенціометр; 14 - блок керування кроковим двигуном.

Випромінювання в діапазоні довжин хвиль від 200 до 800 нм аналізували за допомогою світлосильного монохроматора МДР-12. Вхідна і вихідна щілини монохроматора дорівнювали 0,25 мм, що забезпечувало роздільну здатність 4Å. Виділене монохроматором випромінювання детектували фотоелектронним помножувачем типу ФЭУ-106, який працював у режимі підрахунку окремих

фотоелектронів. Записували спектри за допомогою електричного потенціометра КСП-4.

Спектрограми свідчення, яке емітується під час бомбардування електронами поверхонь деяких ЛГК при кімнатній температурі, зображено на рис. 2.

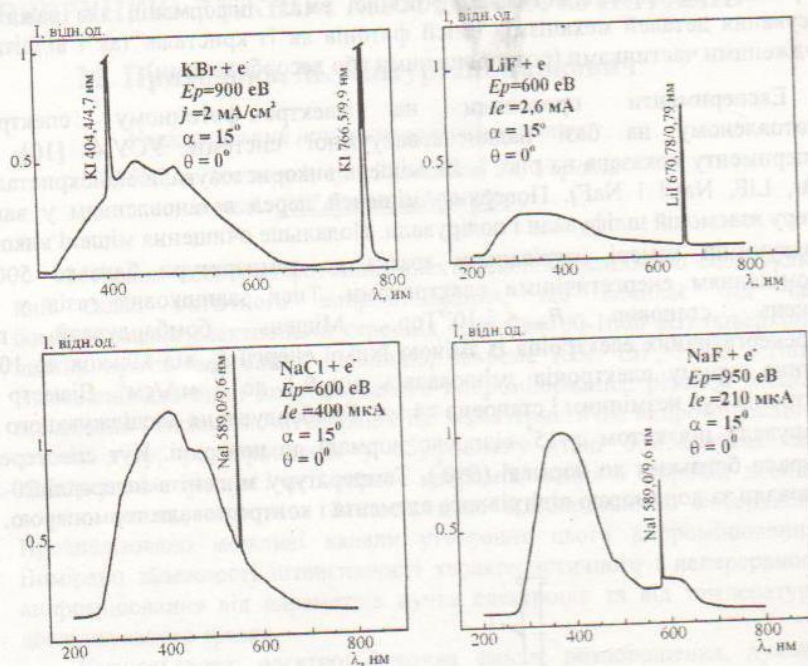


Рис. 2. Спектрограми свідчення деяких ЛГК у ролі бомбардування електронами.

У всіх спектрах простежуються неперервне випромінювання з одним або кількома максимумами і спектральні лінії атомів лугу. Наприклад, у випадку бомбардування кристала KBr електронами з енергією 900 eB у спектрі зафіксовано неперервне випромінювання з двома максимумами ( $\lambda_1 \approx 440$  нм і  $\lambda_2 \approx 500$  нм) і спектральні лінії атомів K. Це два дублети KI 766,5/9,9 нм і KI 404,4/4,7 нм. У спектрі свідчення кристала NaCl під час бомбардування його електронами з енергією 600 eB, наявне неперервне випромінювання з двома максимумами при 400 і 480 нм та дублет ліній NaI 589,0/9,6 нм, що їх емітують розпорошені збуджені атоми Na, що узгоджується з результатами [11]. У спектрі ЕФЕ NaF ( $E_p = 950$  eB) простежується 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. У всіх спектрах нема випромінювання збуджених атомів галогену. Шляхом спостереження випромінювання під різними кутами до поверхні (у тім числі уздовж поверхні) з'ясовано, що спостережуване неперервне випромінювання емітується безпосередньо бомбардованою поверхнею. Водночас випромінювання збуджених атомів лугу локалізоване в прилеглому до поверхні просторі, тобто воно емітується відлітаючими від поверхні збудженими атомами.



На рис. 3 показано залежності інтенсивності ліній KI 766,5 і KI 404,4 нм від густини струму (а) й енергії первинних електронів (б) для кристала KBr.

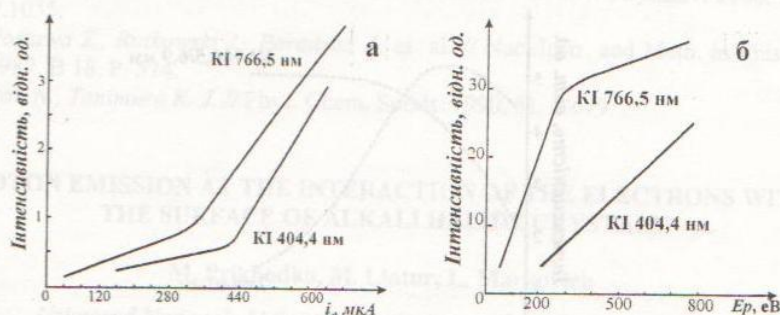


Рис. 3. Залежності інтенсивності ліній KI 766,5 нм і KI 404,4 нм від густини струму (а) і енергії первинних електронів (б) для кристала KBr.

З рис. 3, а видно, що інтенсивність спектральних ліній при порівняно малих  $i_e$  залежить лінійно від густини струму первинних електронів, а це свідчить, що переважає механізм формування збуджених станів атомів К в одноразових актах зіткнень. Тобто нема помітного внеску збудження уже розпорошених атомів К первинними електронами в газовій фазі. Це узгоджується з результатами [11-13] і суперечить даним [14]. У разі більших густин струму ми спостерігаємо стрімкіше зростання ефективності утворення збуджених атомів К, однак лінійна залежність зберігається. Ймовірно, діє додатковий чинник, який спричинює збільшення потоку десорбованих частинок К (або ймовірності їхнього збудження). Не виключено також впливу через густину струму первинних електронів на деяке підвищення температури зразка, яке сприяє включенню нового каналу десорбції збуджених атомів. Збільшення температури, як видно з рис. 4, веде до збільшення інтенсивності лінії KI. На рис. 4 зображена також залежність інтенсивності смуги випромінювання з максимумом при 440 нм від температури мішені. В інтервалі температур від 20 до 500°С інтенсивність смуги 440 нм стрімко зменшується.

Подібне неперервне випромінювання зафіксовано і в [9] під час бомбардування ЛГК іонами середніх енергій. Його пов'язували з наявністю в кристалі дефектів типу F-центрів різної кратності та радіаційним розпадом самозахоплених екситонів. Механізм утворення дефектів іонізуючим випромінюванням у ЛГК може бути таким. Заряджена частинка, рухаючись усередину кристала, на додаток до зміщення іонів із їхніх позицій у ґратці, може створювати електрон-діркові пари (екситони), що призводить до формування самозахопленого екситона, тобто електрона, кулонівськи зв'язаного з ковалентнозв'язаним діатомним галогенним молекулярним іоном  $X_2$  [9]. Після кількох пікосекунд самозахоплений екситон релаксує, унаслідок чого може утворюватися фотон чи фонon, або шляхом безвипромінювального переходу формуватися галогенна вакансія (F-центр) чи міжвузловий атом галогену (H-центр). З'ясовано, що при кімнатній температурі і вище процеси формування F-центрів у ЛГК переважають [15]. Певно, ці ж механізми емісії неперервного випромінювання виникають і у випадку бомбардування ЛГК електронами. В

такому разі зменшення інтенсивності неперервного випромінювання, яке ми спостерігаємо з підвищенням температури кристала (див. рис. 4), можна пояснити відпалюванням дефектів у кристалі.

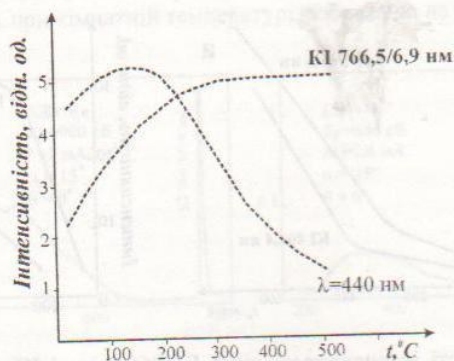


Рис. 4. Залежність інтенсивності дублета ліній KI 766,5/6,9 nm та смуги випромінювання з максимумом при 440 nm від температури мішені.

Отже, отримано дані про спектральний склад оптичного випромінювання під час бомбардування електронами поверхонь деяких ЛГК, вивчено залежність його характеристик від параметрів пучка первинних електронів та від температури мішені. З'ясовано, що в спектрі наявні два види випромінювання, які є різними за природою випромінювачів, місцем локалізації та механізмом генерації. Це по-перше, неперервне випромінювання, локалізоване на поверхні кристала і пов'язане з утворенням самозахоплених екситонів і збудженням F-центрів та комплексів F-центрів кристала і, по-друге, характеристичне випромінювання атомів лугу, які десорбуються з поверхні у збудженому стані. Десорбовані атоми галогену у збудженому стані не зафіксовані.

1. Tolk N. H. DIET I / Eds. W. Brening and D. Menzel DIET-1. Berlin, 1983.
2. Itoh N., Tanimura K. // Radiat. Eff. 1986. 98. P. 269.
3. Szymonski M., Rutkowski J., Poradzisz A. et al. DIET II / Eds. W. Brening and D. Menzel Berlin, 1984. P. 160.
4. Neidhart N., Sporn M., Schmid M., Varga P. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. 1995. B101. P. 127.
5. Pooley D. // Solid State Commun. 1965. 3. P. 241.
6. Hersh H.N. // Phys. Rev. 1966. 120. P. 679.
7. Itoh N., Saidoh M. // Jorنال Phys. (Paris) 1973. 34. P. 101.
8. Williams R. T., Song K. S., Faust W. L., Leung C. H. // Phys. Rev. 1986. B33.
9. Yan Q., Barnes A.Y., Seifert N., Albridge R., Tolk N. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. 1996. B115. P. 415.
10. Лінтур М. І., Маркович Л. М., Мастюгін В. О. та ін. // Наук. вісн. Ужгород. ун-ту. Серія Фізика. 2001. №10. С. 191-194.



11. Дробнич В. Г., Мастюгин В. А., Охрименко С. В., Пон С. С. // Изв. Акад. Наук. Серия Физика. 1998. 62, №4. С. 836.
12. Tolk N. H., Feldman L. C., Kraus J. S. et al. // Phys.Rev.Lett. 1981. 46. P. 134.
13. Hudson L. T., Tolk N. H., and Bao C., Nordlander P. et al. // Phys.Rev. 2000. B 62. P.1035.
14. Postawa Z., Rutkowski J., Poradzisz A. et al. // Nucl.Instr. and Meth. in Phis.Res. 1987. B 18. P. 574.
15. Itoh N., Tanimura K. J. // Phys. Chem. Solids. 1990. 51. P.679.

## PHOTON EMISSION AT THE INTERACTION OF THE ELECTRONS WITH THE SURFACE OF ALKALI HALIDE CRYSTALS

M. Prikhodko, M. Lintur, L. Markovich

*Uzhgorod Nationale University, Department of Quantum Electronics  
Voloshina Str. 54, 88000 Uzhgorod, Ukraine  
e-mail: [QEL@univ.uzhgorod.ua](mailto:QEL@univ.uzhgorod.ua)*

Electron-photon spectroscopy was employed to investigate the photon emission from alkali halide crystals, such as KBr, LiF, NaCl and NaF, bombarded by electron with medium energy (100-1000 eV). In the spectra two species of light emission with different nature, localization and mechanism of the generation were detected. These are the characteristic emission of the alkali atoms sputtered in excited state by the bombarding electron beam and continuous emission in wide range of the wave - lengths emitted by the surface bombarded. Possible channels of creating this light emission were analyzed. The intensities of characteristic and continuity emission versus energy, current density of bombarding electrons and target temperature were investigated.

*Key words:* electron-photon emission, sputtering, alkali halide crystals.

Стаття надійшла до редколегії 23.05.2002

Прийнята до друку 06.02.2003