

СПЕКТРАЛЬНИЙ СКЛАД ВИПРОМІНЮВАННЯ ПОВЕРХНІ КРЕМНІЮ ПРИ БОМБАРДУВАННІ ІОНАМИ І ЕЛЕКТРОНАМИ СЕРЕДНІХ ЕНЕРГІЙ

М.І. Лінтур, М.В. Приходько, Л.М. Маркович, А.Й. Дашенко, С.С.Поп

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

Методом електрон-фотонної емісії (ЕФЕ) та іон-фотонної емісії (ІФЕ) вивчено спектральний склад поверхні кремнію при бомбардуванні електронами і іонами середніх енергій. Пояснено виявлені особливості в отриманих спектрах. Обчислено абсолютний вихід фотонів з поверхні кремнію при бомбардуванні електронами з енергією 800 еВ в діапазоні довжин хвиль 200-800 нм, який становить $N \approx 6,9 \times 10^{-4}$ фот./ел.

Широке використання кремнію в сучасних мікро- та нано-технологіях викликають великий інтерес до дослідження його мікроскопічних характеристик, зокрема електронної структури поверхні [1,2]. В даній роботі вивчення кремнію з поверхневою орієнтацією (111) проводилося методами іон-фотонної емісії (ІФЕ) і електрон-фотонної емісії (ЕФЕ). Дослідження ІФЕ проводились на установці „Карпати” в діапазоні довжин хвиль 200-600 нм, де поверхня кремнію опромінювалась іонами He^+ з енергією 15 кеВ під кутом 30° відносно нормалі до поверхні. Струм іонного пучка на мішені становив $I_{\text{іон.}}=300$ мкА, тиск атмосферних газів в робочій камері $P_{\text{іон.}}=3 \times 10^{-6}$ Тор. Дослідження ЕФЕ проводились на „Надвисоковакуумному електрон-фотонному спектрометрі”, який створений на базі установки УСУ-4 [3], в діапазоні довжин хвиль 200-800 нм, де поверхня кремнію опромінювалась електронами з енергією 800 еВ під кутом 25° відносно нормалі до поверхні. Кінцевий тиск атмосферних газів в робочій камері становив $P_{\text{ел.}} \sim 10^{-9}$ Тор, а електронний струм на мішені $I_{\text{ел.}}=1,5$ мА.

Техніка експерименту в обох випадках однакова: свічення, яке виникає на поверхні зразка в результаті бомбардування іонами і електронами, фокусується лінзою на вхідну щілину монохроматора (на установці „Карпати” використовувався

монохроматор МДР-2, а на „Надвисоковакуумному електрон-фотонному спектрометрі” – монохроматор МДР-12), де виділене випромінювання детектується фотоелектронним помножувачем ФЕУ-106. Сигнал з ФЕУ-106 після підсилення реєструється в режимі відліку фотоелектронів частотоміром або за допомогою електронного потенціометра КСП-4 записується спектр випромінювання.

Спектри іон- і електрон-фотонної емісії з поверхні кремнію представлені на рис.1, 2.

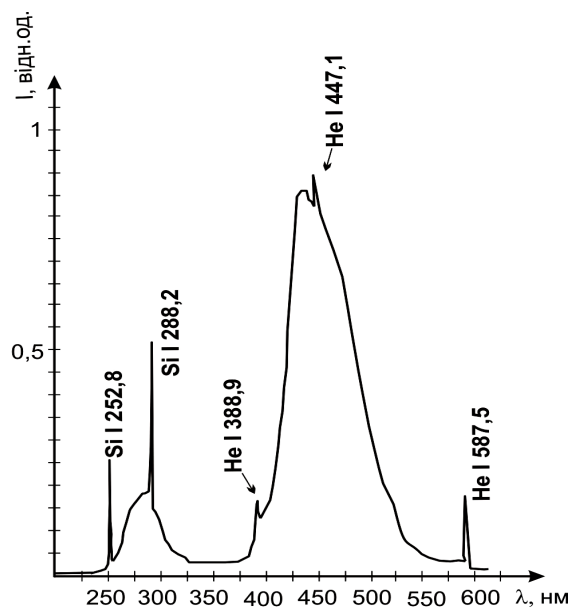


Рис.1. Спектр іон-фотонної емісії кремнію ($E_{\text{іон.}}=15$ кеВ, $I_{\text{іон.}}=300$ мкА)

В спектрах іон- і електрон-фотонної емісії спостерігаємо два види випромінювання: неперервне випромінювання в широкому діапазоні довжин хвиль і характеристичне випромінювання.

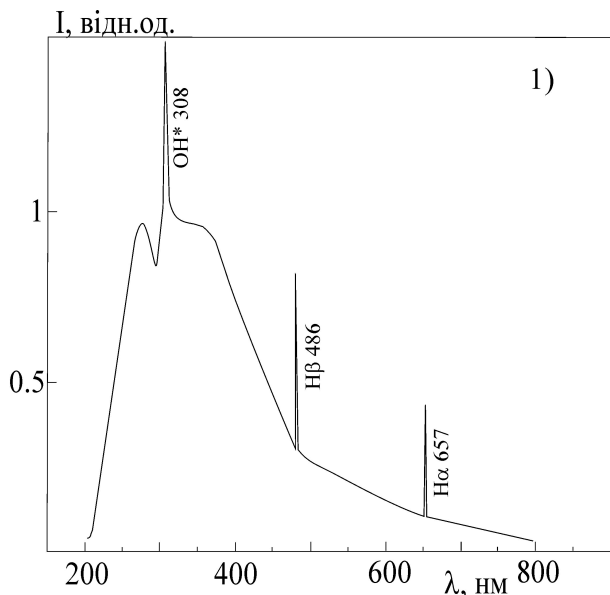


Рис.2. Спектр електрон-фотонної емісії кремнію ($E_{\text{ел.}}=800$ еВ, $I_{\text{ел.}}=1,5$ мА)

В спектрограмі іон-фотонної емісії спостерігаємо неперервне випромінювання з максимумом довжин хвиль біля $\lambda_1=280$ нм і $\lambda_2=440$ нм, лінії кремнію Si I 288,2 і Si I 252,8, і лінії He I 388,9, He I 587,5 і He I 447,1. Лінії Si I 288,2 і Si I 252,8 – це розпоршені з поверхні атоми кремнію, а лінії He I 388,9, He I 587,5 і He I 447,1 – це розсіяні на поверхні досліджуваного зразка іони гелію.

В спектрах електрон-фотонної емісії спостерігаємо неперервне випромінювання з максимумом $\lambda_1=280$ нм, а також молекулярну смугу OH^* 308 і лінії серії Бальмера водню (H_α 657, H_β 486). Аналіз одержаних результатів показує, що поверхня кремнію, навіть в умовах надвисокого вакууму в робочій камері активно покривається частинками залишкового газу. Відсутність смуги радикала OH^* і ліній водню в спектрі іон-фотонної емісії кремнію пояснюється постійною доочисткою поверхні кремнію в результаті розпоро-

шення адсорбованих на досліджуваній поверхні частинок залишкової атмосфери іонним пучком.

Неперервне випромінювання з максимумом $\lambda_1=280$ нм, яке спостерігається в обох спектрах, має, напевно, одну и ту ж природу. Енергетичне положення цього максимуму відповідає енергії квантів міжзонних переходів Si [4,5], зокрема переходам електронів з поверхневих електронних станів до об'ємних станів зони Бріллюена ($S_4-\Gamma_2$). Максимум $\lambda_2=440$ нм, який спостерігається в спектрі іон-фотонної емісії кремнію, також корелює з енергією прямих міжзонних переходів $\Gamma_{15}-\Gamma_{25}$ зони Бріллюена [6].

Для визначення абсолютного виходу фотонів з поверхні кремнію при взаємодії з електронами необхідно знати криву чутливості системи реєстрації „Надвисоковакуумного електрон-фотонного спектрометра”. Оскільки в монохроматорі МДР-12 в діапазоні довжин хвиль від 200 до 800 нм використовуються дві дифракційні ґратки, тому і крива чутливості складається з двох кривих. Для ґратки №1, яка використовується, під час експериментів в діапазоні 200-500 нм і ґратки №2, яка використовується в діапазоні 400-1000 нм (рис.3).

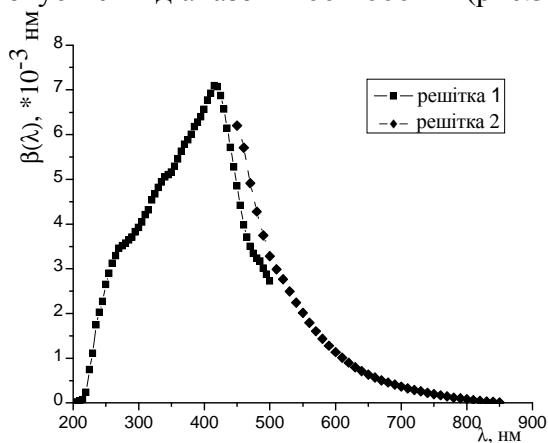


Рис.3. Крива чутливості системи реєстрації

При калібровці системи реєстрації використовувались еталонні джерела неполяризованого випромінювання, а саме вольфрамова лампа СИ-8-200 (для спектральної області 350-800 нм) і газорозрядна воднева лампа ДВС-25 (для області

200-350 нм). Спектри свічення цих ламп, записані за допомогою одних і тих же спектральних приладів і детекторів, як і при записі спектрів електрон-фотонної емісії кремнію. Істинний спектральний розподіл інтенсивності вольфрамової лампи СИ-8-200 обчислюється за формулою Планка для заданої температури T з врахуванням випромінюючої властивості сірого тіла [7], який ми отримали за допомогою комп'ютерної програми створеної в відділі емісійної електроніки ПНДЛ ФЕ. Спектр отриманий з лампи ДВС-25, приводиться на теоретичний спектр, який взято з роботи [8] і прив'язується до кривої розподілу інтенсивності вольфрамової лампи СИ-8-200.

На рис.4 представлений спектр ЕФЕ кремнію в абсолютних одиницях, приведений з урахуванням спектральної чутливості.

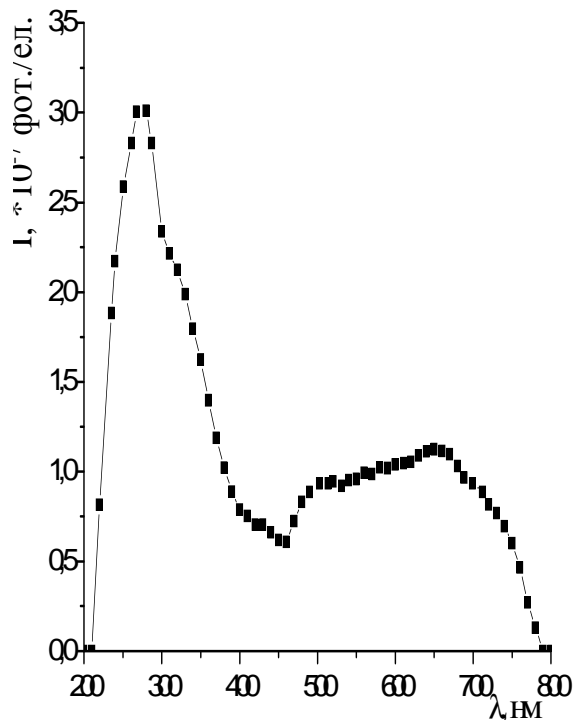


Рис.4. Спектр ЕФЕ кремнію в абсолютних одиницях.

Для представлення спектра ЕФЕ кремнію, в абсолютних одиницях необхідно привести експериментальний спектр кре-

мнію (рис.2) на криву чутливості системи реєстрації (рис.3) і помножити на коефіцієнт, який отримано в результаті ділення абсолютного виходу фотонів з поверхні кремнію, на даній довжині хвилі, на відповідне значення приведенного спектру ЕФЕ кремнію на криву чутливості.

Формула по якій обчислюється абсолютний вихід фотонів з поверхні на даній довжині хвилі:

$$N \left[\frac{\Phi_{от}}{c \cdot \text{нм}} \right] = \frac{I_{експ.} \cdot S \cdot 2\pi \cdot \beta(\lambda)}{\beta(\lambda) \cdot S_{експ.} \cdot I_{ел.} \cdot \Omega \cdot D \cdot \Delta \ell_{експ.}} \quad (1)$$

де $I_{експ.}(\lambda)$ – інтенсивність свічення в відносних одиницях на даній довжині;

$\beta(\lambda)$ – чутливість системи реєстрації на даній довжині;

S – площа взаємодії пучка електронів з поверхнею досліджуваного зразка;

$S_{експ.}$ – площа з якої спостерігаємо свічення поверхні досліджуваного зразка;

$I_{ел.}$ – сила струму електронного пучка;

Ω – тілесний кут спостереження;

D – обернена лінійна дисперсія монохроматора МДР-12;

$\Delta \ell_{експ.}$ – ширина вхідної щілини монохроматора.

Аналізуючи даний спектр, спостерігаємо ріст інтенсивності на краях спектру і різкий спад в середині в порівнянні з рис.2, так як максимум чутливості детектора випромінювання припадає на область близько 400 нм, а при переміщенні в ультрафіолетову и червону області різко падає чутливість системи реєстрації (рис.3). Використавши значення, які представлені на рис.4, ми обчислили абсолютний сумарний вихід фотонів з поверхні кремнію на один падаючий електрон в діапазоні довжин хвиль від 200 до 800 нм, який склав $N \approx 6,9 \times 10^{-4}$ фот./ел.

Таким чином, в даній роботі встановлена кореляція особливостей спектрів ІФЕ і ЕФЕ кремнію. Визначений експериментально абсолютний вихід фотонів з поверхні кремнію при електронному бомбардуванні його поверхні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Д. Вудраф, Т. Делчар, Современные методы исследования поверхности (Мир, Москва, 1989).
2. С. Поп, І. Шароді, Фізична електроніка, (Євросвіт, Львів, 2001).
3. М.І. Лінтур, Л.М. Маркович, В.О. Мастюгін, М.В. Приходько, І.С. Шароді, Науковий вісник УжНУ, сер. фіз. 10, 191 (2001).
4. R.I.G. Unrberg, E. Landemark, Y.C. Chao, J. Electr. Spectr. Relat. Phenom. 75, 197 (1995).
5. L. Gavioli, M.G. Betti, A. Cricenti, C. Marioni, J. Electr. Spectr. Relat. Phenom. 76, 541 (1995).
6. O.B. Shpenik, T.Yu. Popik, V.M. Feyer, Yu.V. Popik, Physica B. 315, 133 (2002).
7. В.И. Малышев. Введение в экспериментальную спектроскопию. (Наука, Москва, 1979).
8. А.Н. Зайдель, Г.В. Островская, Ю.И. Островский. Техника и практика спектроскопии. (Наука, Москва, 1976)

SPECTRAL COMPOSITION OF RADIATION UNDER THE BOMBARDMENT OF SURFACE OF THE SILICON BY IONS AND ELECTRONS OF MIDDLE ENERGIES

M.I. Lintur, M.V. Prikhodko, L.M. Markovich, A.I. Daschenko, S.S. Pop

Uzhgorod National University, 88000 Uzhgorod, Voloshina St. 54

By the method of electron-photon and ion-photon emission spectral structure of the surface of silicon at electron and ions bombardment of medium energies is investigated. The revealed features in the received spectra are explained. The absolute output of photons from a surface of silicon at bombardment electrons with energy 800 eV in a range of lengths of waves of 200-800 nanometers which makes $N \approx 6,9 \cdot 10^{-4}$ phot./el. is calculated.