

УДК 537.53

PACS 78.70.-g

DOI: 10.24144/2415-8038.2016.40.130-137

І.Є. Митропольський, В.В. Кузьма, О.М. Конопльов, В.С. Буксар

Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, вул. Волошина, 54

e-mail: [vasja\\_kuzma@ukr.net](mailto:vasja_kuzma@ukr.net)

## ЕМІСІЯ ФОТОНІВ З МОДИФІКОВАНОЇ СРІБЛОМ ПОВЕРХНІ NaCl ПРИ ЕЛЕКТРОННОМУ БОМБАРДУВАННІ

Досліджено характеристики випромінювання, яке виникає при бомбардуванні повільними електронами поверхні кристалу NaCl з різним ступенем агломерації наночастинок Ag. Аналізується вплив поверхневого плазмонного резонансу наночастинок на спектральний розподіл інтенсивності випромінювання власних дефектів кристалу.

**Ключові слова:** електрон-фотонна емісія, електрон-фотонна спектроскопія, наночастинка, дефекти кристалу, плазмон.

### Вступ

Завдяки фундаментальним властивостям срібла, у них можливо збурення плазмонів з енергіями в оптичному діапазоні і перенесення на відстані до 104 нм. До інтенсивного коливального руху при зовнішньому збуренні може бути залучений і вільний електронний газ, що знаходиться всередині наночастинок срібла з розмірами 10-300 нм. Збудження плазмонів зазвичай викликається оптичним випромінюванням з енергією фотонів близькою до енергії плазмонів і проявляється в наявності резонансів у спектрах поглинання і розсіяння випромінювання [1,2]. При цьому електронні збудження супроводжується значним збільшенням електричного поля в частинках і поза ними в області порядку їх розміру. Положенням плазмонних резонансів можна маніпулювати шляхом вибору різних металів, створенням частинок певного розміру і форми, варіацією діелектричних підкладок або матриць [3]. Посилення локального поля і його висока неоднорідність – важливі фактори, що призводять до появи керованих поверхнево-підсиленних оптичних ефектів і роблять наночастинок одними з найважливіших об'єктів сучасних нанотехнологій [2,4]. Не менш ефективним,

а в деяких випадках і більш інформативним інструментом дослідження розмірних ефектів є застосування різних електронзондуючих методик [2,5-7].

В роботі використано оптичний метод діагностики поверхні твердого тіла – електрон-фотонну спектроскопію (ЕФС), яким раніше в нашій лабораторії вивчено властивості плазмонних збуджень в тонких плівках і масивних зразках срібла [8], утворення центрів люмінесценції лужно-галогенних кристалів (ЛГК) [9], тощо. Матрицею, на поверхню якої депонувалися наночастинок срібла обрано кристал NaCl. Інтерес до ЛГК, в які введено наночастинок металів, обумовлений застосуванням таких систем в якості джерел люмінесцентного випромінювання, як середовищ з ефективним фотохімічним каталізом адсорбованих молекул, як активних середовищ для посилення випромінювання, як матеріали для запису і зберігання інформації [10]. З іншого боку нанорозмірні плівки, в тому числі й срібла, є актуальними об'єктами сучасної оптики для запису інформації. Тому вивчення впливу металевих наночастинок на оптичні і емісійні характеристики ЛГК, і навпаки, оточення на властивості наночастинок, є важливою прикладною задачею. Мета роботи полягала у виявленні методом ЕФС взаємозв'язку між процесами створення та

релаксації дефектів кристалу NaCl поверхневого плазмонного резонансу в наночастинках Ag.

### Експериментальна установка та методика дослідження

Дослідження проводилися на надвисоковакуумному ( $5 \cdot 10^{-9}$  Тор) електрон-фотонному спектрометрі [9], створеному на базі універсальної установки УСУ-4. Електронна гармата формувала пучок електронів діаметром 4 мм і рівномірної густини струму по перерізу. Кут бомбардування (від нормалі до поверхні) складав  $15^\circ$ . Експериментально встановлено, що для нашої задачі оптимальна енергія електронів  $E=400-800$  еВ, при густині струму на поверхні 6-8 мкА/мм<sup>2</sup>. При більших значеннях енергії відбувалась зарядка поверхні зразка електронним пучком, яка призводила до нерегулярних сплесків інтенсивності свічення, що ускладнювало інтерпретацію спектрів електрон-фотонної емісії (ЕФЕ). Обрані параметри пучка зводили до мінімуму різні види термічної взаємодії, зокрема, нагрів зразка до високої температури, плавлення, випаровування матеріалу з високою швидкістю, тощо. Випромінювання аналізувалося монохроматором МДР-6У в області 280-700 нм і детектувалося фотоелектронним помножувачем (ФЕП) типу ФЕУ-106. Експериментальні дані програмно конвертувались в графічне представлення з урахуванням коефіцієнтів спектральної чутливості системи аналізу і реєстрації. Геометрія дослідів така, що аналізоване свічення, яке генерує електронний пучок локалізовано безпосередньо на поверхні. При куті спостереження  $90^\circ$  спектри ЕФЕ усіх зразків складалися лише з ліній NaI 588.99, 589.59 нм збуджених атомів, які десорбувалися з поверхні під дією електронного пучка. Вони на малюнках не приводяться.

Досліджувані зразки виготовлені двома способами. За першим вони виготовлялись у вигляді плоскопаралельних пластин розміром  $20 \times 10 \times 3$  мм шляхом зколювання з великих

блоків чистого кристалу NaCl по площинах спайності (100). Наночастинки срібла наносили на поверхню методом осаду, далі висушували при кімнатній температурі. За інформацією постачальника розмір частинок складав 10-80 нм. Було підготовлено зразки з різною поверхневою концентрацією Ag:  $2.5 \cdot 10^{-5}$  г/см<sup>2</sup> і  $2.5 \cdot 10^{-6}$  г/см<sup>2</sup>. Електронно-мікроскопічний аналіз показав, що форма наночастинок срібла переважно сферична. Середній розмір частинок складав 40 нм. При іншому способі зразки виготовили змішуванням наночастинок Ag у вигляді ультрадисперсійного порошку (сфери діаметром 20 нм) з порошком кристалу NaCl і подальшим пресуванням (під тиском 200 кг/см<sup>2</sup>) в пігулку розміром  $10 \times 10 \times 3$  мм<sup>3</sup>. Аналогічним чином була виготовлена пігулка з чистого порошку NaCl.

### Результати досліджень та їх обговорення

На рис.1 показано спектри ЕФЕ чистого (крива 1) та з нановключеннями Ag кристалу NaCl (крива 2 і 3) при бомбардуванні електронами з енергією 600 еВ з урахуванням спектральної чутливості

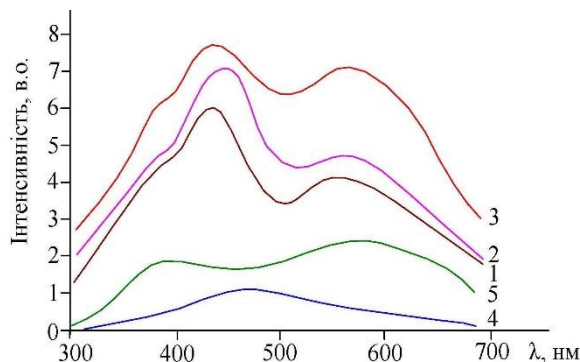


Рис.1 Спектри ЕФЕ: 1-NaCl без нановключень; 2-NaCl з наночастинками Ag на поверхні; 3-NaCl з наночастинками Ag в об'ємі; 4-ізниця спектрів 2 і 1; 5-ізниця спектрів 3 і 1.

реєстрації. Форма спектрів для енергій електронів в інтервалі 400-1000 еВ практично не змінювалася. У всіх випадках реєструється випромінювання у широкій спектральній області, що свідчить про

наявність декількох центрів свічення. Зауважимо, що спектри ЕФЕ чистого кристалу NaCl не залежали від способу виготовлення зразків. Для визначення спектральних складових до складних експериментальних спектрів ЕФЕ застосовувався метод Алєнцева-Фока [11].

Для чистого NaCl (крива 1) спектр ЕФЕ розділяється на три смуги. Найбільш інтенсивною є смуга випромінювання з максимумом при  $\lambda=430$  нм. Менш інтенсивні смуги мають максимум поблизу  $\lambda=380$  нм і  $\lambda=560$  нм. Відомо [10, 12], що при опроміненні ЛГК електронами значна частина енергії частинок витрачається на створення екситонів та електрон-діркових пар. При рекомбінації точкових дефектів енергія виділяється у вигляді фотонів.

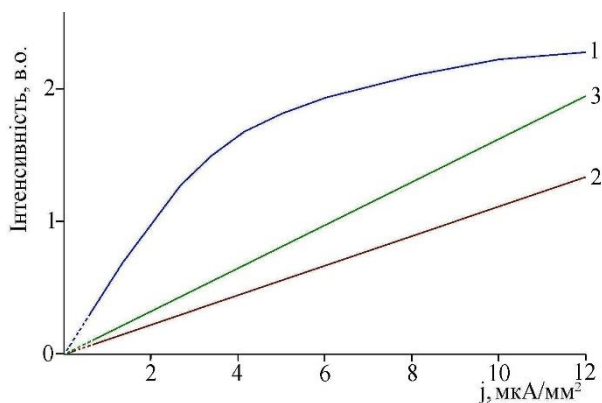


Рис.2 Залежність інтенсивності випромінювання від густини струму електронів для NaCl без нановключень на довжинах хвиль 380 нм (1), 560 нм (2) та для NaCl з наночастинками в об'ємі на довжині хвилі 560 нм (3).

Враховуючи, що частота в максимумі випромінювання смуг менша за оптичну ширину забороненої зони кристалу, можна припустити, що внесок у свічення кристалу NaCl дають екситони, які утворюються електронним пучком за кімнатної температури. Згідно з [13,14], короткохвильова смуга свічення з максимум 380 нм обумовлена розпадом автолокалізованого екситона. Окрім спектрального розподілу про це свідчить гіперболічна залежність інтенсивності випромінювання (а відповідно, і концентрації дефектів) від густини струму

електронів (рис.2, крива 1). Така кінетика притаманна утворенню демерів, наприклад е-діркових центрів [8]. Природа смуги з максимумом 430 нм пов'язана з рекомбінацією дірок і F – центрів [13]. Дослідження зміни інтенсивності при  $\lambda=430$  нм (тобто в максимумі випромінювання) від часу бомбардування показали, що інтенсивність на початок бомбардування не дорівнює нулю (рис.3). Тобто дефекти, які відповідають за свічення в цьому спектральному діапазоні наявні в приповерхневому шарі кристалу до опромінення (власні дефекти ЛГК). На протязі декількох хвилин (в залежності від  $E_0, j$ ) дії електронного пучка інтенсивність зростає в 2.5-5 разів, досягає максимуму, а потім повільно спадає до насичення (рис.3, крива 1). Аналогічні залежності отримано і для інших довжин хвиль в межах цієї смуги. Враховуючи отримані залежності, а також результати мікроелементного аналізу зразків NaCl, який проводився на приладі ICP-MS Agilent 7900, можна припустити, що ЕФЕ чистого NaCl не пов'язана з домішками, а визначається утворенням і розпадом власних дефектів. Подібні дефекти створювалися і при іонному бомбардуванні ЛГК [15].

Смуга з максимумом при  $\lambda=560$  нм має лінійну залежність інтенсивності випромінювання від густини струму (рис.2, крива 2), хоча струмові залежності електронів і дірок в цій області змінюється (крива 1). Смуга не пов'язана із вільними носіями, а може бути обумовлена випромінюванням екситонів, які безпосередньо збуджуються електронним пучком [12].

Вплив наночастинок срібла впроваджених в поверхню кристалу NaCl на спектр ЕФЕ ілюструється кривою 2 на рис.1. Поверхнева концентрація срібла складала  $2.5 \cdot 10^{-6}$  г/см<sup>2</sup>. Форма спектрів змінюється не суттєво, інтенсивність випромінювання збільшується у всьому спектральному діапазоні (в максимумі з  $\lambda=430$  нм у 1,3-1,5 разів). Спостерігається зсув максимуму у довгохвильову область (на 10-20 нм). Залежність  $I(t)$  для цієї смуги (рис.3, крива 2) відмінна від кривої 1: - вона не спадає з часом і швидкість її

розпалювання більша ніж у випадку чистого кристалу.

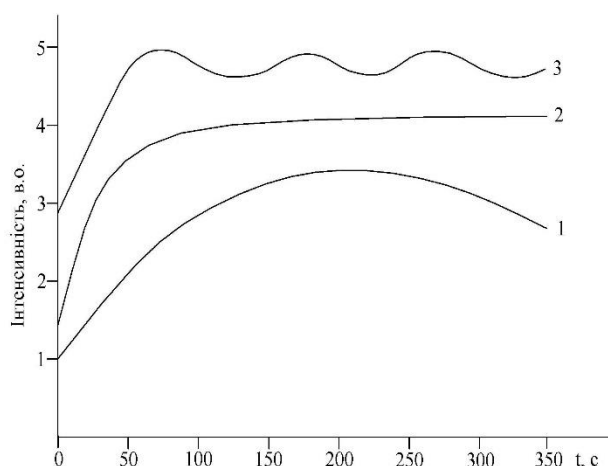


Рис.3. Залежність інтенсивності смуги випромінювання з максимумом  $\lambda=430$  нм від часу бомбардування: 1- NaCl без нановключень; 2- NaCl з наночастинками Ag на поверхні; 3- NaCl з наночастинками Ag в об'ємі.

Спектри ЕФЕ NaCl у вигляді кристалу і зразків з підвищеною дефектністю і розупорядкуванням структури, тобто пресованих, подібні (рис.1, крива 3). Інтегральна інтенсивність випромінювання значно збільшується, причому найбільше зростає довгохвильова складова. Однією з причин збільшення загального виходу фотонів є те, що дифузія по місцям порушення структури кристалічної ґратки збільшує кількість центрів свічення, асоційованих з макроскопічними дефектами ґратки. Тому і залежність  $I(t)$  для цього зразка більш складна (крива 3, рис.3). Залежності  $I(j)$  (крива 3, рис.2), як і у випадку чистого NaCl, лінійні. Порівняння кривих на рис.3 вказують, що швидкість генерації центрів люмінесценції в кристалах NaCl з Ag незалежно від способу внесення наночастинок в зразок, приблизно однакова, а за величиною більша, ніж в чистому NaCl.

Різниця спектрів 2 і 1 (крива 4, рис.1) дозволяє оцінити внесок наночастинок, адсорбованих на поверхні, в ЕФЕ NaCl. Отриманий спектральний розподіл за формою і положенням максимуму корелює

з спектром колективних коливань електронної густини наночастинок срібла [3,15], які збуджуються електронним пучком. Перекриття спектру поверхневих плазмонів зі смугами ЕФЕ NaCl у видимому діапазоні свідчить про можливий обмін енергією електронного збудження між металевими частинками і дефектами матриці. При збільшенні поверхневої густини наночастинок Ag у 2 рази виявлено зсув максимуму поверхневих плазмонів від 480 нм до 510-515 нм, що є наслідком підсилення взаємодії через зменшення відстані між наночастинками. Положення і інтенсивність смуги плазмонних резонансів визначається діелектричними властивостями середовища і індивідуальними характеристиками наночастинок, зокрема їх розміром [2,3]. У випадку осаду частинок на поверхні NaCl поряд з добре сформованими острівцями візуально спостерігались скупчення і ланцюжки маленьких острівців, розташовані уздовж елементарних виступів на поверхні. Конгломерація наночастинок у місцях порушень структури кристалічної ґратки вірогідно призводила до збільшення їх розміру, і відповідно тим до зсуву плазмонного резонансу в червону область.

Для порошкового зразка внесок наночастинок у ЕФЕ представляється кривою 5 на рис.1. Велика ширина спектра може вказувати на значний безперервний набір частинок різної форми і розмірів в досліджуваних зразках. В спектрі чітко проявляються два максимуми: при 390 і 580 нм. Подібний ефект для плазмонного резонансу реалізується у разі сфероїдальної форми металевих наночастинок [2,15]. Один пік зміщений в короткохвильову область, а другий - в червону область за рахунок збільшення відношення довжин осей частинок. Подібний ефект спостерігали автори [15], які дослідили вплив розміру нановключень Ag в кварці: зі збільшенням розміру частинок відбувається червоне зміщення піку разом з розширенням і розщепленням, що пов'язано з появою квадрупольних мод плазмонних коливань. Зауважимо, що зазначені особливості притаманні для досить великих наночастинок ( $>20$  нм). В

цілому, це узгоджується з відомим фактом [16], що для частинок великих розмірів домінує радіаційний розпад плазмонів, тоді як в маленьких наночастинках переважає нерадіаційний розпад з перетворенням енергії плазмонів в тепло. При малих відстанях між наночастинками такий випадок реалізується для порошкового зразка. Суттєвою є електромагнітна взаємодія між ними. Це призводить до появи двох плазмонних піків, які зміщені в коротко- та довгохвильові боки відносно плазмонної смуги ізольованої сферичної частинки. З рис.1 видно, що інтенсивнішою є довгохвильова складова і її вплив на ЕФЕ кристалу NaCl є більш вагомою (крива 3).

### Висновки

Експерименти показують, що процеси, які відбуваються при електронному опроміненні NaCl з впровадженими в них наночастинками

срібла, складні і різноманітні. Нановключення металу впливають на люмінесцентні властивості ЛГК. Фізичною причиною, яка спричиняє дані ефекти в досліджених зразках, є обмін енергією електронного збудження між наночастинками срібла і центрами свічення матриці. Ефективність підсилення люмінесценції кристале NaCl залежить від розмірів наночастинок і їх відстаней. Через те, що наночастинки хаотично розташовані одна відносно іншої, то поверхневі плазмони окремих частинок Ag під дією електронного пучка об'єднувалися і генерували моди в широкому діапазоні довжин хвиль. Як наслідок, не існувало виділеної резонансної моди і було зареєстровано лише передачу підсилення випромінювання дефектів матриці. Тому дуже важливо створити рівномірний розподіл наночастинок на підложці, що і є задачею подальших досліджень.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Li K., Stockman M., Bergman D. Self-Similar Chain of Metal Nanospheres as an Efficient Nanolens // *Phys. Rev.Lett.* – 2003. – V.91. – №.22. – pp. 227402-1–227402-4.
2. Klimov V.V. Nanoplasmonics // *Physics-Uspokhi* – 2008. – V.51. – №.8. – pp. 839–844.
3. Noguez C. Surface Plasmons on Metal Nanoparticles: The Influence of Shape and Physical Environment // *J. Phys. Chem. C.* – 2007. – Vol. 111. – № 10. – pp. 3806-3819.
4. Miller M., Lazarides A. Sensitivity of metal nanoparticle surface plasmon resonance to the dielectric environment // *J. Phys. Chem. B.* – 2005. – V.109. – pp. 21556-21565.
5. Benedetti A., Norris D.J. et al. FEGTEM analysis of the effects of Ge segregation and germane flux on the Ge profile across nm-scale layers, grown by both MBE and CVD. XIII Int. Conf. "Microscopy of Semiconducting Materials" (Cambridge, UK, 2003).
6. Grishin V.K. Polarization radiation from relativistic electrons in matter containing fullerenes // *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B,* – 2005. – V.227. – № 1-2. – pp. 82-86.
7. Довбня А.Н., Закутин В.В., Решетняк Н.Г., Коляда Ю.Е., Федун В.И., Тютюнников В.И. Возбуждение локализованных плазмонов электронным пучком // *ВАНТ.* – 2012. – 80. – №4 – С. 171 – 175.
8. Кляп М.П., Крицкий В.А., Поп С.С. Электрон-фотонная эмиссия массивного образца и пленок серебра различной толщины // *ЖПС.* – 1989. – Т.51.– С. 985 – 991.
9. Приходько М.В., Митропольский И.Е., Шароди И.С., Дашенко А.И., Буксар В.С., Поп С.С. Эмиссия фотонов при взаимодействии ионов и электронов средних энергий с поверхностью некоторых щелочно-галогенидных кристаллов // *Поверхность: Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* – 2008. – №10. – С. 43 – 48.

10. Кочубей В.И. Формирование и свойства центров люминесценции в щелочно-галогидных кристаллах. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 192 с.
11. Фок М. В. Разделение сложных спектров на индивидуальные полосы при помощи метода Аленцева. // Труды ФИАН СССР. – 1972. – Т. 59. – С. 3 – 24.
12. Лисицын В.М. Радиационная физика твердого тела. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 172 с.
13. Куусманн И.Л., Лийдья Г.Г., Луцик Ч.Б. Люминесценция свободных и автолокализованных экситонов в ионных кристаллах // Труды ИФ АН ЭССР – 1976 – Т.46 – С. 5 – 80.
14. Feldbach E., Kirm M., Lushchik A., Lushchik Ch., Martinson I. Excitonic and electron-hole processes in NaCl and NaCl:Ag crystals under conditions of electronic excitations // J. Phys.: Condens. Matter. – 2000. – V.12. – pp. 1991–2005.
15. Mattei G., Mazzoldi P., Bernas H. Metal Nanoclusters for Optical Properties // Topics Appl. Physics. – 2010. – Vol.116. – pp. 287-316.
16. Vasson A., Shubina T.V., Leymarie J. Thermally detected optical absorption in sophisticated nitride structures // Phys. Stat. Sol. (c) – 2005 – Vol. 2. – №2. – pp. 833–836.

Стаття надійшла до редакції 10.09.2016

И.Е. Митропольский, В.В. Кузьма, А.Н. Коноплев, В.С. Буксар  
Ужгородский национальный университет, 88000, Ужгород, ул. Волошина, 54

## ЭМИССИЯ ФОТОНОВ ИЗ МОДИФИЦИРОВАННОЙ СЕРЕБРОМ ПОВЕРХНОСТИ NaCl ПРИ ЭЛЕКТРОННОЙ БОМБАРДИРОВКЕ

Исследовано характеристики излучения, которое возникает при бомбардировке медленными электронами поверхности кристалла NaCl с разной степенью агломерациями наночастиц Ag. Анализируется влияние поверхностного плазмонного резонанса наночастиц на спектральное распределение интенсивности излучения собственных дефектов кристалла.

**Ключові слова:** электронно-фотонная эмиссия, электронно-фотонная спектроскопия, наночастица, дефекты кристалла, плазмон.

I.E. Mitropolsky, V.V. Kuzma, A.N. Konoplyov, V.S. Buksar  
Uzhhorod National University, 88000, Uzhhorod, Voloshin Str., 54

## EMISSION OF PHOTONS FROM NaCl SURFACE MODIFIED BY SILVER AT ELECTRONIC BOMBARDMENT

The idea of application of a plasmon resonance of nanoparticles for fundamental and applied aspects is progressive. The aim - to investigate influence of nanoparticles of silver on recombinations of the electronic and hole centers of a crystal of NaCl.

Technology and technique. Research method - an electron and photon spectroscopy. It is realized in ultra-high vacuum spectrometer at the following experimental parameters: energy of electrons was 400-800 eV, current density on a surface of samples 6-8 mA/mm<sup>2</sup>. Radiation was analyzed by the monochromator MDR-6U in the area 280 - 700 nanometers and was detecting by a photo multiplier FEP-106.

The objects of research: NaCl crystals with synthesized both on a surface, and in volume Ag nanoparticles.

The results. In the spectrum of electron and photon issue of pure NaCl three strips of radiation are found ( $\lambda_1 = 380$  nm,  $\lambda_2 = 430$  nm,  $\lambda_3 = 560$  nm). The nature of these strips is connected with the radiation of own defects of a crystal. In the presence of nanoparticles of Ag intensity of strips increases and there is a shift of maxima to the red area of the spectrum. The analysis of ranges of electro and photon issue, dependences of  $I(j)$  and  $I(t)$  specifies communication between a plasmon resonance of nanoparticles of Ag and efficiency of radiators of a crystal.

Conclusions. At electronic radiation in nanoparticles of silver arises superficial plasmon resonance. The excitation of plasmons is followed by increase in the electronic field near them which in turn influences the centers of a luminescence of a matrix. Efficiency of interaction depends on the selected resonance mode which is determined by the size and an arrangement of particles on a surface.

**Keywords:** electron-photon emission, electron-photon spectroscopy, nanoparticles, crystal defects, plasmon.

## REFERENCES

1. Li K., Stockman M., Bergman D. Self-Similar Chain of Metal Nanospheres as an Efficient Nanolens // *Phys.Rev.Lett.* – 2003. – V.91. – №.22. – pp. 227402-1–227402-4.
2. Klimov V.V. Nanoplasmonics // *Physics-Uspekhi* – 2008. – V.51. – №.8. – pp. 839–844.
3. Noguez C. Surface Plasmons on Metal Nanoparticles: The Influence of Shape and Physical Environment // *J. Phys. Chem. C.* – 2007. – Vol. 111. – № 10. – pp. 3806-3819.
4. Miller M., Lazarides A. Sensitivity of metal nanoparticle surface plasmon resonance to the dielectric environment // *J. Phys. Chem. B.* – 2005. – V.109. – pp. 21556-21565.
5. Benedetti A., Norris D.J. et al. FEGTEM analysis of the effects of Ge segregation and germane flux on the Ge profile across nm-scale layers, grown by both MBE and CVD. XIII Int. Conf. "Microscopy of Semiconducting Materials" (Cambridge, UK, 2003).
6. Grishin V.K. Polarization radiation from relativistic electrons in matter containing fullerenes // *Nuclear instruments and Methods in Physics Research B*, – 2005. – V.227. – № 1-2. – pp. 82-86.
7. Dovbnya A.N., Zakutin V.V., Reshetnyak N.G., Kolyada Yu.E., Fedun V.I., Tyutyunnikov V.I. (2012), "Excitation of noncommunicative plasmon's an electron beam" ["Vozbuzhdenie lokalizovanykh plazmonov elektronnym puchkom"], *VANT*, №4(80), pp. 171–175.
8. Klyap M.P., Krickiy V.A., Pop S.S. (1989), "The electron-photon emission of a bulk sample and silver films of different thicknesses" [Elektron-fotonna emissia massivnogo obrazca i plynok serebra], *ZHPS*, № 51, pp. 985 – 991.
9. Prikhod'ko M. V., Mitropol'skiy I. E., Sharodi I. S., Dashchenko A. I., Buksar V. S., Pop S. S., (2008), "Photon Emission at Interaction of Medium-Energy Ions and Electrons with Surface of Alkali Halide Crystals", [Emissiia fotonov pri vzaimodeistvii ionov i elektronov srednikh enerhii s poverkhnostiu nekotorykh shchelochno-haloidnykh krystallov], *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques* [Poverkhnost'. Rentgenovskie, Sinkhrotronnye i Neitronnye Issledovaniya], №10, pp. 43 – 48.
10. Kochubei V.Y. (2006), Formation and properties of luminescence centers in alkali halide crystals [Formirovanie i svoistva tse ntrov liuminestsentsii v shchelochno-haloidnykh kristallakh], *FIZMATLIT*, Moscow, 192 p.

11. Fok M.V. (1972), “Separation of complex spectra into individual strips by the method Alentsev”, [Razdelenie slozhnykh spektrov na individualnye polosy pri pomoshchi metoda Alentseva], Trudy FIAN SSSR, V. 59, pp. 3 – 24.
12. Lisitsyn V.M. (2008), Solid State Radiation Physics [Radiatsionnaia fizika tverdogo tela], Publisher of Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 172 p.
13. Kuusmann Y.L., Liidia H.H., Lushchuk Ch.B., (1976), “Luminescence of free and self-trapped excitons in ionic crystals”, [Luminestsentsiia svobodnykh i avtolokalizovanykh eksitonov v ionnykh kristallakh], Trudy IF AN ESSR, V.46, pp. 5 – 80.
14. Feldbach E., Kirm M., Lushchik A., Lushchik Ch. and Martinson I. Excitonic and electron-hole processes in NaCl and NaCl:Ag crystals under conditions of electronic excitations // J. Phys.: Condens. Matter. – 2000. –V.12. – pp. 1991–2005.
15. Mattei G., Mazzoldi P., Bernas H. Metal Nanoclusters for Optical Properties // Topics Appl. Physics. – 2010. – Vol.116. – pp. 287-316.
16. Vasson A., Shubina T.V., and Leymarie J., Thermally detected optical absorption in sophisticated nitride structures // Phys. Stat. Sol. (c) – 2005 – Vol. 2. – №2. – pp. 833–836.

© Ужгородський національний університет