

УДК 537.534  
PACS number(s): 73.20.Mf

## НОВИЙ МЕХАНІЗМ ЗБУДЖЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ПЛАЗМОНІВ У РАЗІ ІОННОГО ОПРОМІНЕННЯ ПОВЕРХНІ МЕТАЛУ

**А. Бобровник, В. Кузьма, О. Конопльов,  
В. Мастюгін, Г. Подгорецька, В. Дробнич**

*Ужгородський національний університет,  
проблемна науково-дослідна лабораторія фізичної електроніки  
вул. Волошина, 54, 88000 Ужгород, Україна  
e-mail: problemlab@gmail.com*

Експериментально досліджено світіння на частоті поверхневих плазмонів під час опромінення поверхні срібла іонами  $K^+$ . Визначено також спектральний склад іон-фотонної та електрон-фотонної емісії срібла у діапазоні довжин хвиль  $\lambda = 2\ 000\text{--}6\ 500\ \text{\AA}$ . Уперше експериментально доведено існування нового, запропонованого нами нейтралізаційного механізму збудження поверхневих плазмонів. Він має супроводжувати будь-які процеси нейтралізації первинного іона. У тому числі й такі, де енергії нейтралізації недостатньо для збудження поверхневих плазмонів.

*Ключові слова:* поверхневий плазмон, нейтралізаційний механізм, іон-фотонна спектроскопія.

Актуальними на сьогодні залишаються фундаментальні дослідження емісійних явищ, що супроводжують опромінення поверхні металу прискореними іонами. Одне з цих явищ – світіння поверхні на частоті поверхневих плазмонів (ПП). У працях [1, 2] розглянуто кілька механізмів збудження поверхневих плазмонів, головним із яких вважають один з різновидів так званого нейтралізаційного (потенціального) механізму, коли первинний іон нейтралізується електроном провідності металу із виділенням енергії, достатньої для збудження ПП. Цей механізм відіграє суттєву роль і у вторинній електронній емісії [3, 4]. Ми запропонували новий різновид нейтралізаційного механізму [5], який має супроводжувати будь-які процеси нейтралізації первинного іону, у тому числі й такі, де енергії нейтралізації недостатньо для збудження ПП. Про його високу ефективність свідчили зроблені теоретичні висновки. Але цей результат не підтверджувався висновком авторів експериментальної роботи [6] про відсутність світіння на частоті ПП під час опромінення поверхні Ag іонами  $K^+$ . Ми не були впевнені у правильності цього висновку, оскільки дослідження у монографії [6] виконано в умовах довготривалої взаємодії іонів  $K^+$  з Ag-мішенню, тобто за значної концентрації імплантованих у срібло атомів калію. За таких концентрацій калій, очевидно, змінює інтенсивність і частоту поверхневих плазмонів срібла.

Тому в статті поставлено експерименти, в яких враховано цю обставину – досліджено світіння на частоті ПП при різних дозах опромінення поверхні срібла іонами  $K^+$ .

Експерименти виконано на доплерівському томографі, який працював в режимі іонно- та електрон-фотонного спектрометра. Вакуум в робочій камері становив  $\sim 10^{-8}$  Тор. Бомбардування здійснювали іонами  $K^+$  (енергія іонів 4 кеВ, іонний струм 30 мкА) за нормаллю до поверхні мішені. Кут спостереження становив  $90^\circ$ . Вимірювання виконували у спектральному діапазоні 2 000–6 500 Å. Використовувались атестовані взірці срібла з чистотою не менше 99,9% та поверхнями, підготовленими за стандартними методиками [7]. Зазначені експериментальні умови гарантували відсутність в ІФЕ відомого хімічного ефекту [7].

В умовах довготривалої взаємодії іонів  $K^+$  з поверхнею срібла було визначено спектральний склад іонно-фотонної емісії в діапазоні довжин хвиль  $\lambda=2\ 000\text{--}6\ 500\ \text{Å}$  (максимум інтенсивності світіння на частоті поверхневих плазмонів срібла припадає на  $\lambda=3\ 388\ \text{Å}$  [6]).

На рис. 1 зображено спектр іон-фотонної емісії срібла. Видно, що він складається з характеристичних спектральних ліній розпилених та розсіяних частинок і має малоінтенсивну неперервну компоненту в інтервалі  $\lambda=3\ 250\text{--}5\ 500\ \text{Å}$ . При чому за формою ця компонента не корелює з вимірним спектром електрон-фотонної емісії срібла (рис. 2). На рис. 3 показано комбінований спектр іон-фотонної та електрон-фотонної емісії срібла (тобто мішень одночасно була опромінена іонами  $K^+$  і електронами).

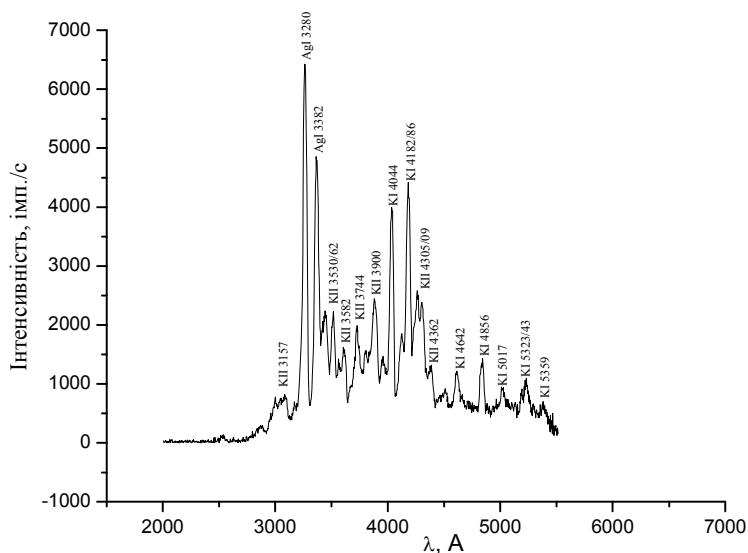


Рис. 1. Спектр іон-фотонної емісії срібла

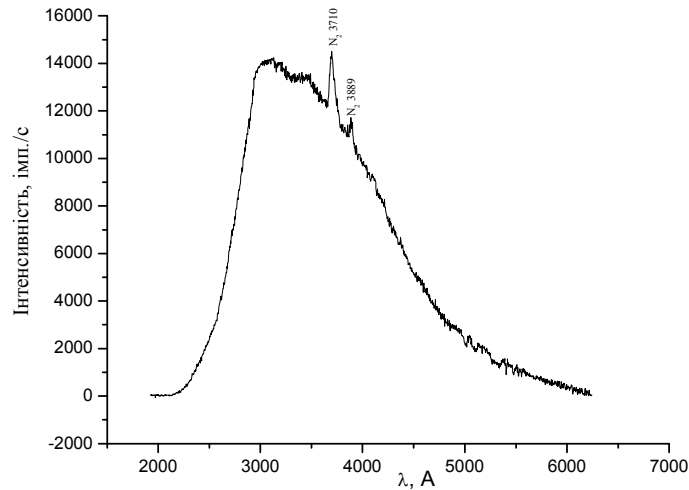


Рис. 2. Спектр електрон-фотонної емісії срібла

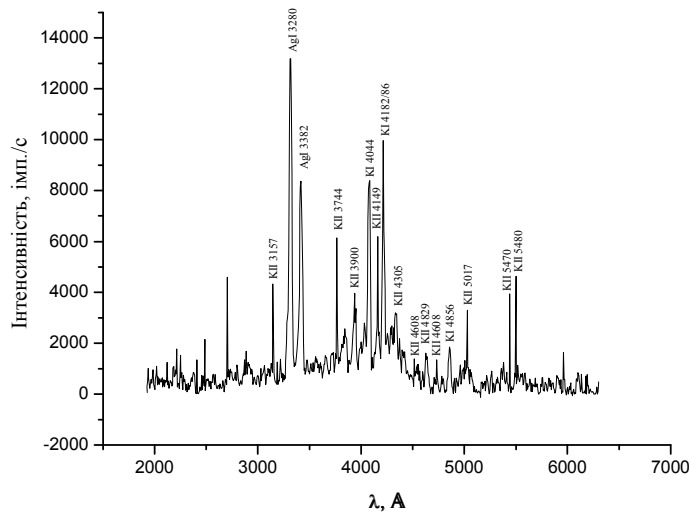


Рис. 3. Комбінований спектр іон-фотонної та електрон-фотонної емісії срібла

Крім того, в очікуваній точці максимуму шуканого світіння ( $\lambda = 3388 \text{ \AA}$ ) було записано залежність інтенсивності фотонного сигналу від часу (дозы) опромінення чистої поверхні Ag іонами  $K^+$  (мішень була очищена високотемпературним прогрівом безпосередньо в камері взаємодії доплерівського томографа). Отриману залежність показано на рис. 4. Такі самі залежності записано й при інших  $\lambda$ , котрі обирали так, щоб вони відповідали спектру

очікуваного світіння і не належали околам довжин хвиль характеристичних спектральних ліній іонно-фотонної емісії срібла. Ці залежності виявились подібними до наведеної на рис 4.

Нарешті, за отриманими залежностями побудовано представлений на рис. 5 спектр не пов'язаного з характеристичними лініями ІФЕ світіння у початковий момент опромінення чистої поверхні Ag іонами  $K^+$ .

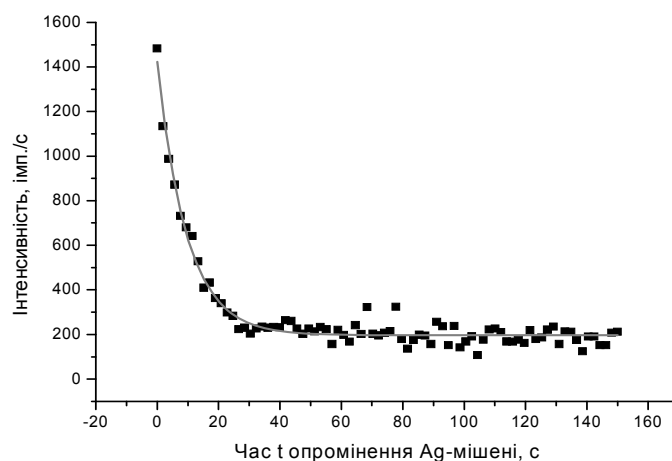


Рис. 4. Залежність інтенсивності світіння при  $\lambda = 3388 \text{ \AA}$  від часу (дозы) опромінення чистої поверхні Ag іонами  $K^+$

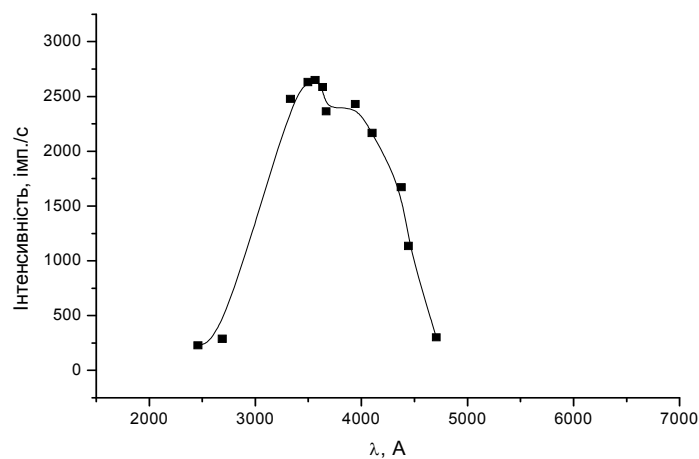


Рис. 5. Інтенсивність світіння при різних  $\lambda$ , що не належать околам довжин хвиль характеристичних спектральних ліній, у початковий момент опромінення чистої поверхні Ag іонами  $K^+$

Ми проаналізували одержані у статті експериментальні дані. Представлений на рис. 2 спектр електрон-фотонної емісії Ag з високою точністю відтворює відповідні результати численних праць інших авторів (див., наприклад, [3, 8]). У цих роботах показано, що світіння із таким спектром генерується поверхневими плазмонами срібла. Тобто за електронного опромінення поверхні Ag в обраних нами експериментальних умовах світіння на частоті ПП все ж таки наявне. А от зображені на рис. 1 і 3 спектри не мають вираженої неперервної компоненти і їх порівняння із розглянутим спектром електрон-фотонної емісії однозначно свідчить про те, що імплантація атомів калію (як ми зазначали вище) справді “придушє” світіння на частоті ПП. Отже, у випадку іонного опромінення Ag шукане світіння на частоті ПП все ж таки може проявитися, але лише за умови використання чистої, не забрудненої калієм поверхні Ag.

З залежності інтенсивності світіння при  $\lambda = 3388 \text{ \AA}$  від часу (дозы) опромінення поверхні Ag іонами  $K^+$  (див. рис. 4) видно, що в початковий момент опромінення простежено суттєвий фотонний сигнал (котрий швидко спадає за характерний час порядку 10 секунд). Остаточного існування шуканого світіння доводить представлений на рис. 5 спектр фотонної емісії (не пов'язаної з характеристичними лініями) у початковий момент опромінення чистої поверхні Ag іонами  $K^+$ . Він добре узгоджується за формою та інтенсивностями зі спектрами світіння на частоті ПП, одержаними у разі опромінення срібла іонами водню та інертних газів [6].

Оскільки енергія нейтралізації іонів водню та інертних газів електронами провідності срібла більша за енергію ПП, а для іонів  $K^+$  – менша [6], то можна зробити висновок, що ця обставина не може бути визначальною в нейтралізаційному механізмі збудження поверхневих плазмонів. Це засвідчує правильність сформульованої вище гіпотези про існування нового різновиду нейтралізаційного механізму [5], який має супроводжувати будь-які процеси нейтралізації первинного іона, у тому числі й такі, де енергії нейтралізації недостатньо для збудження ПП.

1. *Drobnich V. G., Sharodi I. S.* Surface plasmons and interaction of charges with their images in a metal-atom system // *Nuclear Instr. and Meth.* 2002. Vol. B193. P. 408–413.
2. *Поп С. С., Бандурин Ю. А., Даценко А. И., Митропольский И. Е.* Поляризация плазмонного излучения при ионной бомбардировке поверхности серебра // *Оптика и спектроскопия.* 1997. Т. 83. Вып. 1. С. 38–42.
3. *Ohtuski Y. H.* Inelastic scattering of ions at the surface // *Nucl. Instr. & Meth.* 1984. Vol. 2. Iss. 1–3. P. 280–285.
4. *Jouin H., Gutierrez F. A., Harel C.* Energy shifts for a helium atom near aluminum surfaces // *Surface Sci.* 1998. Vol. 417. Iss. 1. P. 18–29.
5. Експериментальне й теоретичне вивчення найбільш інформативних диференціальних характеристик іонно-фотонної емісії ряду металів і діелектриків з простою електронною структурою. Звіт про науково-дослідну роботу. (ДБ-514) (заключний). УДК 537.534, № держреєстрації 0103u001689. 2005.

6. *Bandurin Yu. A., Dashchenko A. I., Mitropolsky I. E., Pop S. S.* Ion-induced plasmon excitation on the clean and oxidized silver surfaces // Nucl. Instr. and Meth. 1993. В. 78. N. 1–4. P. 159–162.
7. *Поп С. С., Бельх С. Ф., Дробнич В. Г., Ферлегер В. Х.* Ионно-фотонная эмиссия металлов. Ташкент: ФАН, 1989. 200 с.
8. *Jouin H., Gutierrez F. A., Harel C.* Energy shifts for a helium atom near aluminum surfaces // Surface Sci. 1998. Vol. 417. Iss. 1. P. 18–29.

**THE NEW MECHANISM OF EXCITATION SURFACE PLASMONS  
AT AN IONIC IRRADIATION METAL SURFACE**

**A. Bobrovnik, V. Kuzma, O. Konoplyov,  
V. Mastuygin, G. Podgoretska, V. Drobnych**

*Uzhgorod National University, Radiophysic Department  
Voloshyna Str., 54, UA–88000 Uzhgorod, Ukraine  
e-mail: problemlab@gmail.com*

The luminescence on frequency surface plasmons at an irradiation of the surface of silver by  $K^+$  ions is experimentally investigated. Spectral structure an ion-photon and electron-photon emission in a range of lengths of waves  $\lambda = 2\ 000\text{--}6\ 500\ \text{\AA}$  is also determinated. As a result for the first time the existence of new recently offered by us neutralization mechanism of excitation surface plasmons is experimentally proved. It must accompany any processes of neutralization of the primary ion. Including such when the energy of neutralization is not enough for excitation surface plasmons.

*Key words:* surface plasmon, neutralization mechanism, ion-photon spectroscopy.

Стаття надійшла до редколегії 17.05.2006

Прийнята до друку 08.07.2008