

УДК 537.533.2:535.14:546.28  
PACS number(s): 07.65. Gj

## АБСОЛЮТНИЙ ВИХІД ФОТОНІВ З ПОВЕРХНІ ЧИСТОГО ТА ЛЕГОВАНОГО ДОМІШКАМИ КРЕМНІЮ У РАЗІ ЕЛЕКТРОННОГО БОМБАРДУВАННЯ

М. Лінтур, М. Приходько, Л. Маркович, А. Дашенко, С. Поп

*Ужгородський національний університет  
кафедра квантової електроніки  
вул. Волошина 54, 88000 Ужгород, Україна  
e-mail: problemlab@gmail.com*

Отримано спектри свічення поверхні чистого і легovanого домішками кремнію. У спектрах визначено три види випромінювання, діапазони довжин хвиль, молекулярні смуги та характеристичне випромінювання. Також спектри свічення чистого і легovanого іонами  $As^+$ ,  $B^+$ ,  $P^+$ , одержані на кривій чутливості системи реєстрації і представлені в абсолютних одиницях. В діапазоні довжин хвиль від 200 до 800 нм обчислено сумарний вихід фотонів з поверхні чистого та легovanого домішками кремнію.

*Ключові слова:* емісія фотонів, випромінювання, поверхня кремнію.

Застосування кремнію в сучасних мікро- і нанотехнологіях зумовлює інтерес до дослідження його мікроскопічних характеристик, зокрема електронної структури поверхні. Вона залежить від сорту імплантованих частинок і адсорбованих на поверхні кремнію атомів і молекул залишкової атмосфери. Використовуються різні сучасні методи для таких досліджень [1, 2]. У статті методом електрон-фотонної спектроскопії (ЕФС) досліджено емісію оптичного випромінювання в діапазоні 200–800 нм з метою виявлення особливостей характеристик електрон-фотонної емісії з поверхні. У ролі досліджуваних зразків вибрано кремній високої чистоти, а також кремній, легований іонами  $P^+$ ,  $B^+$ ,  $As^+$ , тобто матеріали електронної техніки. Зразки монокристалічного кремнію леговано іонами бору і фосфору з однаковою дозою  $D=100$  мкКл при енергії іонів 200 кеВ. Доза легування кремнію миш'яком становила 500 мкКл при енергії іонів 80 кеВ.

Дослідження виконано на надвисоковакуумному електрон-фотонному спектрометрі [3]. Залишковий тиск атмосферних газів у камері взаємодії становив  $\sim 10^{-9}$  Тор. Поверхню кремнію бомбардували пучком електронів з енергією 600 еВ і густиною струму  $250$  мкА/см<sup>2</sup> під кутом  $15^\circ$  відносно нормалі до поверхні. Кут спостереження випромінювання був близький до нормалі.

Під час проведення експерименту пучок електронів, сформований електронною гарматою, спрямовують на поверхню досліджуваного зразка. Випромінювання поверхні, на яку потрапляє пучок електронів, виводять з робочої камери через віконце з кварцу. За допомогою лінзи випромінювання фокусується на вхідну щілину монохроматора МДР-12. Виділене монохроматором

випромінювання детектується фотоелектронним помножувачем ФЭУ-106. Сигнал фото помножувача після підсилювача-дискримінатора реєструють в режимі лічби фотоелектронів частотоміром або за допомогою електронного потенціометра записують досліджуваний спектр. Криву чутливості системи реєстрації в абсолютних одиницях зображено на рис. 1.

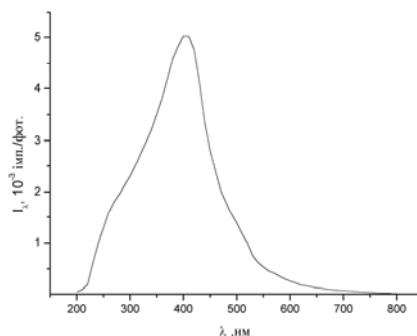


Рис. 1. Крива чутливості системи реєстрації

Отримані спектрограми ЕФЕ поверхні чистого і легованого іонами  $B^+$ ,  $P^+$ ,  $As^+$  кремнію подано на рис. 2–5.

У досліджених спектрах виявлено такі види випромінювання: неперервне випромінювання у широкому діапазоні довжин хвиль; молекулярні смуги  $OH$  і спектральні лінії атома водню  $H_\beta$ ,  $H_\gamma$ ,  $H_\epsilon$ . У випадку кремнію, який леговано іонами бору, виявлено молекулярну смугу  $CN$ . У всіх досліджених спектрах простежується неперервне випромінювання з максимумом при довжині хвилі  $\lambda_1=270$  нм. Водночас у спектрах для кремнію, який леговано іонами фосфору і миш'яку, спостерігаються додаткові смуги неперервного випромінювання з максимумами при  $\lambda_2=440$  і  $\lambda_3=480$  нм. Їх інтенсивність значно більша для кремнію, легованого фосфором. У спектрах чистого і легованого бором кремнію цих особливостей не простежено.

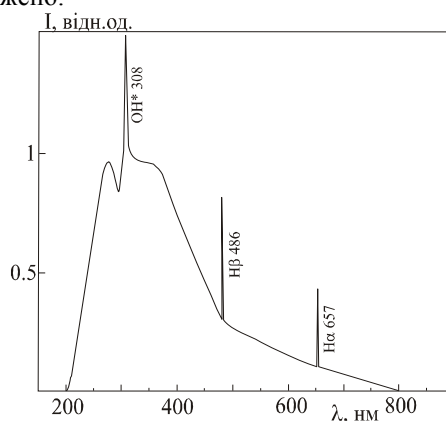


Рис. 2. Спектрограма ЕФЕ кремнію високої чистоти

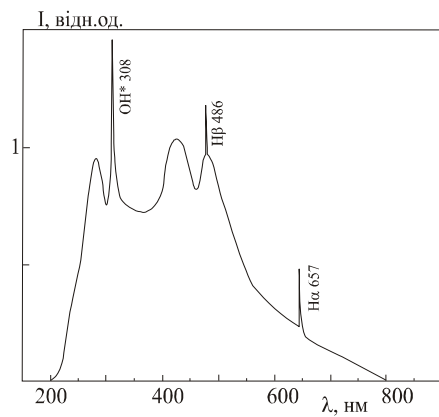


Рис. 3. Спектрограма EFE кремнію, легованого фосфором

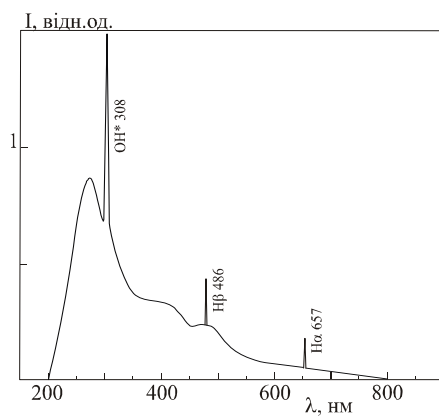


Рис. 4. Спектрограма EFE кремнію, легованого мш'яком

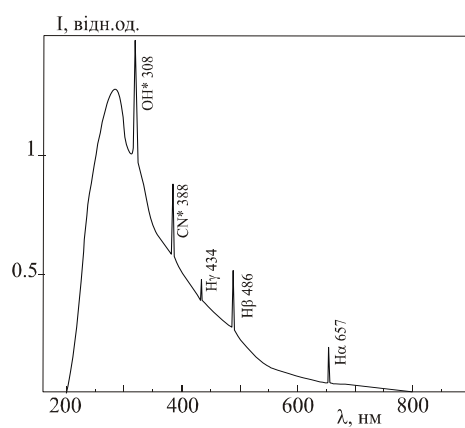


Рис. 5. Спектрограма EFE кремнію, легованого бором

Неперервне випромінювання з максимумом при  $\lambda_1=270$  нм, яке спостерігається у всіх досліджуваних випадках, імовірно має одну і ту ж природу. Його за механізмом пов'язуємо з електронними міжзонними переходами [4–6]. Вони відповідають переходам електронів з поверхневих електронних станів до об'ємних станів наведеної зони Бріллюена ( $S_4-\Gamma_2$ ). Свічення з максимумом при  $\lambda_2=440$  нм відповідає прямим об'ємним переходам  $\Gamma_{15}-\Gamma_{25}$ , а свічення з максимумом  $\lambda_3=470$  нм – це непрямі об'ємні переходи, властиві для напівпровідників *n*-типу ( $X_4-\Gamma_{25}$ ) зони Бріллюена [7, 8].

На підставі отриманих результатів робимо висновок, що поверхня кремнію, навіть в умовах надвисокого вакууму, активно покривається атомами і молекулами залишкового газу в робочій камері. Це впливає з наявності у всіх спектрах молекулярної смуги ОН і характеристичних ліній атомів водню  $H_\beta$ ,  $H_\gamma$ . Вони, очевидно, є фрагментами молекул води, адсорбованими на поверхні, які дисоціюють під дією електронів.

Спектри свічення чистого і легованого миш'яком і різними дозами фосфору і бору кремнію, наведені на кривій чутливості системи реєстрації, показано на рис. 6–9.

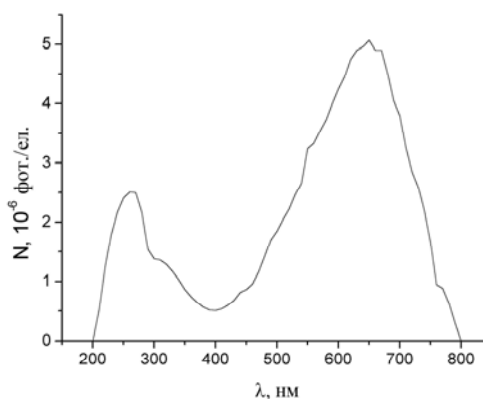


Рис. 6. Спектр ЕФЕ чистого кремнію з урахуванням чутливості системи реєстрації

Розподіл інтенсивностей у цих спектрах показано в абсолютних одиницях (кількість фотонів наведено на падаючий електрон). На відміну від спектрів, показаних на рис. 2–5, спектрограми, наведені на рис. 6–9, мають два максимуми близько  $\lambda_1=270$  і  $\lambda_2=650$  нм.

Особливості, виявлені на кремнію, який легований миш'яком і фосфором на приведених на криву чутливості системи реєстрації, відсутні, оскільки вони потрапляють майже в максимум кривої чутливості системи реєстрації. Максимум при  $\lambda_2=650$  нм ми пов'язуємо з непрямыми об'ємними переходами наведеної зони Бріллюена ( $\Gamma_{25}-L_1$ ). Відсутність цієї особливості у спектрах без урахування кривої чутливості системи реєстрації пояснюють тим, що у цій області довжин хвиль чутливість ФЕП є дуже низькою.

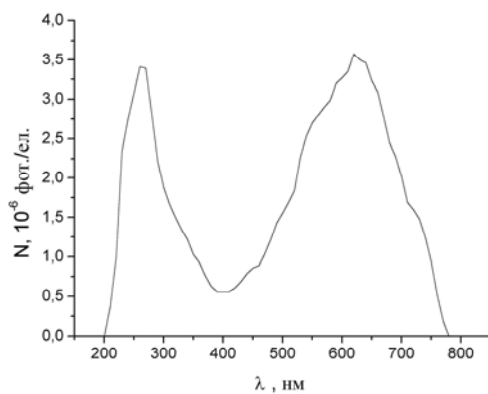


Рис. 7. Спектрограма EFE кремнію, легованого фосфором з урахуванням чутливості системи реєстрації

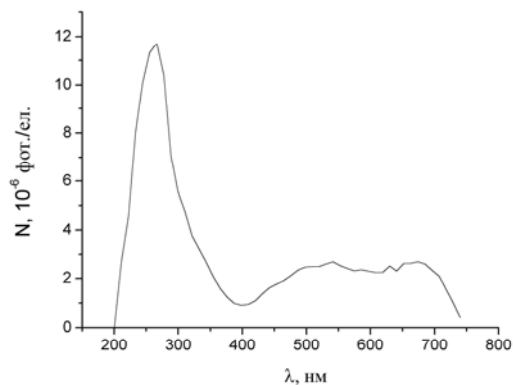


Рис. 8. Спектрограма EFE кремнію, легованого бором з дозою з урахуванням чутливості системи реєстрації

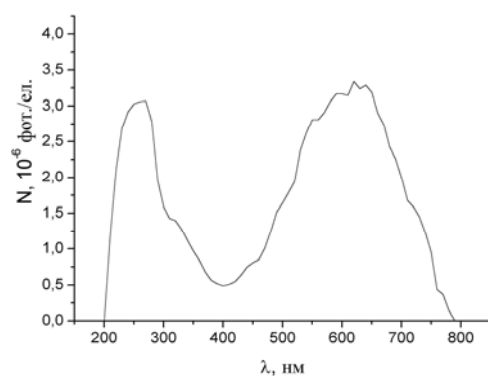


Рис. 9. Спектрограма EFE кремнію, легованого мід'яком з урахуванням чутливості системи реєстрації

Обчислений сумарний вихід фотонів з поверхні чистого і легованого домішками кремнію наведено у табл. 1.

Таблиця 1

№ з/п	Об'єкт дослідження	$N \cdot 10^{-3}$ , фот/ел
1	Si (високої чистоти)	1,3
2	Si + P <sup>+</sup>	1,1
4	Si + B <sup>+</sup>	1,6
6	Si + As <sup>+</sup>	1,1

Отже, ми отримали спектри свічення, яке виникає під час взаємодії електронів середніх енергій з поверхнею чистого і легованого різними дозами легування іонами фосфору, бору і миш'яку кремнію. У спектрах визначено три види свічення, які є різними за природою: неперервне випромінювання в широкому діапазоні довжин хвиль, яке пов'язується з електронними міжзонними переходами; молекулярні смуги і характеристичне випромінювання, яке виникає унаслідок десорбції з поверхні досліджуваних зразків збуджених частинок залишкової атмосфери. Обчислено абсолютний вихід фотонів з поверхні чистого і легованого кремнію.

1. Вудраф Д., Делчер Т. Современные методы исследования поверхности. М.: Мир, 1989. 436 с.
2. Поп С.С., Шароді І.С. Фізична електроніка. Л.: Євросвіт, 2001. 247 с.
3. Лінтур М.І., Маркович Л.М., Мاستюгін В.О. та ін. Надвисоковакуумний електрон-фотонний спектрометр. // Наук. вісн. Ужгород. ун-ту. Сер. фіз. 2001. № 10. С. 191–194.
4. Лінтур М.І., Приходько М.В., Маркович Л.М. та ін. Свічення поверхні чистого і легованого домішками кремнію під дією електронів // Наук. вісн. Ужгород. ун-ту. Сер. фіз. 2003. № 14. С. 134–137.
5. Unrberg R.I.G., Landemark E., Chao Y.C. Higt-resolution cje-level studies of silicon surfaces // J. Elektr. Spekt. Relat. Phenom. 1995. Vol. 75. P. 197–207.
6. Gavioli L., Betti M.G., Cricenti A., Marioni C. Surface elektronik structur of Si (100) // J. Elektr. Spekt. Relat. Phenom. 1995. Vol. 76. P. 541–545.
7. Цидильковський І.М. Зонная структура полупроводников. М.: Наука, 1978. 328 с.
8. Rowe J.E., Ilach H. Surface-state transitions of silicon in elektron energy-loss spectra // Phys. Rev. Lett. 1973. Vol. 31. P.102–105.

**ABSOLUTE OUTPUT OF PHOTONS FROM A SURFACE PURE AND DOPED  
IMPURITY OF SILICON UNDER THE ELECTRONIC BOMBING****M. Lintur, M. Prikhodko, L. Markovich, A. Daschenko, S. Pop**

*Uzhgorod National University  
Department of Quantum Electronics  
Voloshina Str., 54, UA-88000 Uzhgorod, Ukraine  
e-mail: problemlab@gmail.com*

Spectra of pure and doped silicon exposed was obtained. In spectra there was established three species of radiation with different nature: continuous radiation in the broad range of wavelength, molecular band and characteristic emission. Also spectra of pure and doped As<sup>+</sup>-, B<sup>+</sup>-, P<sup>+</sup>-ions are placed at the curve of sensitivity of the registering system and are presented in the absolute unites. In the range within 200–800 nm we calculated the total output of photons from the surface of pure and doped silicon.

*Key words:* photon emission, radiation, silicon surface.

Стаття надійшла до редколегії 17.05.2006

Прийнята до друку 09.06.2008