

УДК 548.76+621.315

Д.М.СТЕПАНЧИКОВ, Ю.О. ІВАНЮШИН

Херсонський національний технічний університет

## НЕСТАЦІОНАРНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ЖИТТЯ НЕРІВНОВАЖНИХ НОСІЇВ ЗАРЯДУ У ЛАБОРАТОРНОМУ КУРСІ ФІЗИКИ

*Розглянуто теоретичні основи нестационарних методів визначення часу життя нерівноважних носіїв заряду в напівпровідниках. Експериментально реалізовані метод затухання фотопровідності і метод частотних характеристик фотопровідності. Запропоновано застосування цих методів на лабораторному практикумі з фізики. Необхідне лабораторне обладнання розроблено і протестоване. Використовуються симетричний мультівібратор або генератор імпульсів та світлодіоди у якості джерел світла. Прямокутні симетричні імпульси світла генерують нерівноважні носії заряду у напівпровідниках. Для візуалізації результатів вимірювань використовується осцилограф. Проводиться дослідження та порівняння напівпровідникових матеріалів на основі кремнію і германію. Представлена методика проведення вимірювань. Використано графічне, табличне та аналітичне представлення результатів експерименту. Для обробки даних та розрахунку похибок запропоновано метод найменших квадратів. Проведено аналіз отриманих результатів. Метод затухання фотопровідності є більш простим у реалізації і таким, що потребує менше часу для проведення експерименту і числової обробки результатів, але менш точним. Головним недоліком цього методу є те, що на результати вимірювань впливають рівні прилипання, концентрація та інші невідомі характеристики носіїв заряду. Крім того, для коректної реалізації методу необхідно забезпечити досягнення стаціонарного значення фотопровідності напівпровідника. Метод частотної залежності фотопровідності є більш точним у порівнянні з методом затухання фотопровідності, але при цьому більш складним у реалізації з більшими витратами часу на проведення і обробку результатів експерименту. Крім того, вказаний метод може використовуватись лише за умови достатньо високої фоточувливості напівпровідникового кристалу. Обидва методи дають у межах похибки експерименту близькі результати, демонструючи більше значення часу життя нерівноважних носіїв для напівпровідникового матеріалу на основі германію.*

*Ключові слова: час життя нерівноважних носіїв, метод затухання фотопровідності, частотні характеристики фотопровідності, метод найменших квадратів, лабораторний практикум.*

Д.М. СТЕПАНЧИКОВ, Ю.А. ІВАНЮШИН

Херсонский национальный технический университет

## НЕСТАЦИОНАРНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ЛАБОРАТОРНОМ КУРСЕ ФИЗИКИ

*Рассмотрены теоретические основы нестационарных методов определения времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниках. Экспериментально реализованы метод затухания фотопроводимости и метод частотных характеристик фотопроводимости. Предложено использование этих методов на лабораторном практикуме по физике. Необходимое лабораторное оборудование разработано и протестировано. Используются симметричный мультивибратор или генератор импульсов и светодиоды в качестве источников света. Прямоугольные симметричные импульсы света генерируют неравновесные носители заряда в полупроводниках. Для визуализации результатов измерений используется осциллограф. Проводится исследование и сравнение полупроводниковых материалов на основе кремния и германия. Представлена методика проведения измерений. Использовано графическое, табличное и аналитическое представления результатов эксперимента. Для обработки данных и расчета погрешностей предложено применить метод наименьших квадратов. Проведен анализ полученных результатов. Метод затухания фотопроводимости является более простым в реализации и требующим меньше времени для проведения эксперимента и числовой обработки, но менее точным. Главным недостатком этого метода является то, что на результаты измерений влияют уровни прилипания, концентрация и другие неизвестные характеристики носителей заряда. Кроме того, для корректной реализации метода необходимо обеспечить достижение стационарного состояния фотопроводимости полупроводника. Метод частотной зависимости фотопроводимости является более точным в сравнении с методом затухания фотопроводимости, но при этом более сложным в реализации с большими затратами времени на проведение и обработку результатов эксперимента. Кроме этого, указанный метод может использоваться только при условии достаточно высокой фоточувствительности полупроводникового*

матеріала. Оба метода в пределах погрешности эксперимента дают близкие результаты, демонстрируя большее значение времени жизни неравновесных носителей заряда для германия.

*Ключевые слова:* время жизни неравновесных носителей, метод затухания фотопроводимости, частотные характеристики фотопроводимости, метод наименьших квадратов, лабораторный практикум.

D.M. STEPANCHIKOV, Yu.O. IVANYUSHIN  
Kherson National Technical University

## NON-STATIONARY METHODS OF DETERMINING THE EXCESS CARRIERS LIFETIME ON A LABORATORY COURSE OF PHYSICS

*Theoretical basis of a non-stationary methods of determining the excess carriers lifetime in semiconductors are viewed. The photoconductivity decay method and photoconductivity frequency response method are implemented experimentally. Application of these methods on a laboratory practical work is offered. The necessary labware is constructed and tested. Symmetric multivibrator and pulse generator with light-emitting diodes as a light source are used. Rectangular symmetric light pulses generate excess charge carriers in semiconductors. Visualization of measurements is realized by means of the oscilloscope. Silicon and germanium semiconductor materials are investigated and compared. The methodology for measuring procedures is presented. Graphical, tabular and analytical approaches to submission of experiment results are applied. The least square method for the data processing and errors calculations is offered. The analysis of the gained results is presented. The photoconductivity decay method is simpler and demands less time to measuring and data processing but is less accurate. Trapping levels, concentration and other non-known characteristics of charge carriers are much influenced on the experimental results. The stationary photoconduction state of semiconductor is necessary too. The photoconductivity frequency response method is more difficult to implement and demands more time to measuring and data processing, but is more accurate. Besides, the photoconductivity frequency response method can be applied only under condition of high photosensitivity of the semiconductor. Both methods yield the close results, showing greater excess carriers lifetime value for germanium.*

*Keywords:* excess carriers lifetime, photoconductivity decay method, frequency response of photoconductivity, least square method, laboratory works.

### Постановка проблеми

Курс фізики в технічному вищому навчальному закладі є одним із найважливіших складників фундаментальної наукової підготовки інженерних кадрів. Це зумовлено тим, що розвиток новітньої техніки насамперед визначають досягнення саме фізичної науки. Невід'ємним складником курсу фізики є лабораторний практикум. У багатьох університетах світу його вивчають навіть як окрему навчальну дисципліну. Адже, саме через лабораторний практикум здійснюється дотримання одного з провідних принципів дидактики – принципу зв'язку теорії з практикою. Сучасна прикладна фізика, як правило, базується на електроніці, а електроніка, у свою чергу, побудована в основному на напівпровідниках. Практичні задачі при цьому зводяться до розробки електронних приладів і пристроїв, що виконують різні функції в системах перетворення і передачі інформації, у системах керування, в обчислювальній техніці, а також в енергетичних пристроях. Тому вивчення фотоелектричних явищ займає важливе місце у дослідженні властивостей напівпровідників.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Час життя носіїв заряду в напівпровідниках є важливою складовою, що визначає якість і параметри матеріалу, які в свою чергу впливають на характеристики напівпровідникових пристроїв. Існує значна кількість методів визначення часу життя нерівноважних носіїв, всі їх можна розділити на дві великі групи: стаціонарні і нестаціонарні [1-8]. До стаціонарних відносять метод рухомого світлового променя [2-4], метод стаціонарної фотопровідності [3], вимірювання за допомогою фотоелектромагнітного ефекту [2]. У складі нестаціонарних виділяють метод затухання фотопровідності [1-3,7,8], метод модуляції провідності в точковому контакті [2,4], фазовий метод [1,5], метод вимірювання при використанні перехідних характеристик електронно-діркових переходів [3], метод частотних характеристик фотопровідності [1,6].

З точки зору реалізації принципу наочності в учбовому процесі корисним є візуальний розгляд і аналіз кривих релаксації фотопровідності при збудженні прямокутними імпульсами світла. При цьому експериментально знімається або часова залежність фотопровідності при певній сталій частоті слідування імпульсів, або частотна залежність амплітуди фотопровідності при змінній частоті слідування імпульсів. Такий підхід також дозволяє провести співставлення і порівняння експериментальних методів між собою. При цьому слід пам'ятати, що дані методи безумовно придатні лише для дослідження лінійної фотопровідності [1].

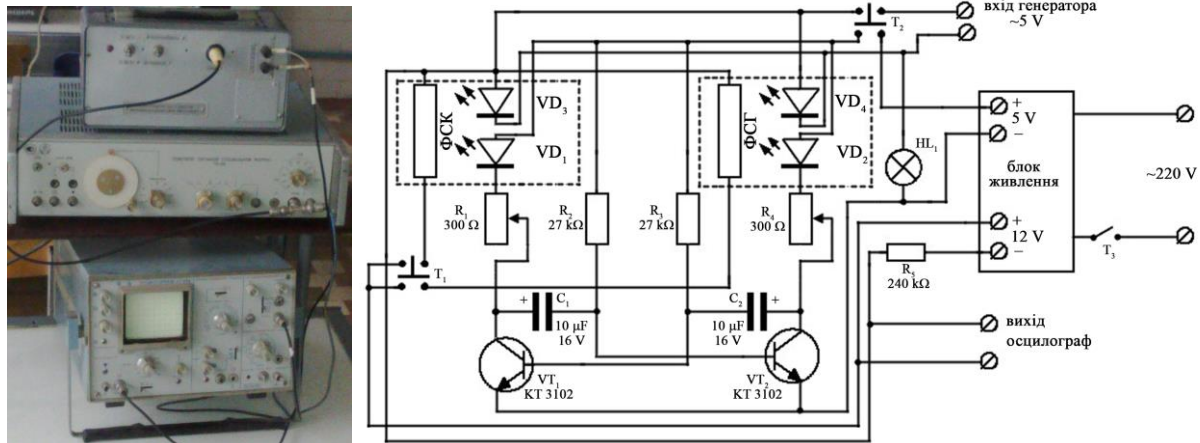
### Формулювання мети дослідження

Метою дослідження було створення необхідного обладнання для реалізації на учбовому лабораторному практикумі з фізики двох експериментальних методів визначення часу життя нерівноважних носіїв заряду: методу затухання фотопровідності і методу частотних характеристик

фотопровідності. А також розробка методики проведення експерименту та обробки його результатів і проведення тестування для двох напівпровідникових матеріалів: кремнію (Si) і германію (Ge).

**Викладення основного матеріалу дослідження**

Лабораторна установка, загальний вигляд та принципову схему якої наведено на рис.1, складається з окремого модуля у складі мультивібратора, фоторезисторів і блоку живлення, генератора прямокутних імпульсів і осцилографу для спостереження вихідного сигналу. Вона дозволяє досліджувати два типи напівпровідникових фоторезисторів: ФСК, виготовленого на основі кремнію та ФСГ, виготовленого на основі германію.



**Рис. 1. Зовнішній вигляд та принципова електрична схема лабораторної установки**

Для реалізації методу затухання фотопровідності створено симетричний мультивібратор на двох транзисторах КТ3102. Принцип роботи мультивібратора полягає у тому, що транзистори по черзі відкриваються. У відкритому стані перехід емітер-колектор пропускає струм. Оскільки у колекторні кола транзисторів увімкнені білі світлодіоди VD<sub>1</sub>, VD<sub>2</sub>, то при проходженні через них струму вони світяться і опромінюють відповідні фоторезистори. Вибір досліджуваного фоторезистора здійснюється перемикачем Т<sub>1</sub>. Головними елементами, за допомогою яких можна змінювати частоту перемикання світлодіодів є резистори R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub> і конденсатори C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>. Блок живлення дає постійну напругу 12 В на фоторезистори і 5 В на мультивібратор.

Для реалізації методу частотних характеристик фотопровідності передбачена можливість підключення генератора прямокутних імпульсів, які подаються на білі світлодіоди VD<sub>3</sub>, VD<sub>4</sub>, з можливістю плавної зміни частоти слідування імпульсів. Підключення здійснюється перемикачем Т<sub>2</sub>, при цьому мультивібратор автоматично відключається.

Збудження фотопровідності відбувається за допомогою симетричних прямокутних імпульсів з періодом  $T = 2t_0$ , де половину періоду триває освітлення, а іншу – затемнення фоторезистору (рис.2(а)). При цьому амплітуда і форма вихідного сигналу буде суттєво залежати від співвідношення періоду  $T$  і часу життя нерівноважних носіїв  $\tau$  (рис.2(б-д)).

На початку імпульсного освітлення при  $t \in [0; t_0]$  буде відбуватися зростання фотопровідності

$$\Delta\sigma = A_0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \tag{1}$$

тобто фотопровідність буде прямувати до свого стаціонарного значення  $\Delta\sigma_{ст} = A_0$ . Однак, при  $t = t_0$  освітлення припиняється і фотопровідність починає спадати за законом

$$\Delta\sigma = A_1 e^{-\frac{t}{\tau}}. \tag{2}$$

Оскільки  $A_1 < A_0$ , то фотопровідність за час відсутності освітлення спадає на величину, меншу ніж та на яку вона зростає у попередній період освітлення. В результаті точка 3 буде вище точки 1 (рис.2(б)).

Наступний період освітлення спричинить зростання фотопровідності  $\Delta\sigma$  від її значення у точці 3 за законом

Таблиця 1

Результати експерименту та розрахунків при застосування методу частотних характеристик фотопровідності

| $x=f$ , Гц                    | ФСК   |       | ФСГ   |       |
|-------------------------------|---|-------|---|-------|
|                               | $\Delta\sigma_{зм}/A_0$                               | $y$   | $\Delta\sigma_{зм}/A_0$                               | $y$   |
| 5                             | 0,972   | 0,118 | 0,853   | 0,198 |
| 10                            | 0,779   | 0,240 | 0,603   | 0,357 |
| 15                            | 0,572   | 0,384 | 0,573   | 0,382 |
| 20                            | 0,465   | 0,500 | 0,456   | 0,505 |
| 25                            | 0,358   | 0,670 | 0,412   | 0,570 |
| 30                            | 0,315   | 0,765 | 0,287   | 0,850 |
| 35                            | 0,272   | 0,895 | 0,220   | 1,110 |
| 40                            | 0,257   | 0,950 | 0,176   | 1,400 |
| 45                            | 0,243   | 1,010 | 0,162   | 1,520 |
| 50                            | 0,214   | 1,140 | 0,147   | 1,700 |
| 60                            | 0,186   | 1,320 | 0,132   | 1,850 |
| 70                            | 0,157   | 1,580 | 0,118   | 2,090 |
| 80                            | 0,143   | 1,760 | 0,095   | 2,620 |
| 90                            | 0,129   | 1,910 | 0,088   | 2,880 |
| 100                           | 0,114   | 2,160 | 0,080   | 3,010 |
| час життя $\tau$ , с          | 0,021   |       | 0,032   |       |
| коефіцієнт кореляції $\rho$   | 0,972   |       | 0,980   |       |
| коефіцієнти лінійної регресії | $a = 0,021$ с; $b = 0,082$                            |       | $a = 0,032$ с; $b = -0,016$                           |       |
| середньоквадратичні похибки   | $\delta_a = 5,430 \cdot 10^{-4}$ ; $\delta_b = 0,029$ |       | $\delta_a = 6,970 \cdot 10^{-4}$ ; $\delta_b = 0,037$ |       |

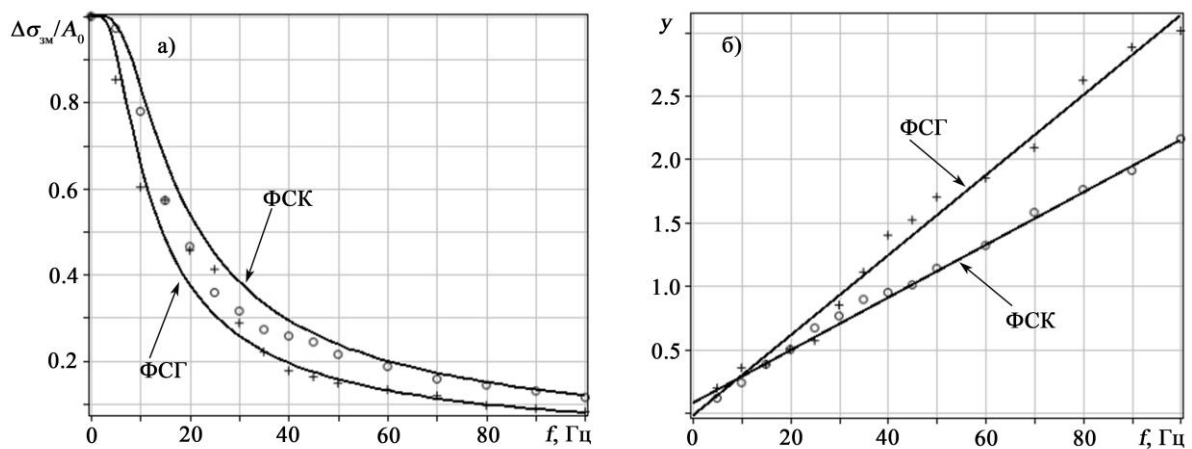


Рис. 3. Частотна залежність фотопровідності (а) і лінійна регресія частотної залежності фотопровідності (б) для двох досліджуваних напівпровідникових матеріалів. Суцільні лінії – теоретичні залежності, кола та хрести – експериментальні результати

При освітленні напівпровідника стаціонарне значення нерівноважної провідності  $\Delta\sigma_{зм}=A_0$  досягається лише через певний час після початку освітлення. З рис.2(д) видно, що це відбувається при  $t_0 > 4\tau$ . Аналогічно при вимкненні освітлення нерівноважна провідність зникає не миттєво. Криві зростання або зменшення нерівноважної провідності називають кривими релаксації фотопровідності. Експериментальне визначення часу життя нерівноважних носіїв  $\tau$  можливе при візуальному розгляді і аналізі таких кривих при збудженні фотопровідності прямокутними імпульсами світла.

Розглянемо затухання фотопровідності при умові досягнення нею стаціонарного значення (рис.2(д)). При цьому фотопровідність спадає за законом [1,6]:

$$\Delta\sigma = A_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{11}$$

Залежність (11) дозволяє розрахувати час життя нерівноважних носіїв заряду  $\tau$  через експериментально визначені величини  $\Delta\sigma$ ,  $A_0$ ,  $t$ . Для цього отримують залежність (11) затухання фотопровідності на екрані осцилографа і знімають відповідні параметри. Розрахунок часу життя нерівноважних носіїв можна зробити, наприклад, графічним методом, як описано у [1,6]. Ми пропонуємо, як і у попередньому випадку, використання методу найменших квадратів для визначення  $\tau$ , оскільки це дозволить найбільш точно оцінити кореляцію експерименту і теорії і визначити похибки вимірювань [9,10]. Для цього приведемо функцію (11) до лінійного вигляду, увівши такі позначення:

$$y = \frac{1}{\ln\left(\frac{A_0}{\Delta\sigma}\right)}; \quad x = \frac{1}{t}. \tag{12}$$

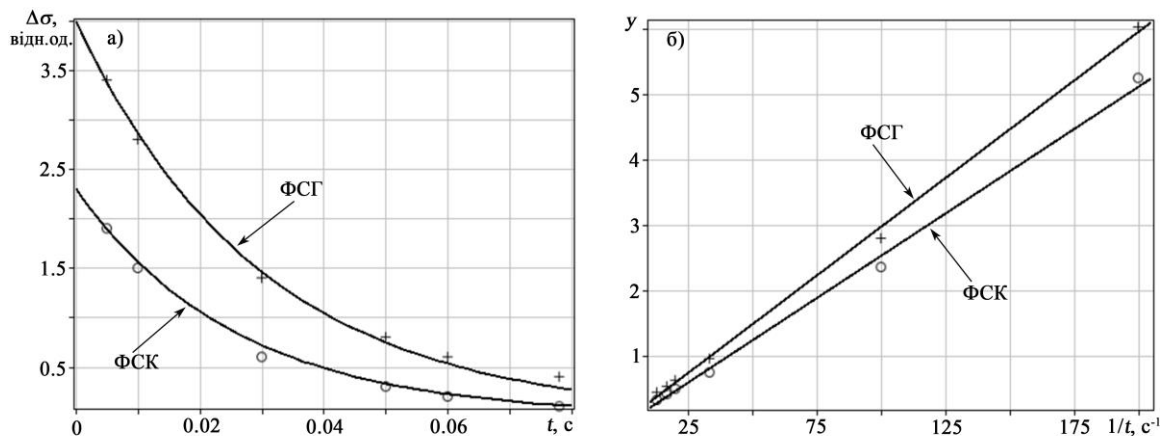
Це дозволяє перейти до аналізу більш простої лінійної функції виду (7), кутовий коефіцієнт якої дорівнює часу життя нерівноважних носіїв  $a=\tau$ . Коефіцієнти  $a$  і  $b$  лінійної регресії, похибки їх визначення  $\delta_a$  і  $\delta_b$  та коефіцієнт кореляції  $\rho$  визначаються у відповідності до залежностей (8-10).

Експериментальні результати застосування методу затухання фотопровідності та їх числова обробка наведені у табл.2 та на рис.4.

Таблиця 2

**Результати експерименту та розрахунків при застосування методу затухання фотопровідності**

| $t, c$                        | $x=1/t, c^{-1}$ | ФСК  |       | ФСГ  |       |
|-------------------------------|-----------------|--|-------|--|-------|
|                               |                 | $A_0/\Delta\sigma$                                 | $y$   | $A_0/\Delta\sigma$                                 | $y$   |
| 0,005                         | 200,0           | 1,21   | 5,240 | 1,18   | 6,020 |
| 0,010                         | 100,0           | 1,53   | 2,350 | 1,43   | 2,790 |
| 0,030                         | 33,3            | 3,84   | 0,741 | 2,86   | 0,952 |
| 0,050                         | 20,0            | 7,66   | 0,490 | 5,04   | 0,621 |
| 0,060                         | 16,7            | 11,50  | 0,410 | 6,68   | 0,526 |
| 0,078                         | 12,8            | 23,00  | 0,318 | 10,00  | 0,435 |
| час життя $\tau, c$           |                 | 0,025  |       | 0,030  |       |
| коефіцієнт кореляції $\rho$   |                 | 0,988  |       | 0,996  |       |
| коефіцієнти лінійної регресії |                 | $a = 0,025 c; b = -0,054$                          |       | $a = 0,030 c; b = -0,012$                          |       |
| середньоквадратичні похибки   |                 | $\delta_a = 1,110 \cdot 10^{-3}; \delta_b = 0,103$ |       | $\delta_a = 7,310 \cdot 10^{-3}; \delta_b = 0,068$ |       |



**Рис. 4. Криві затухання фотопровідності (а) і лінійна регресія затухання фотопровідності (б) для двох досліджуваних напівпровідникових матеріалів. Суцільні лінії – теоретичні залежності, кола та хрести – експериментальні результати**

Аналіз отриманих результатів дозволяє стверджувати, що метод затухання фотопровідності для визначення часу життя нерівноважних носіїв дає добре узгодження з теорією. Напівпровідник на основі германію демонструє більший спад фотопровідності (рис.4(а)) і відповідно більший кутовий коефіцієнт лінійної регресії (рис.4(б)), що показує як і у методі частотної залежності фотопровідності, що

напівпровідник на основі германію характеризується більшим значенням часу життя нерівноважних носіїв у порівнянні з напівпровідником на основі кремнію.

Результати визначення часу життя нерівноважних носіїв при застосуванні обох експериментальних методів наведено у табл.3. Обидва методи дають у межах похибки експерименту однакові результати, демонструючи більше значення часу життя нерівноважних носіїв для напівпровідникового матеріалу на основі германію.

Таблиця 3

**Результати визначення часу життя нерівноважних носіїв  $\tau$  (с) в напівпровідниковому матеріалі при застосуванні двох експериментальних методів**

| Метод частотної залежності фотопровідності |             | Метод затухання фотопровідності |             |
|--|-------------|---------------------------------|-------------|
| ФСК  | ФСГ         | ФСК                             | ФСГ         |
| 0,021±0,005                                | 0,032±0,007 | 0,025±0,001                     | 0,030±0,007 |

Метод затухання фотопровідності є більш простим у реалізації і таким, що потребує менше часу для проведення експерименту і числової обробки. Недоліком цього методу є те, що на результати вимірювань впливають рівні прилипання носіїв заряду, їх концентрація та інші характеристики, які невідомі [3,6]. Також для коректної реалізації методу необхідно забезпечити досягнення стаціонарного значення фотопровідності при імпульсному освітленні напівпровідника. Метод частотної залежності фотопровідності є більш точним у порівнянні з методом затухання фотопровідності, але при цьому більш складним у реалізації з більшими витратами часу на проведення і обробку результатів експерименту. Крім того, вказаний метод може використовуватись лише за умови достатньо високої фоточутливості напівпровідникового кристалу.

### Висновки

Вивчення фотоелектричних явищ займає важливе місце у загальному комплексі досліджень властивостей напівпровідників і тому має бути належним чином представлено у навчальному лабораторному курсі фізики у вузі. Презентовані методична розробка та лабораторне обладнання ілюструють реалізацію двох методів експериментального визначення часу життя нерівноважних носіїв заряду – методу частотної залежності фотопровідності і методу затухання фотопровідності. Проведення лабораторного дослідження дозволить не тільки ознайомитися з експериментальними методами визначення часу життя нерівноважних носіїв заряду, але і провести порівняння і співставлення методів між собою, зробити оцінку переваг та недоліків кожного з них. Запропонована в роботі методика математичної обробки експериментальних результатів на основі методу найменших квадратів дає студентам навички використання математичного апарату і демонструє теоретичний аспект будь-якої прикладної експериментальної задачі, а також забезпечує вимоги неперервної математичної підготовки студентів на протязі усього періоду навчання.

Автори висловлюють подяку інженеру кафедри енергетики, електротехніки і фізики ХНТУ Агбомасу Віньону Лорану за допомогу у підготовці графічних матеріалів роботи.

### Список використаних джерел

1. Рывкин С.М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках / С.М. Рывкин. – М.: Физматгиз, 1963. – 496 с.
2. Ковтонюк Н.Ф. Измерение параметров полупроводниковых материалов / Н.Ф. Ковтонюк, Ю.А. Концевой. – М.: Металлургия, 1970. – 432 с.
3. Батавин В.В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур / В.В. Батавин, Ю.А. Концевой, Ю.В. Федорович. – М.: Радио и связь, 1985. – 264 с.
4. Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов / Л.П. Павлов. – М.: Высш. шк., 1987. – 239 с.
5. Блад П. Методы измерения электрических свойств полупроводников / П.Блад, Дж. Ортон // Зарубежная радиоэлектроника. – 1981. – № 1. – с. 3–50.
6. Спосіб вимірювання часу життя нерівноважних носіїв струму у напівпровідниках: пат. 90369 Україна: МПК6G01R 31/26 / О.М Чугай, С.В. Олійник, В.К. Комар, С.В. Сулима, В.М. Пузіков, І.С. Терзін, С.Л. Абашин, О.С. Чуйко. – №200808181; заявл. 17.06.2008; опубл. 26.04.2010, Бюл. №8.
7. Кобелева С.П. Методы измерения электрофизических параметров монокристаллического кремния / С.П. Кобелева // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – № 1. – с. 60–67.
8. Singh S.N. Application of photoconductivity decay and photocurrent generation methods for determination of minority carrier lifetime in silicon / S.N Singh, R. Gandotra, P.K. Singh, B.C. Chakravarty // Bull. Mater. Sci. – 2005. – Vol. 28, No. 4. – pp. 317–323.
9. Методические рекомендации к применению вычислительной техники в курсе физики вуза / Казанский В.М., Клапченко В.И., Кошелева И.Д., Краснянский Г.Е. – К.: УМК ВО, 1989. – 232 с.
10. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Корн Г., Корн Т. – М.: Наука, 1973. – 832 с.