

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-178-181>

УДК 681.585.58+681.7.069.3

КВАНТОВИЙ ВИХІД ФОТОЕМІСІЇ І МЕТОДИ ЙОГО ВИМІРЮВАННЯ

Чернікова І.Д., Черніков М.Г., Чернікова О.М., Недобіга В.О.

PHOTOEMISSION QUANTUM OUTPUT AND METHODS OF ITS MEASUREMENT

Chernikova I.D., Chernikov M.G., Chernikova O.M., Nedobega V.O.

Останнім часом досягнуто значного прогресу в розробці інтенсивних джерел випромінювання і нових оптичних елементів для вакуумної ультрафіолетової частини спектру (ВУФ). Цей прогрес послужив основою для розвитку багатьох перспективних практичних додатків: рентгенолітографія, рентгенівської голографії, мікроскопії та ін. Для розвитку цих напрямків, зокрема для оптимізації параметрів джерел і вибору оптичних елементів, необхідні якісні кількісні (абсолютні) вимірювання характеристик випромінювання. Однак проведення таких вимірювань в ВУФ діапазоні спектра є досить складним завданням. Справа в тому, що в цьому діапазоні спектра всі речовини володіють великим і сильно мінливим, залежно від довжини хвилі, поглинанням. Тому всі детектори випромінювання вимагають незалежного калібрування по еталонному джерелу у всьому діапазоні довжин хвиль, так як їх чутливість залежить від властивостей і чистоти поверхні, яка поглинає. У представленій роботі показана методика фотометрії монохроматичного випромінювання в ультрафіолетовій області спектра, використовуючи два прилади: калібрований термостолбик і фотоелектронний помножувач, вікно якого покрито тонким шаром саліцилової-кислого натрію.

Ключові слова: фотоелектронний помножувач, фотокатод, фотон, монохроматичне випромінювання, квант світла, термостолбик

Вступ. Всі детектори випромінювання вимагають незалежного калібрування по еталонному джерелу у всьому діапазоні довжин хвиль, так як їх чутливість залежить від властивостей і чистоти поверхні, яка поглинає це випромінювання.

Специфіка оптичних і фотоелектричних вимірювань накладає певні вимоги до джерел світла.

По-перше, вони повинні мати однакову яскравість по всій площі поверхні випромінювання світлового потоку.

По-друге, потік променевої енергії повинен бути стабільним в часі, і мав би настільки малими флуктуаціями, щоб в рамках помилок експерименту не впливав на результати самого експерименту.

По-третє, інтенсивність потоку світла, який протікає через площу поверхні вхідної щілини монохроматора повинна бути величиною постійною.

Крім цього, необхідно знати інтенсивність повного спектра монохроматичного випромінювання джерела світла.

Метою роботи є визначення інтенсивності монохроматичного випромінювання для вимірювання спектрального розподілу квантового виходу фотоемісії з поверхні твердих тіл.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основним недоліком як оптичної, так і фотоелектронної спектроскопії є джерела світла, в яких потік променевої енергії, як завжди, проявляє нестабільність при проведенні експериментів. В роботі [1] наведено описи і конструкцію високовольтної водневої лампи, як джерела ультрафіолетового випромінювання в діапазоні енергії до 11 еВ, яка використовується в фотоелектронній і оптичній спектроскопіях. Показана висока якість і надійність цієї водневої лампи, як джерела світлового випромінювання, при використанні її в фотоелектронній спектроскопії.

Вимірювання загальної кількості радіації, що потрапила на досліджувану систему (фотоемітер), називається актинометрією. При вивченні фотоемісії необхідно знати повну кількість монохроматичної світлової енергії, що потрапила на фотоемітер. Одним з типів актинометрії є термостолбик, що представляє собою групу термопар, у яких певні кінці притиснуті до чорної поверхні (поверхня покрита платиновою чорню). Термостолбик – система термопар, з'єднаних послідовно і служить для посилення термоелектричного ефекту. При вимірюванні монохроматичного випромінювання термостолбик поміщають за вихідною щілиною монохроматора і вимірюється інтенсивність монохроматичного випромінювання, яке виходить з монохроматора.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для вивчення фотоемісії з поверхні твердого тіла

необхідно експериментально дослідити два види характеристик: 1) спектральний розподіл квантового виходу фотоemisії $Y(h\nu)$; 2) енергетичний розподіл фотоелектронів $N(E)$.

Оскільки квантовий вихід фотоemisії при даній енергії фотона

$$h\nu = hc / \lambda \quad (1)$$

де h – постійна Планка; c – швидкість світла; ν – частота світлової хвилі; λ – довжина хвилі, визначається відношенням повного числа фотоелектронів N_e до повного числа збуджуючих їх фотонів N_ϕ з цією енергією $h\nu$,

$$Y(h\nu) = N_e / N_\phi \quad (2)$$

для вивчення спектрального розподілу квантового виходу необхідно вимірювати повний фототок з емітера

$$I_s = N_e \cdot e \quad (3)$$

де e – заряд електрона; N_e – число емітованих електронів з досліджуваного зразка

Інтенсивність випромінювання, що падає на катод з монохроматора, тобто число падаючих фотонів N_ϕ , яке випливає з формули (2), необхідно знати для визначення спектральних характеристик квантового виходу з фотоemisітера. Інтенсивність монохроматичного випромінювання визначалася за допомогою термoelementa із заданою чутливістю.

Вимірювання інтенсивності монохроматичного світла термостолбіком можливо проводити у видимій області спектра, де досить інтенсивне випромінювання. Застосування термостолбіка в ультрафіолетовій області монохроматичного спектру було ускладнено через наявність малих інтенсивностей окремих спектральних ліній.

В даній час для вимірювання інтенсивності ультрафіолетового світла користуються високочутливими приймачами випромінювання, переводячи ультрафіолетове випромінювання в видиме за допомогою різних люмінесцируючих речовин, люмінесценція з яких підкоряється закону С.І. Вавилова, наприклад, саліцилово-кислий натрій $\text{NaC}_7\text{H}_5\text{O}_3$. Саліцилово-кислий натрій – це білий кристалічний порошок неприємного солодкуватого смаку, без запаху. Розчинний у воді, спирті, гліцерині.

Головна перевага цього методу полягає в тому, що він не вимагає джерела світла з відомим розподілом енергії по спектру, як еталону для градування в ультрафіолетовій області спектра. У таких речовин, як саліцилово-кислий натрій $\text{NaC}_7\text{H}_5\text{O}_3$, люмінесценція з якого при опроміненні його ультрафіолетовим світлом підкоряється закону С.І. Вавилова, світловий вихід люмінесценції $Y_{\text{фл}}$ пропорційний довжині хвилі збудливого ультрафіолетового випромінювання

$$Y_{\text{фл}} = \frac{I}{I_0} = a \cdot \lambda \quad (4)$$

де a – const; I – інтенсивність люмінесценції при поглинанні енергії подає ультрафіолетового потоку світла I_0 .

Так як енергія падаючого монохроматичного ультрафіолетового потоку світла I_0 дорівнює добутку енергії кванта світла $h\nu$ на число квантів N_ϕ , тобто число фотонів, то

$$I = a \cdot \lambda I_0 = N_\phi h\nu a \cdot \lambda = achN_\phi \quad (5)$$

де c – швидкість світла

Звідси видно, що вимірюючи інтенсивність люмінесценції, можна отримати число фотонів N_ϕ ультрафіолетового випромінювання, що збуджують цю люмінесценцію.

Інтенсивність люмінесценції важко або, як в нашому випадку, не можливо виміряти за допомогою термостолбіка, з огляду на те, що ця інтенсивність дуже мала. Однак спектри люмінесценції багатьох люмінофорів, в тому числі і саліцилово-кислого натрію, не залежать від енергії фотонів збуджуючого ультрафіолетового світла. Це дає можливість для вимірювання відносної інтенсивності люмінесценції використовувати відповідний фотопомножувач або фотоелемент. Вимогою до останніх буде висока чутливість в області спектра випромінювання люмінофору і лінійна залежність величини фотоструму фотопомножувача (фотоелемента) від числа фотонів, що падають на фотокатод. Таким чином, за допомогою люмінофора і фотопомножувача можна вимірювати відносну інтенсивність люмінесценції і, отже, відносне число квантів збуджуючого ультрафіолетового випромінювання.

Абсолютне значення інтенсивності монохроматичного ультрафіолетового випромінювання можна визначити з порівняння струму фотопомножувача, який використовувався для вимірювання відносної інтенсивності з використанням люмінофора, з ЕРС градуйованого термостолбіка для якої-небудь ділянки спектра монохроматора, зручного для вимірів інтенсивності випромінювання обома приладами.

У даній роботі в якості люмінофора використовувався саліцилово-кислий натрій, який досліджувався раніше в роботі [2]. У цій роботі показано, що квантовий вихід $\text{NaC}_7\text{H}_5\text{O}_3$ в широкому інтервалі довжин хвиль від 3400Å до 500Å постійний. Саліцилово-кислий натрій $\text{NaC}_7\text{H}_5\text{O}_3$ розчинявся в спирті і розчин наносився на вікно фотомножувача. Товщина шару люмінофора становила приблизно 30 мк [2], що є оптимальною товщиною.

Для вимірювання малих світлових потоків використовують фотопомножувач. (ФЕП). Як фотоелементи, так і фотопомножувачі є основними

приймачами випромінювання при роботі з монохроматорами. Випромінювання, що виділяється з вихідної щілини монохроматора, направляється на вхідне вікно фотопомножувача, покритого в нашому випадку шаром люмінофору.

Спектр люмінесценції саліцилово-кислого натрію має максимальну інтенсивність в області довжини хвилі 4500Å . Тому в якості приймача люмінесцентного випромінювання використовувався фотопомножувач ФЕП-19М, у якого фотокатод має найбільший квантовий вихід емісії в області довжин хвиль 4200Å . Таким чином, припускаючи, що ультрафіолетове світло повністю поглинається шаром люмінофора (причому перетворений світло поглинається незначно) можна вважати, що струм ФЕП-19М пропорційний числу падаючих квантів ультрафіолетового випромінювання

Для проведення абсолютних вимірювань в ВУФ області спектра (10 – 100 нм) був використаний аналогічний простий люмінесцентний детектор [3], абсолютна калібрування якого здійснювалася, на відміну від нашого випадку, УФ ексимерним лазером. Детектор був ФЕП, перед яким розташовується екран-пластина з шаром люмінофора, спостереження проводилися в прохідному світлі. В якості люмінофора використовували саліцилово-кислий натрій $\text{NaC}_7\text{H}_5\text{O}_3$.

Монохроматичне випромінювання з монохроматора, пройшовши через лінзу, потрапляло на вікно ФЕП-19М, з нанесеним на нього люмінофором товщиною $\square 30$ мк. Показання ФЕУ-19М давали відносне число квантів ультрафіолетових спектральних ліній. Для того, щоб отримати абсолютне число квантів світла, свідчення ФЕУ-19М при $\lambda = 2650\text{Å}$ порівнювався з ЕРС термостолбика при тій же довжині хвилі $\lambda = 2650\text{Å}$ (чутливість термостолбика в цій області спектра достатня для вимірювання інтенсивності спектральної лінії цієї довжини хвилі). За абсолютною інтенсивності при $\lambda = 2650\text{Å}$ визначали число квантів для цієї лінії і звідси – число квантів для інших ліній. Числа фотонів N_ϕ для різних ліній спектра водневої лампи [1], отримані таким чином, використовувалися нами при вивченні спектрального розподілу квантового виходу в роботах [4, 5, 6].

Висновки. У представленій роботі показана методика визначення інтенсивності монохроматичного випромінювання для вимірювання спектрального розподілу квантового виходу фотоemisії з поверхні твердих тіл в ультрафіолетовій області спектра, використовуючи два прилади: калібрований термостолбик і фотоелектронний помножувач, вікно якого покрито тонким шаром саліцилово-кислого натрію.

Література

1. Черніков М.Г., Чернікова О.М., Гордєєв В.В. Воднева лампа як джерело ультрафіолетового випромінювання в фотоспектроскопії. IV Международная научно-практическая конференция «PRIORITY DIRECTINS OF SCIENCE AND TECHNOLOGY DEVELOPMENT» 20 – 22 декабря 2020 года, Киев, Украина
2. Ананьева Л.И., Шишловский А.А. Спектр люминесценции саліцилово-кислого натрия ДАН, СССР, 17, 1937. С. 183–186.
3. Шевелько А.П. Абсолютные измерения в ВУФ области спектра с помощью люминесцентного детектора. Квантовая электроника, 23. №8, 1996. С 748-750.
4. Кулышев А.М., Черникова И.Д., Черников Н.Г. Влияние состояния поверхности полупроводников на работу фотодетекторов. Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля, 2016. №2 (226), С. 112 – 123.
5. Черников Н.Г., Черникова И.Д. Исследование адсорбции германия на поверхность арсенида галлия фотоэмиссионным методом Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля, 2017. № 6 (237), С. 133–138
6. Черніков М.Г., Чернікова І.Д., Алієв В.Є. Дослідження адсорбції барію на поверхню арсеніду галію фотоemisійним методом. Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля, 2019. № 1 (249), С. 114–124. ISSN 1998-7927

References

1. Chernikov M.G., Chernikova O.M., Gordeev V.V. Vodneva lamp yak dzherelo ultraviolet viprominuvannya in photospectroscopy. IV International Scientific and Practical Conference "PRIORITY DIRECTINS OF SCIENCE AND TECHNOLOGY DEVELOPMENT" December 20 - 22, 2020, Kiev, Ukraine
2. Ananyeva L.I., Shishlovsky A.A. Luminescence spectrum of salicylic acid sodium DAN, USSR, 17, 1937. pp. 183–186.
3. Shevelko A.P. Absolute measurements in the VUV region of the spectrum using a luminescent detector. Quantum electronics, 23. No. 8, 1996. P 748-750.
4. Kulyshv A.M., Chernikova I.D., Chernikov N.G. Influence of the state of the semiconductor surface on the operation of photodetectors. Bulletin of the Skhidnoukrainian National University IM. V. Dahl, 2016. No. 2 (226), S. 112 - 123.
5. Chernikov N.G., Chernikova I.D. Investigation of the adsorption of germanium on the surface of gallium arsenide by the photoemission method Bulletin of the Skhidnoukrainian National University IM. Dahl, 2017. No. 6 (237), pp. 133–138
6. Chernikov M.G., Chernikova I.D., Aliev V.E. Adsorption of adsorption pressure on the surface of the arsenide galley by a photo-efficient method. Bulletin of the Skhidnoukrainian National University IM. V. Dalya, 2019. No. 1 (249), P. 114–124. ISSN 1998-7927

Черникова И.Д., Черников Н.Г., Черникова Е.Н., Недобега В.А. Квантовый выход фотоemisсии и методы его измерения

В последнее время достигнут значительный прогресс в разработке интенсивных источников излучения и новых оптических элементов для вакуумной ультрафиолетовой области спектра (ВУФ). Этот

прогресс послужил основой для развития многих перспективных практических приложений: микроскопии, рентгеновской голографии, рентгенолитографии, микроэлектроники, и др. Для развития этих направлений, в частности для оптимизации параметров источников и выбора оптических элементов, необходимы качественные количественные (абсолютные) измерения характеристик излучения. Однако проведение таких измерений в ВУФ диапазоне спектра является достаточно сложной задачей. Дело в том, что в этом диапазоне спектра все вещества обладают большим и сильно меняющимся в зависимости от длины волны поглощением. Поэтому все детекторы излучения требуют независимой калибровки по эталонному источнику во всем диапазоне длин волн, так как их чувствительность зависит от свойств и чистоты поглощающей поверхности. В представленной работе показана методика фотометрии монохроматического излучения в ультрафиолетовой области спектра, используя два прибора: калиброванный термостолбик и фотоэлектронный умножитель, окно которого покрыто тонким слоем салицилово-кислого натрия.

Ключевые слова: фотоэлектронный умножитель, фотокатод, фотон, монохроматическое излучение, квант света, термостолбик.

Chernikova I.D., Chernikov M.G., Chernikova O.M., Nedobega V.O. Photjmission quantum output and its measurement

Recently, significant progress has been made in the development of intense radiation sources and new optical elements for the vacuum ultraviolet spectrum (VUV). This progress served as the basis for the development of many promising practical applications: X-ray lithography, X-ray holography, microscopy, etc. To develop these areas, in particular, to optimize the parameters of sources and the choice of optical elements, qualitative quantitative (absolute) measurements of radiation characteristics are required. However, carrying out such measurements in the VUV spectral range is a rather difficult task. The fact is that in this range of the spectrum, all substances have a large and strongly varying absorption depending on the wavelength. Therefore, all radiation detectors require independent calibration against a reference source in the entire wavelength range, since their sensitivity depends on the properties and purity of the absorbing surface. When studying photoemission, it is necessary to know the total amount of monochromatic light energy received by the photoemitter. One of the types of actinometer is a thermo-column, which is a group of thermocouples with certain ends pressed against a black surface. When measuring monochromatic radiation, the thermal column is placed behind the exit slit of the monochromator and the intensity of the output radiation is

measured. The luminescence intensity is difficult or, as in our case, cannot be measured with a thermal column, since this intensity is very low. However, the luminescence spectra of many phosphors, including salicylic acid sodium, do not depend on the photon energy of the exciting ultraviolet light. This enables a suitable photomultiplier or photocell to measure the relative intensity of the luminescence. The requirement for the latter will be a high sensitivity in the emission region of the phosphor and a linear dependence of the photomultiplier photocurrent on the number of photons incident on the photocathode. Thus, with the help of a phosphor and a photomultiplier, it is possible to measure the relative intensity of the luminescence and, consequently, the relative number of quanta of exciting ultraviolet radiation. The absolute intensity of monochromatic ultraviolet radiation can be determined by comparing the current of the photomultiplier, which was used to measure the relative intensity using a phosphor, with the emf of a graduated thermal column for any part of the spectrum of the monochromator, convenient for measuring the radiation intensity with both devices. The presented work shows a technique for photometry of monochromatic radiation in the ultraviolet region of the spectrum using two devices: a calibrated thermal column and a photomultiplier tube, the window of which is covered with a thin layer of salicylic acid sodium.

Key words: photomultiplier tube, photocathode, photon, monochromatic radiation, quantum of light, thermal column.

Черніков Микола Григорійович – к.фіз.-мат.н., доц., доцент, кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк), chernikov_n_g@ukr.net

Чернікова Ірина Дем'янівна – ст. викл. кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк), chernikova_i_d@ukr.net

Чернікова Олена Миколаївна – бакалавр, студент групи ПМЕ-20д, факультет інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) chernikovahm@gmail.com

Недобіга Владислав Олександрович – магістр, студент групи ГМ-20дм, магістр, студент групи ГМ-20дм, факультет Інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) nedobega98@gmail.com

Стаття подана 08.02.2021 р.