

УДК 535.3  
UDC 535.3

## МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ ДВОФОТОННОГО ПОГЛИНАННЯ

*Кулиш М.Р.*, доктор фізико-математичних наук, Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарева, НАН України, Київ, Україна, n\_kulich@yahoo.com, orcid.org/0000-0002-4365-8174

*Малиш М.І.*, кандидат фізико-математичних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, M\_Malysh@ukr.net, orcid.org/0000-0003-4532-0764

## METHOD OF MEASUREMENT OF TWO-PHOTON ABSORPTION

*Kulich N.R.*, doctor of physical-mathematical sciences, V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, n\_kulich@yahoo.com, orcid.org/0000-0002-4365-8174

*Malysh M.I.*, associate professor department of physics, National Transport University, Kyiv, Ukraine, M\_Malysh@ukr.net, orcid.org/0000-0003-4532-0764

## МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ДВУХФОТОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

*Кулиш Н.Р.*, доктор физико-математических наук, физики полупроводников имени В.Е. Лашкарева, НАН Украины, Киев, Украина, n\_kulich@yahoo.com, orcid.org/0000-0002-4365-8174

*Мальш Н.И.*, кандидат физико-математических наук, Национальный транспортный университет, Киев, Украина, M\_Malysh@ukr.net, orcid.org/0000-0003-4532-0764

### Постановка проблеми.

З появою потужних джерел когерентного випромінювання (лазерів) з'явилась можливість дослідження взаємодії цього випромінювання з речовиною. Зокрема, з'явилась можливість дослідження особливостей двофотонного поглинання. Під двофотонним поглинанням розуміють процес, під час якого при поглинанні двох фотонів молекулою, атомом у напівпровіднику чи діелектрику електрон переходить з основного у збуджений стан. При цьому різниця енергій між цими станами електрона дорівнює сумі енергій двох фотонів. Оскільки ймовірність поглинання одного фотона пропорційна інтенсивності збуджуючого світла, то ймовірність поглинання двох фотонів в одному елементарному акті пропорційна квадрату інтенсивності світла.

Особливість експериментальних методик вимірювання двофотонного поглинання пов'язана насамперед з тим, що для визначення величини двофотонного поглинання необхідні світлові потоки великої інтенсивності, які генерують лише імпульсні лазери.

Існує кілька методів вимірювання двофотонного поглинання [1]: 1) Прямий метод, в основі якого лежить вимірювання величини ослаблення світлового потоку при проходженні середовища певної товщини. 2) Люмінесцентний метод вимірювання, при використанні якого вимірюється залежність інтенсивності люмінесценції від інтенсивності накачки. Цим методом майже неможливо здійснити вимірювання абсолютного значення коефіцієнта двофотонного поглинання. 3) Вимірюється залежність фотопровідності від інтенсивності збудження. Цьому методу притаманні недоліки аналогічні недолікам люмінесцентного методу. Зауважимо, що лише прямий метод вимірювання ослаблення лазерного потоку дозволяє визначити коефіцієнт двофотонного поглинання. Для вивчення особливостей двофотонного поглинання в напівпровідниках потрібно мати в своєму розпорядженні методику прямого вимірювання коефіцієнта двофотонного поглинання, що і є метою даної роботи.

### Методика визначення коефіцієнта двофотонного поглинання.

Нехай на ізотропну плоско паралельну пластинку напівпровідника товщиною  $d$  вздовж нормалі падає паралельний потік випромінювання з однорідним розподілом інтенсивності по поперечному перерізі потоку лазерного випромінювання. Нехай енергія квантів світла має значення, яке лежить в області  $E_g/2 < h\nu < E_g$ , де  $E_g$  — ширина забороненої зони твердого тіла. У цьому випадку ослаблення потоку випромінювання, що поширюється в середовищі, описується співвідношенням

$$\frac{dI}{dx} = -KI - \beta I^2, \quad (1)$$

де  $I$ ,  $K$ ,  $\beta$  – інтенсивність світла, коефіцієнт лінійного та двофотонного поглинання відповідно. Розділивши змінні і виконавши інтегрування по  $x$  в межах від нуля до  $d$  і по  $I$  від  $(1-R)I_0$  до  $I/(1-R)$ , знаходимо

$$\frac{1}{T} = \frac{I_0}{I} = \frac{\exp(Kd)}{(1-R)^2} + \frac{\beta[\exp(Kd) - 1]}{K(1-R)} I_0 = A + BI_0, \quad (2)$$

де  $I_0$  – інтенсивність світла, яке падає на вхідну грань зразка. Співвідношення (2) застосовується для знаходження  $\beta$  у випадку ізотропного середовища при його освітленні лінійно поляризованим випромінюванням.

Для одновісних кристалів, до яких відноситься  $\text{CdP}_2$ , необхідно плоско паралельні пластини вирізати так, щоб у них оптична вісь  $C$  була паралельною до грані, на яку вздовж нормалі посилається потік випромінювання. Для таких кристалів можна визначити значення коефіцієнта двофотонного поглинання для напрямків  $E \perp C$  і  $E \parallel C$  і встановити характер впливу поляризації світла на величину  $\beta$ .

Блок-схема установки, що дозволяє виконати такі виміри, показана на рис. 1. Джерелом світла служить термостабілізований (температура рубінового стержня на заданому рівні  $T = 300$  К підтримувалась з похибкою  $\pm 0,07$  К) рубіновий лазер (1), що генерує імпульси із шириною лінії 1 пм, з довжиною імпульсу 20 нс та із гауссовим розподілом інтенсивності по поперечному перерізі потоку лазерного світла. Для цього світло пропускається крізь діафрагму (2), що пропускає випромінювання на рівні 0,9 від значення максимуму гауссового розподілу.

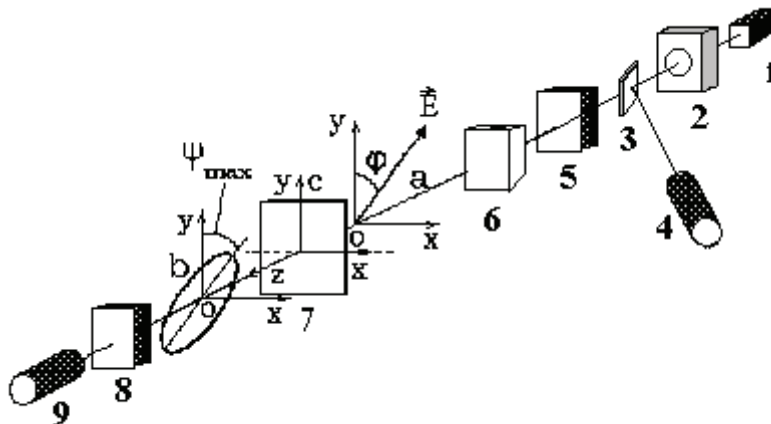


Рисунок 1 – Блок-схема вимірювання коефіцієнта двофотонного поглинання світла:

- 1 - рубіновий лазер, 2 - діафрагма, 3 - скляна пластинка, 4 і 9 - фотопомножувачі ЕЛУ-ФТ,
- 5 і 8 - набори каліброваних нейтрально-сірих фільтрів, 6 - поляризатор (призма Глана),
- 7 - монокристал  $\text{CdP}_2$ , оптична вісь якого паралельна осі  $y$ . На вставці **a** показана орієнтація вектора поляризації електромагнітної хвилі  $E$  щодо оптичної осі  $C$  на вхідній грані кристала.
- $\varphi$  - азимут поляризації щодо оптичної осі  $C$ . На вставці **b** показана форма еліпса поляризації на вихідній грані кристала.  $\psi_{\max}$  - кут повороту великої півосі еліпса поляризації.

Figure 1 – The block diagram of measuring the coefficient of two-photon absorption of light:

- 1 - ruby laser, 2 - diaphragm, 3 - glass plate, 4 and 9 - photomultipliers ELU-FT,
- 5 and 8 - sets of calibrated neutral-gray filters, 6 - polarizer (Prism Glan), 7 is a single crystal  $\text{CdP}_2$ , whose optical axis is parallel to the  $y$ -axis. The insertion **a** shows the orientation of the polarization vector of the electromagnetic wave  $E$  relative to the optical axis  $C$  on the input face of the crystal.  $\varphi$  is the polarization azimuth relative to the optical axis  $C$ . The inset **b** shows the shape of the polarization ellipse on the crystal output face.  $\psi_{\max}$  is the angle of rotation of the large half-ellipse of polarization.

Частина випромінювання, що пройшло крізь діафрагму, відгалужувалась скляною пластинкою (3) і посилялась на вхід детектора (фотопомножувач ЕЛУ-ФТ) (4). За величиною сигналу

із цього фотопомножувача контролювалась величина  $I_0$ . Далі випромінювання направлялося на набір нейтрально-сірих фільтрів (5) та поляризатор (6). Набір фільтрів служить для зміни величини інтенсивності світла, що падає на вхідну грань зразка (7). Поляризатор забезпечує лінійну поляризацію світла.

Перевірка особливостей методики здійснювалась шляхом вимірювання коефіцієнта двофотонного поглинання в монокристалах  $\text{CdP}_2$ . Досліджувались плоско паралельні одновісні монокристали  $\text{CdP}_2$  з розмірами  $10 \times 15 \text{ мм}^2$  та товщиною (0,1-3) мм. Оптична вісь у них була паралельна вхідній грані. Фіксована величина  $\phi$  (азимут поляризації) між оптичним віссю  $\mathbf{C}$  і вектором  $\mathbf{E}$  (вставка **a**) встановлюється поворотом кристала навколо напрямку поширення потоку випромінювання. Коли  $\phi \neq m\pi/2$ , де  $m = 0, 1, 2, \dots$ , із кристала виходить еліптично-поляризоване випромінювання (ставка **b**). Воно ослаблюється набором нейтрально-сірих фільтрів (8) і реєструвалось фотопомножувачем ЕЛУ-ФТ (9). Електричні сигнали із фотопомножувачів реєструвались осцилографами С8-12.

У загальному випадку інтенсивність  $I_0 = E/S\tau$ , де  $E$  і  $\tau$  – енергія і тривалість лазерного імпульсу відповідно,  $S$  – поперечний переріз потоку лазерного випромінювання. Енергія імпульсу вимірюється калориметром ІКТ-1М, тривалість імпульсу контролюється осцилографічно. Поперечний переріз до діафрагми і після неї визначався методом умовних границь. У ході вимірів  $S$  і  $\tau$  витримувались незмінними, що дозволило встановити відповідність між  $I_0$  і  $E$ , а значить, знайти  $I_0$  і  $I$  у  $\text{Вт/см}^2$ . Похибка визначення  $I_0$  і  $I$  не перевищувала 10%.

Зміна величини  $I_0$  здійснювалась шляхом перенесення нейтрально-сірих фільтрів із набору, встановленого перед зразком, в набір, розташований за зразком. Величина пропускання  $T$  (при фіксованій величині  $I_0$ ) усереднювалась по 10-15 імпульсах з одним і тим самим розподілом інтенсивності імпульсу у часі.

При фіксованій величині азимута поляризації  $\phi$  вимірювалась сукупність значень  $I_0$  і  $I$ . Скориставшись ними, будувалась залежність  $1/T = f(I_0)$  (рис. 2, точки). Вона апроксимується прямою лінією за методом найменших квадратів, що свідчить про виконання рівняння (2). Точка перетину цієї лінії з віссю ординат дає значення констант  $A$ , а за величиною її нахилу визначається константа  $B$ . З рівняння (2) випливає, що

$$K = \frac{1}{d} \ln[A(1-R)^2]; \quad (3)$$

$$\beta = \frac{BK(1-R)}{A(1-R)^2 - 1}, \quad (4)$$

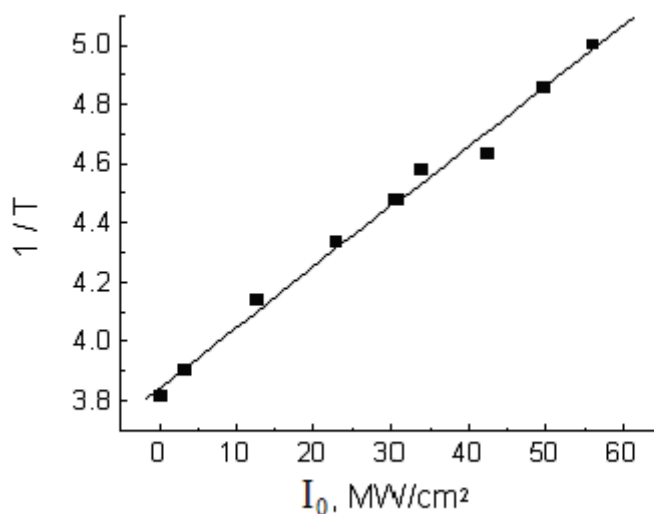


Рисунок 2 – Залежність оберненого пропускання  $1/T$  від інтенсивності  $I_0$  світлового потоку.

Азимут поляризації  $\phi = 30^\circ$ .

Figure 2 – The dependence of the inverse transmission  $1/T$  on the intensity of light flux  $I_0$ .

Azimuth of polarization  $\phi = 30^\circ$ .

Визначивши константи  $A$  ( $A_1$  та  $A_2$ ) для двох значень товщини кристала  $d_1$  і  $d_2$ ), знаходимо, що

$$K = \frac{\ln(A_2 / A_1)}{d_2 - d_1}. \quad (5)$$

Для кристалів  $\text{CdP}_2$   $K=1,8 \text{ см}^{-1}$ . Підставивши знайдене значення  $K$  в (3), знайдемо  $R$  ( $R = 0,26$ ). Значення  $K$  і  $R$  визначені з похибкою  $\pm 10\%$ . Виявилось, що в межах похибки методу оцінки  $R$  його значення збігається зі значенням  $R$  [2], знайденим із дисперсійної кривої.

Підставивши в  $B$  (див. формулу (2) відомі величини  $A$ ,  $K$  і  $R$ ), знаходимо величину коефіцієнта двофотонного поглинання  $\beta$  з похибкою  $\pm 20\%$ .

### Висновки:

Відомі три методики вимірювання коефіцієнта двофотонного поглинання: люмінесцентний метод, метод фотопровідності, прямий метод по величині ослаблення світлового потоку, енергія квантів  $h\nu$  якого лежить в діапазоні  $E_g > h\nu > E_g/2$ . ( $E_g$  — ширина забороненої зони напівпровідника). Показано, що лише прямий метод дозволяє коректно вимірювати коефіцієнт двофотонного поглинання. Описана методика вимірювання коефіцієнтів двофотонного поглинання прямим методом і перевірена на прикладі монокристалічного  $\text{CdP}_2$ . Наявність двофотонного поглинання потрібно враховувати при проектуванні і виготовленні елементів силової оптики.

### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бредихин В.И. Двухфотонное поглощение и спектроскопия / В.И Бредихин, М.Д. Галанин, В.И Генкин // Успехи физических наук. – 1973. – Том 110. – Вып. 1. – С 3-43.
2. Sobolev V.V. Reflectivity Spectra and Band Structure of the Zinc and Cadmium Diphosphides/ V.V. Sobolev, A.I. Kozlov, Yu.I. Polygalov, V.E. Tupitsyn, A.S. Poplavnoi // Physica status solidi (b). – 1989. – V.154. – P. 377–388. doi:10.1002/pssb.2221540139

### REFERENCES

1. Bredihin, V.I., Galanin, M.D., Genkin, V. I. (1973) Dvufotonnoe pogloschenie i spektroskopiiia [Two-photon absorption and spectroscopy]. Uspehi fizicheskikh nauk, 110.1, 3-43 [in Russian].
2. Sobolev, V.V., Kozlov, A.I., Polygalov, Yu. I., Tupitsyn, V.E.(1989) Reflectivity Spectra and Band Structure of the Zinc and Cadmium Diphosphides. Physica status solidi (b), 154, 377–388. doi:10.1002/pssb.2221540139 [in Deutschland]

### РЕФЕРАТ

Куліш М.Р. Методика вимірювання двофотонного поглинання / М.Р. Куліш, М.І. Малиш // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К. : НТУ, 2018. – Вип. 1 (40).

В статті на прикладі монокристалічного  $\text{CdP}_2$  розглянуті результати використання прямого методу вимірювання величини коефіцієнта двофотонного поглинання в напівпровідниках.

Об'єкт досліджень – монокристали  $\text{CdP}_2$ .

Мета досліджень: Перевірка можливості прямого методу вимірювання коефіцієнта двофотонного поглинання в твердих тілах.

Метод дослідження - експериментальний.

Відомі три методики вимірювання коефіцієнта двофотонного поглинання: люмінесцентний метод, метод фотопровідності, прямий метод по величині ослаблення світлового потоку, енергія квантів  $h\nu$  якого лежить в діапазоні  $E_g/2 < h\nu < E_g$  ( $E_g$  — ширина забороненої зони напівпровідника). Показано, що лише прямий метод дозволяє коректно вимірювати коефіцієнт двофотонного поглинання. Описана методика вимірювання коефіцієнтів двофотонного поглинання

прямим методом і перевірена на прикладі монокристалічного CdP<sub>2</sub>. Наявність двофотонного поглинання потрібно враховувати при проектуванні та виготовленні елементів силової оптики.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ДВОФОТОННЕ ПОГЛИНАННЯ, ЛАЗЕР, МЕТОДИКА, ВИМІРЮВАННЯ.

#### ABSTRACT

Kulish M.R., Malysh M.I. Metod of measurement of two-photon absorption. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific and Technical Collection. – Kyiv: National Transport University, 2018. – Issue 1 (40).

In the article on the example of monocrystalline CdP<sub>2</sub>, we considered the results of using the direct method of measuring the value of the coefficient of two-photon absorption in semiconductors.

Object of research - monocrystals CdP<sub>2</sub>.

Purpose of research: Testing of possibilities of direct method of measuring the coefficient of two-photon absorption in solids.

The research method is experimental.

Three methods of measuring the two-photon absorption coefficient are known: the luminescent method, the photoconductivity method, the direct method conformable value of the weakening of the light flux whose quantum energy  $h\nu$  lies in the range  $E_g/2 < h\nu < E_g$ . It is shown, that only the direct method allows correctly to measure the coefficient of two-photon absorption. The method of measuring two-photon absorption coefficients by direct method is described and tested on an example of monocrystalline CdP<sub>2</sub>. The presence of two-photon absorption must be taken into account when designing and manufacturing elements of power optics.

**KEYWORDS:** TWO-PHOTON ABSORPTION, LASER, METHOD, MEASUREMENT.

#### РЕФЕРАТ

Кулиш Н.Р. Методика измерения двухфотонного поглощения / Н.Р. Кулиш, Н.И. Малыш // Вестник Национального транспортного университета. Серия «Технические науки». Научно-технический сборник. – К.: НТУ, 2018. – Вып. 1 (40).

В статье на примере монокристаллического CdP<sub>2</sub> рассмотрены результаты использования прямого метода измерения величины коэффициента двухфотонного поглощения в полупроводниках.

Объект исследований – монокристаллы CdP<sub>2</sub>.

Цель исследований: Проверка возможностей прямого метода измерения коэффициента двухфотонного поглощения в твердых телах.

Метод исследования - экспериментальный.

Известны три методики измерения коэффициента двухфотонного поглощения: люминесцентный метод, метод фотопроводимости, прямой метод по величине ослабления светового потока, энергия квантов  $h\nu$  которого лежит в диапазоне  $E_g/2 < h\nu < E_g$  ( $E_g$  — ширина запрещенной зоны полупроводника). Показано, что только прямой метод позволяет корректно измерять коэффициент двофотонного поглощения. Описанная методика измерения коэффициентов двофотонного поглощения прямым методом и проверена на примере монокристаллического CdP<sub>2</sub>. Наличие двофотонного поглощения нужно учитывать при проектировании и изготовлении элементов силовой оптики.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ДВУХФОТОННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ, ЛАЗЕР, МЕТОДИКА, ИЗМЕРЕНИЕ.

#### АВТОРИ:

Кулиш Микола Радіонович, доктор фізико-математичних наук, Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарева НАН України, провідний науковий співробітник, e-mail: n\_kulish@yahoo.com, tel. +380445256024, +380730422661, Україна, 03028, м. Київ, Велика Китаївська 10, к. 10, orcid.org/0000-0002-4365-8174

Малиш Микола Іванович, кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри фізики, e-mail: M\_Malysh@ukr.net, тел. +380442846709, +380508257165, Україна, 01103, м. Київ, вул. М. Бойчука, 42, к. 410, orcid.org/0000-0003-4532-0764

#### **AUTHORS**

Kulich Mykola Radionovich., doctor of physical-mathematical sciences, V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine, Leading Researcher, e-mail: n\_kulich@yahoo.com, tel. +380445256024, +380730422661, Ukraine, 03028, Kyiv, Bolshay Kitaevskay str. 10, of. 10, orcid.org/0000-0002-4365-8174

Malysh M. I., associate professor, National Transport University, associate professor department of physics, e-mail: M\_Malysh@ukr.net, tel. +380442846709, +380508257165, Ukraine, 01103, Kyiv, M. Boychuk str., 42, of. 410, orcid.org/0000-0003-4532-0764

#### **АВТОРЫ**

Кулиш Николай Радионович, доктор физико-математических наук, Институт физики полупроводников имени В.Е. Лашкарева НАН Укрины, ведущий научный сотрудник, e-mail: n\_kulich@yahoo.com, tel. +380445256024, +380730422661 Украина, 03028, г. Киев, Большая Китаевская 10, к. 10, orcid.org/0000-0002-4365-8174

Мальш Николай Иванович, кандидат физико-математических наук, доцент, Национальный транспортный университет, доцент кафедры физики, e-mail: M\_Malysh@ukr.net, тел. +380442846709, +380508257165, Украина, 01103, г. Киев, ул. М. Бойчука, 42, к. 410, orcid.org/0000-0003-4532-0764

#### **РЕЦЕНЗЕНТИ:**

Данчук В.Д., доктор фізико-математичних наук, професор, декан факультету Транспортних та інформаційних технологій, Київ, Україна.

Боровий М.О., доктор фізико-математичних наук, професор, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, завідувач кафедри загальної фізики

#### **REVIEWER:**

Danchuk V.D., doctor of sciences, professor, dean of the Faculty of Transport and Information Technologies, Kyiv, Ukraine.

Borovoy M. O., doctor of sciences, associate professor, Kyiv Taras Shevchenko National University, head department of general physics