

ІОН-ФОТОННА ЕМІСІЯ ПРИ БОМБАРДУВАННІ ПОВЕРХНІ БЕРИЛІЮ ІОНАМИ

Шароді І.С., Бандурин Ю.А., Поп С.С.

Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, вул. Підгірна 46,

e-mail: qel@univ.uzhgorod.ua

Представлено дані експериментального дослідження спектрального складу випромінювання в діапазоні 50-800 нм, яким супроводжується бомбардування поверхні полікристала Be іонами H^+ , H_2^+ , H_3^+ , He^+ , Ne^+ та K^+ з енергією 5-20 кеВ. Оцінено швидкість збуджених частинок, які відлітають від поверхні, за доплерівськими контурами випромінених ними спектральних ліній. Визначено абсолютні величини виходу фотонів. Виявлено неперервне випромінювання, що випускається безпосередньо бомбардуваною поверхнею, яке інтерпретується як рекомбінаційне.

Вивчення емісійних явищ при взаємодії іонів з поверхнею берилію має як суто науковий, так і практичний інтерес. З наукової точки зору дослідження емісійних процесів з поверхні берилію є цікавим тому, що це метал, атоми якого мають просту електронну будову. Отже легше встановити механізми формування зарядових і енергетичних станів частинок, що емітуються при іонному бомбардуванні поверхні берилію. Прикладний інтерес до таких знань пов'язаний із матеріалознавчими проблемами, зокрема керованого термоядерного синтезу (КТС). Найперспективнішими матеріалами на покриття першої стінки, діафрагм і диверторних пластин в майбутніх термоядерних реакторах (ТЯР) вважають вуглестигал, бормісткий графіт і берилій [1,2]. В ТЯР і в інших установках, де використовується воднева плазма, окрім проблеми водневого охрупчування матеріалів виникає низка технічно важливих задач, які потребують розв'язання, зокрема, зумовлених взаємодією компонент плазми з першою стінкою: відбиванням від неї потоку падаючих частинок і їх повернення в плазму, розпорошенням матеріалу стінки і деталей ТЯР і потрапляння утворених частинок в плазму. Це призводить не тільки до руйнування стінок і вузлів, але й до небажаного охолодження плазми. Тому особливий практичний інтерес викликає

дослідження взаємодії саме іонів водню і гелію, як компонент плазми з поверхнею берилію, як одного із кандидатів на використання в вузлах ТЯР.

В цій роботі досліджено спектральний склад випромінювання, яким супроводжується взаємодія з поверхнею Be різних іонів, а саме H^+ , H_2^+ , H_3^+ , He^+ , Ne^+ , K^+ . Дослідження виконано в широкій спектральній області (200 – 800 нм – для всіх іонів і 50-800 нм для легких іонів) з використанням дифракційних монохроматорів з високою роздільною здатністю ($\Delta\lambda \leq 0,2$ нм) і детекторів випромінювання типу ФЕП – 106, ФЕП – 142, каналового помножувача. Іони ізотопів водню, гелію і неону отримувались за допомогою газового розрядного джерела, прискорювались до необхідної енергії (5-21 кеВ), розділялись за масою і зарядом 180° магнітним мас-аналізатором і направлялись на мішень Be під різними кутами відносно нормалі до її поверхні ($\alpha=0, 30, 45, 60, 80^\circ$). Надвисоко-вакуумна установка "Карпати", на якій виконувались такі дослідження описана в [3]. З іонами K^+ експерименти виконано на установці "Ореол" [4], яка оснащена джерелом іонів з поверхневою іонізацією. Воно дає можливість отримати високостабільний пучок іонів калію з регульованою в інтервалі 0-20 кеВ і густиною струму до 1 mA/cm^2 . Запис спектрів випромінювання, яке виникло в області взаємодії іонів з поверхнею,

проводився за допомогою електронного потенціометра КСП – 4 при швидкості сканування 1-4 Å/с, а інтенсивності окремих спектральних ліній вимірювались в статичному режимі за допомогою системи рахунку окремих фотоелектронів.

Окремі ділянки досліджених спектрів випромінювання при бомбардуванні іонами H_2^+ і He^+ представлено на рис. 1 і 2.

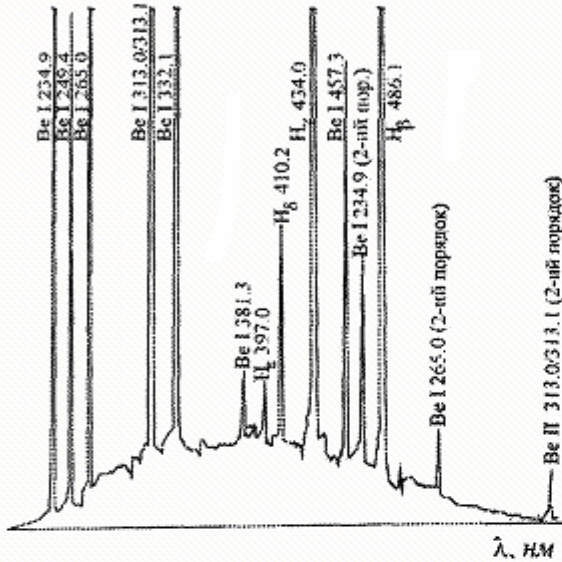


Рис.1. Ділянка спектра при бомбардуванні берилію іонами H_2^+ (15 кеВ) під кутом $\alpha=60^\circ$ відносно нормалі до поверхні. Спостереження випромінювання під кутом $\theta=60^\circ$.

Випромінювання спостерігалось під кутом $\theta=30^\circ$ відносно нормалі до поверхні при її бомбардуванні під кутом $\alpha=60^\circ$. Тобто оптичною системою здійснювався збір фотонів, що емітуються як частинками, які відлітають від поверхні, так і з самої поверхні, куди попадає бомбардуючий іонний пучок.

В спектрі спостерігаються чотири види випромінювання різні за природою. Це, насамперед, серії ліній атома і іона берилію, тобто розпорошених частинок матеріалу мішені, які є інтенсивними при всіх сортах бомбардуючих іонів. Другий вид – лінії розсіяних частинок первинного пучка, тобто серії ліній атомів водню і гелію. Вони також є інтенсивними. Третій вид випромінювання – це слабка лінія $\text{Na I } 589,0/6$, від розпорошених частинок домішки мішені. В окремих випадках

спостерігається також смуга молекули $\text{CN } 431,5$ нм, як поверхневого забруднення мішені, а також смуга поблизу 499 нм, яка, не виключено, належить молекулі $\text{BeH } 498,8$ нм. Певний сумнів викликає її відсутність при бомбардуванні Be іонами водню. Однак з огляду на значно менший коефіцієнт розпорошення поверхні іонами водню ніж іонами He^+ (або ще важчими іонами) можливо є оправданою її поява тільки за участі останніх. Водень може бути розчинений в берилії [5]. Нарешті четвертий вид випромінювання – це неперервне випромінювання в широкому діапазоні довжин хвиль з пологим максимумом близько 400 нм. Природа цього випромінювання його потребує подальшого дослідження. Ми вважаємо, що це може бути рекомбінаційне випромінювання, яке емітується безпосередньо з поверхневих шарів бомбардованої мішені.

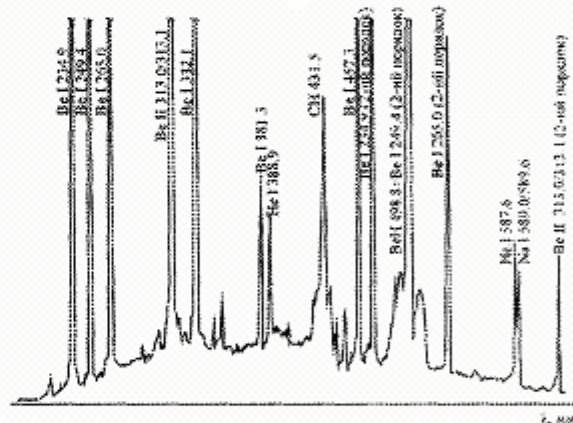


Рис.2. Ділянка спектра при бомбардуванні поверхні Be іонами He^+ ($E_p=15$ кеВ, $\alpha=\theta=45^\circ$).

Якщо спостерігати досліджування свічення вздовж бомбардованої поверхні, то останній вид випромінювання не реєструється, що видно із рис.3, на якому приведено ту ж ділянку спектра, що і на рис.2 і для тих же енергій іонів He^+ , але падаючих вздовж нормалі до поверхні. Таке рекомбінаційне випромінювання спостерігалось рядом авторів при електронному опроміненні поверхні [6]. Зауважимо, що в цих дослідженнях воно добре спостерігається тільки при бомбардуванні поверхні іонами водню і

гелію і зовсім відсутнє при бомбардуванні іонами K^+ . Певна аналогія прослідковується з тим, що має місце при збудженні поверхневих плазмонів срібла, які релаксують із випромінюванням [7]. Вони ефективно збуджуються іонами водню і гелію, але не збуджуються іонами K^+ . Певно механізм збудження і поверхневих плазмонів Ag_s і електронів зони провідності, з якими пов'язано рекомбінаційне випромінювання Be , є однаковий. Вірогідно, що це потенційний механізм, за яким енергія бомбардуючого іона при його нейтралізації передається електронній підсистемі металу.

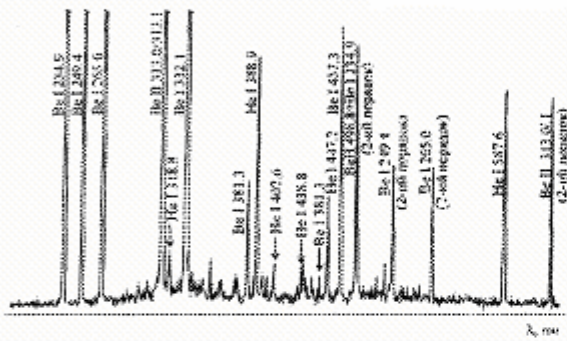


Рис.3. Ділянка спектра при бомбардуванні берилію іонами He^+ (15 кеВ) вздовж нормалі до поверхні. Спостереження випромінювання вздовж поверхні.

На рис. 4 і 5 приведено ділянки спектрів при бомбардуванні Be іонами Ne^+ і K^+ . Як і в уже описаних спектрах для легких іонів, спектри складаються із тих же видів випромінювання, за винятком рекомбінаційного. Можливо незначної інтенсивності останнє має місце у випадку бомбардування іонами Ne^+ . Із-за ефективнішого розпорощення важкими іонами лінії BeI і $BeII$ в цих спектрах ще інтенсивніші. Так, при однакових умовах і енергіях бомбардування іонами H_2^+ , He^+ і Ne^+ інтенсивність ліній BeI відноситься як 1:5:15.

Збільшення енергії бомбардуючих іонів від 5 до 21 кеВ призводить до зменшення інтенсивності ліній BeI , $BeII$. При цьому інтенсивність ліній, що випромінюються розсіяними атомами водню і гелію також

помітно зменшуються. Зменшення інтенсивності ліній розсіяних частинок можна пояснити з врахуванням того, що коефіцієнт розсіювання також зменшується з ростом енергії первинних іонів. При цьому зростає швидкість розсіяних частинок, а це впливає на процеси їх нейтралізації в збуджені стани, що також слід враховувати.

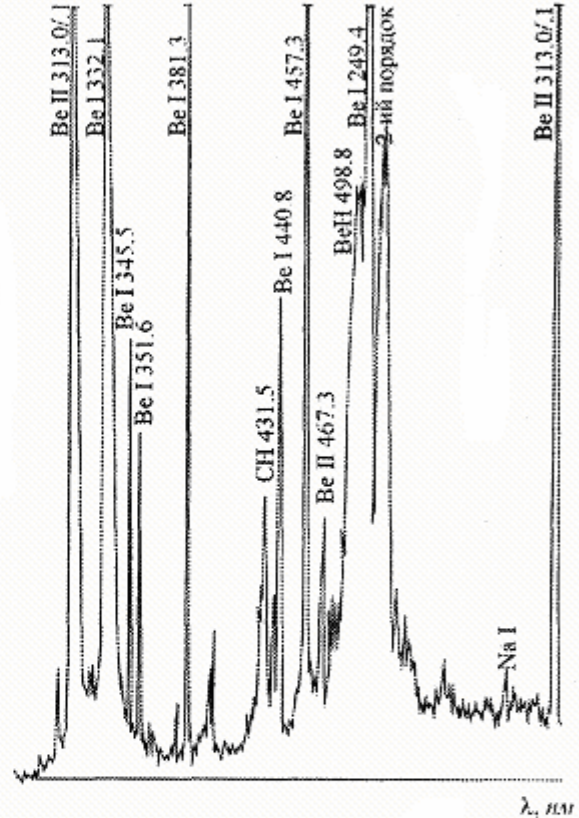


Рис.4а. Ділянка спектра при бомбардуванні Be іонами Ne^+ ($E_p=15$ кеВ, $\alpha=0^\circ$).

Що стосується розпорощених збуджених атомів і іонів Be , то їх зменшення з ростом енергії бомбардуючих іонів слід віднести повністю на рахунок зменшення коефіцієнта розпорощення. Адже відомо [1,8], що останній має максимальне значення для He^+ - Be при $E_p \approx 1$ кеВ тобто при більших E_p число розпорощених частинок берилію спадає. Швидкість же розпорощених атомів майже не змінюється в досліджуваному діапазоні E_p , для якого характерно розпорощення в режимі

лінійних каскадів, якщо бомбардування поверхні здійснюється під невеликими кутами. При великих α режим розпорошення складніший: появляются швидкі частинки, які вибито в кратних зіткненнях. Імовірність їх збудження

залежить від швидкості відльоту від поверхні [9], що впливає і на залежність від E_p . Це, певно, в експерименті і проявляється в різній швидкості спаду інтенсивності різних ліній з ростом E_p .

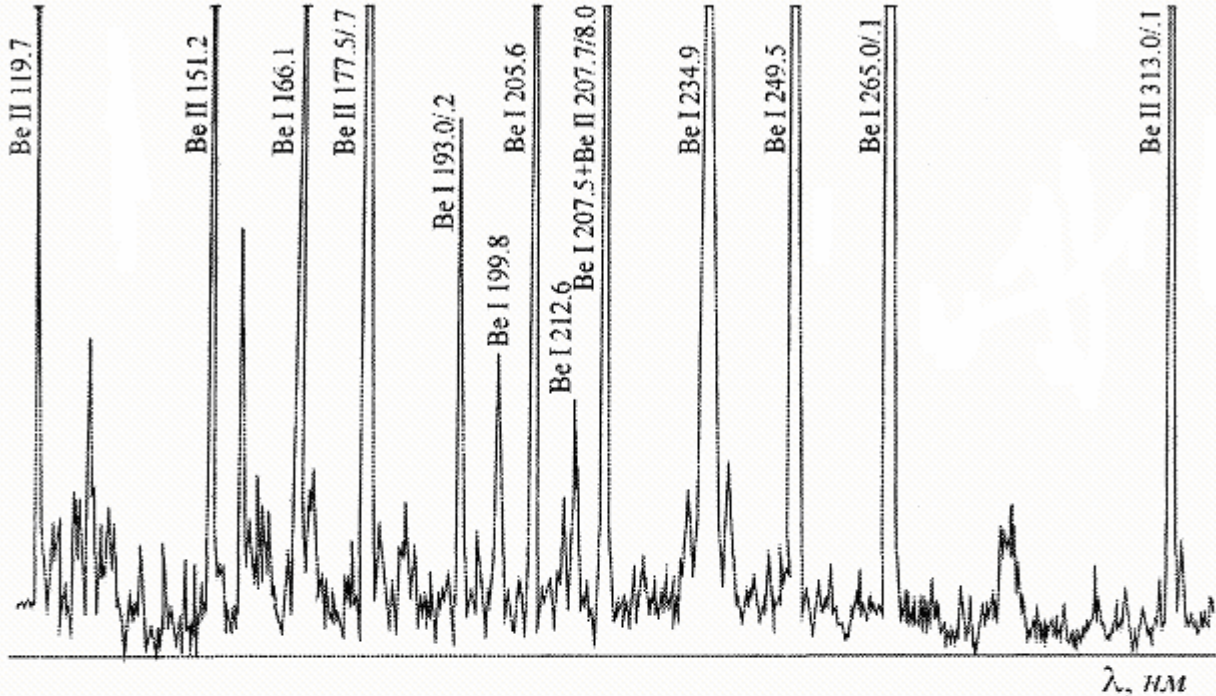


Рис.46. Ділянка спектра при бомбардуванні поверхні Be іонами Ne^+ ($E_p=15$ кеВ, $\alpha=60^\circ$, $\theta=30^\circ$).

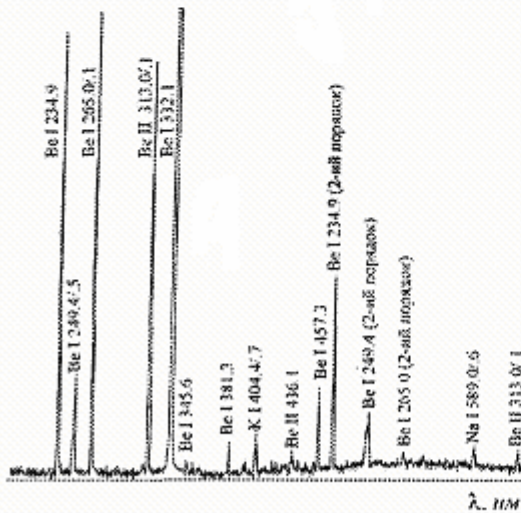


Рис.5. Ділянка спектра при бомбардуванні Be іонами $K^+ Ne^-$ ($E_p=8$ кеВ, $\alpha=5^\circ$).

1. Плешивцев Н.В., Бажин А.И. Физика взаимодействия ионных пучков на материалы. М.: "Вузовская книга", 1998, 392 с.
2. Курнаев В.А., Машкова Е.С., Молчанов В.А. Отражение легких ионов от поверхности твердого тела. М.: Энергоатомиздат, 1985, 192 с.
3. С.С.Поп, С.Ф. Белых, В.Г. Дробнич, В.Х.Ферлегер. Ионно-фотонная эмиссия металлов. М.: Ташкент, 1989, 200 с.
4. Дробнич В.Г. Экспериментальное и теоретическое исследование механизмов эмиссии возбужденных распыленных частиц при бомбардировке металлов (Al и Mo) ионами килоэлектронвольтных энергий /Дис. канд. физ.-мат. наук. Ужгород, 1982, 186 с.
5. Взаимодействие водорода с металлами. Под ред. А.П.Захарова. М.: "Наука", 1987, 295 с.
6. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Под ред. Р.Бериша. М.: "Мир", ч.1, 1984, 336 с.

ION-PHOTON EMISSION DURING ION BOMBARDMENT OF BERYLLIUM SURFACE.

Sharodi I.S., Bandurin Yu.A., Pop S.S.

Uzhgorod National University, Pidgirna str. 46, Uzhgorod, 88000 Ukraine

e-mail: qel@univ.uzhgorod.ua

We present a spectral data on the radiation emitted under sputtering of Be polycrystalline surface with H^+ , H_2^+ , H_3^+ , He^+ , Ne^+ and K^+ ions. The radiation is studied within the 50-800 nm wavelength range. The energy of the primary beam was varied within 5-20 keV range. Four types of radiation have been observed. Their characteristics and origins were studied and are discussed in the paper.