

УДК 621.382

**В. С. Осадчук, д. т. н., проф.; О. В. Осадчук, д. т. н., проф.; Р. В. Дуда****МІКРОЕЛЕКТРОННИЙ СЕНСОР ІЗ ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ ДЛЯ  
ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ЖИТТЯ НОСІЇВ ЗАРЯДУ МЕТОДОМ  
МОДУЛЯЦІЇ ПРОВІДНОСТІ В ТОЧКОВОМУ КОНТАКТІ**

*У технологіях виготовлення напівпровідникових приладів використовують різні методи дослідження їхніх параметрів, які оцінюють за зміною структурно-чутливих електричних параметрів – дифузійної довжини пробігу нерівноважних носіїв заряду  $L_D$  та часу їхнього життя  $\tau$  [4]. Відомі методики [1] визначення цих параметрів дозволяють визначити  $L_D$  і  $\tau$  для об'єму напівпровідників, тому важливим завданням цієї роботи було вивчити можливості визначення  $\tau$  за допомогою перетворення напруги в частоту. Подальший аналіз та обробка частотного сигналу дозволяє підвищити точність визначення  $\tau$ . При цьому розглядали методику вимірювання часу життя носіїв заряду методом модуляції провідності в точковому контакті.*

**Ключові слова:** час життя, дифузійна довжина, нерівноважні носії заряду, модуляція, точковий контакт.

**Вступ**

Вимірювання часу життя носіїв заряду методом модуляції провідності в точковому контакті полягає в тому, що через точковий контакт на поверхні зразка, який слугує емітером, проходить імпульс струму прямокутної форми, за допомогою якого в об'ємі зразка інжектуються носії заряду. За рахунок рекомбінації після закінчення імпульсу струму надлишкова концентрація носіїв заряду в об'ємі зразка зменшується [2].

Через деякий час (час затримки) після закінчення інжектувального імпульсу через точковий контакт проходить наступний імпульс струму, за допомогою якого проводять вимірювання. Напруга на зразку в момент проходження вимірювального імпульсу залежить від концентрації носіїв заряду, які не встигли прорекомбінувати. Змінюючи час затримки в межах  $0 - 3 \tau$ , можна по залежності напруги на зразку від часу затримки визначити час життя носіїв заряду [4].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Науково-технічний прогрес неможливо уявити без електроніки, а особливо мікроелектроніки. У сучасній мікроелектроніці широко застосовують напівпровідникові матеріали та багаточастотні структури, на основі яких виготовляють різноманітні напівпровідникові прилади та мікросхеми. Подальше вдосконалення технології виготовлення напівпровідникових матеріалів пов'язане з підвищенням ефективності лабораторного та промислового контролю якості. Від цього залежать як розміри технологічних втрат на різноманітних етапах виробництва, так і матеріальні витрати на виробничий контроль їхньої якості. Оснащення промисловості високоточними та продуктивними засобами вимірювання, розробка неруйнівних методів контролю безпосередньо пов'язані з проблемою підвищення якості виробництва напівпровідникових матеріалів і структур.

Робота більшості напівпровідникових приладів ґрунтується на нерівноважній провідності, тобто на інжекції, дифузії, дрейфі та рекомбінації нерівноважних носіїв струму. Величина і характер розподілу нерівноважних носіїв заряду, а отже, і час їхнього життя змінюються в широких межах залежно від умов їхньої генерації, типу домішкових центрів, їхньої концентрації в об'ємі і на поверхні пластини. Дослідження цих неоднорідностей має важливе значення для вивчення різних фізичних процесів, а також для збільшення виходу придатних

напівпровідникових приладів та зменшення розкиду їхніх параметрів.

Час життя неосновних носіїв заряду є важливим параметром матеріалу, який впливає на параметри матеріалу, які, у свою чергу, впливають на характеристики напівпровідникових пристроїв, які використовують властивості неосновних носіїв заряду [3].

Найефективніші методи вимірювання часу життя неосновних носіїв заряду:

1. *Стационарні методи*: метод вимірювання дифузійної довжини, який ґрунтується на використанні рухомого світлового зонда, а також метод вимірювання фотоелектромагнітного ефекту та стаціонарної провідності.

2. *Нестационарні методи*: імпульсний метод згасання фотопровідності, який використовують під час вимірювання на пластинах та на злитках, а також методи з використанням  $p - n$  переходів.

Знаючи потрібний час життя, можна обрати певну технологію виготовлення того чи іншого виробу, наприклад, легування кремнію золотом призводить до зменшення часу життя неосновних носіїв заряду, а під час використання гетеру час життя, навпаки, збільшується. Варто зазначити, що часто важливо вимірювати час життя в готовому пристрої, а не у вихідному матеріалі.

На рис. 1 наведено блок-схему класифікації методів для визначення часу життя носіїв заряду в напівпровідниках [7].

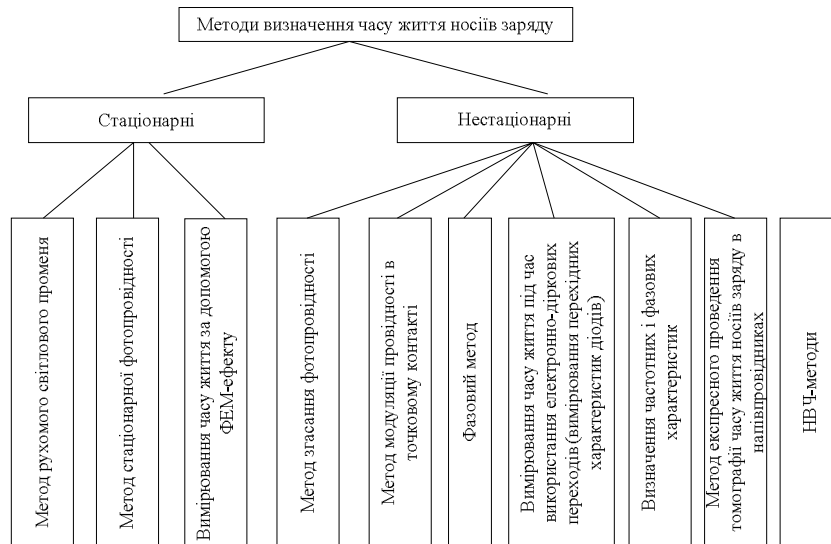


Рис. 1. Блок-схема класифікації методів для визначення часу життя носіїв заряду в напівпровідниках

### Математична модель

Позначимо максимальну напругу на зразку через  $U(\infty)$ , а напругу в момент подачі імпульсу, за допомогою якого відбувається вимірювання, –  $U(t)$ . Різниця цих напруг – це функція часу затримки [3]:

$$\Delta U(t) = U(\infty) - U(t) = \frac{1}{2\pi\sigma_0} \int_{r_0}^{\infty} \frac{dr}{r^2} - \frac{1}{2\pi\sigma_0} \int_{r_0}^{\infty} \frac{dr}{r^2 \left[ 1 + \frac{\Delta\sigma(r,t)}{\sigma_0} \right]} \quad (1)$$

Якщо збиткова концентрація носіїв заряду низька порівняно з концентрацією основних носіїв заряду, то вираз (1) набуде вигляду:

$$\Delta U(t) = \frac{I}{2\pi\sigma_0^2} \left[ \int_{r_0}^{\infty} e\mu_p (b+1) \Delta p(r,0) \frac{dr}{r^2} \right] \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right) \quad (2)$$

Напруга  $\Delta U(t)$  [3] спадає в часі за експоненціальним законом за умови, що час затримки не дуже малий, оскільки інтеграл у квадратних дужках не залежить від  $t$ .

Змінюючи час затримки імпульсу струму, за допомогою якого відбувається вимірювання, та фіксуючи значення  $U(\infty)$ , можна знайти час життя носіїв заряду за кутом нахилу прямої  $\ln \Delta U(t)$  у функції часу затримки [3]:

$$\frac{1}{\tau_p} = -\frac{d}{dt} \ln U(t)$$

Ураховуючи поверхневу рекомбінацію, дифузію носіїв заряду та вплив точкового контакту, отримаємо [2]:

$$\mu_p \xi \gg s \text{ або } \frac{I}{2\pi r^2} \gg s. \quad (3)$$

Для зразків з малою швидкістю поверхневої рекомбінації носіїв заряду нерівність (3) у прикордонній зоні виконується, тобто рекомбінацією на поверхні можна знехтувати. Напруга в зоні контакту досить висока, тому дифузію носіїв заряду також можна не враховувати. Таким чином, розподіл носіїв заряду в зразку до моменту закінчення інжектувального імпульсу струму можна визначити з такого виразу [3]:

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = -\frac{\mu_p I}{2\pi \sigma_0 r^2} \frac{\partial \Delta p}{\partial r} - \frac{\Delta p}{\tau_p}. \quad (4)$$

Розв'язавши рівняння (4), отримаємо, що до моменту закінчення інжектувального імпульсу струму  $t_n$  концентрація збиткових носіїв заряду досягає значення [3, 4]:

$$\Delta p(r_1) = \Delta p(r_0) \exp \left[ -\frac{2\pi \sigma_0}{3\mu_p I} (r_1^3 - r_0^3) \right]. \quad (5)$$

Залежність між глибиною проникнення інжекттованих носіїв заряду та тривалістю імпульсу можна знайти з диференціального рівняння [3]:

$$\frac{dr}{dt} = \mu_p \xi = \frac{\mu_p I}{2\pi \sigma_0 r^2}.$$

Виконавши інтегрування, отримаємо [3]:

$$t_n = \frac{2\pi \sigma_0}{3\mu_p I} (r_1^3 - r_0^3)$$

Функція (5) описує розподіл носіїв заряду в зразку в інтервалі значень  $r$  [3]:

$$r_0 \leq r \leq \left[ \frac{3\mu_p I}{2\pi \sigma_0} t_n + r_0^3 \right]^{\frac{1}{3}}.$$

Розподіл носіїв заряду через час  $t$  після закінчення інжектувального імпульсу можна знайти за допомогою розв'язку рівняння (6) з урахуванням рекомбінації в об'ємі зразка.

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = -\frac{\Delta p}{\tau_p} + D_p \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial r^2}. \quad (6)$$

Розглядаючи граничний випадок безмежно великої швидкості рекомбінації носіїв заряду, отримуємо граничну умову [3]:

$$\Delta p(r, t) \Big|_{r=r_0} = 0. \quad (7)$$

За допомогою підстановки  $\Delta p(r, t) = \Delta p_0(r, t) \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)$ , рівняння (6) зводиться до дифузійного рівняння [3]:

$$\frac{\partial \Delta p_0(r, t)}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 \Delta p_0(r, t)}{\partial r^2}. \quad (8)$$

Розв'язком виразу (8) слугує функція [2]:

$$\Delta p_0(r, t) = \frac{1}{2r\sqrt{\pi D_p t}} \int_0^\infty (\xi + r_0) \Delta p(\xi + r_0) \times \left\{ \exp\left[-\frac{(r - \xi)^2}{4D_p t}\right] \exp\left[-\frac{(r + \xi)^2}{4D_p t}\right] \right\} d\xi.$$

Отже,

$$\Delta p(r, t) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{\tau_p}\right)}{2r\sqrt{\pi D_p t}} \int_0^\infty (\xi + r_0) \Delta p_0(\xi + r_0) \times \left\{ \exp\left[-\frac{(r - \xi)^2}{4D_p t}\right] \exp\left[-\frac{(r + \xi)^2}{4D_p t}\right] \right\} d\xi. \quad (9)$$

Для того, щоб обчислити напругу  $\Delta U(t)$ , потрібно в (6) підставити (9), після чого отримаємо [3]:

$$\begin{aligned} \Delta U(t) = U(\infty) - U(t) = \text{const} \frac{\exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)}{\sqrt{D_p t}} \int_0^\infty \frac{1}{r^3} \exp\left[-\frac{(r - r_0)^2}{4D_p t}\right] \times \\ \times \int_0^\infty (r' - r_0) \exp\left(-\frac{r'^2}{4D_p t}\right) \text{sh}\left(\frac{r - r_0}{2D_p t} r'\right) \Delta p_0(r' + r_0) dr' dr \end{aligned} \quad (10)$$

Аналіз виразу (10) показує, що вираз значно спрощується під час виконання умови  $r_0 \ll \sqrt{D_p t}$  [2], а також у випадку, коли глибина проникнення інжекттованих носіїв заряду мала.

$$\left(\frac{3\mu_p I}{2\pi\sigma_0} t_n + r_0^3\right)^{\frac{1}{3}} \ll 2\sqrt{D_p t}, \quad (11)$$

$$\Delta U(t) = \text{const} \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right). \quad (12)$$

За великої глибини проникнення носіїв заряду напруга [3]:

$$\Delta U(t) = \text{const} \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right). \quad (13)$$

Закон зміни  $\Delta U(t)$  відповідає виразу (13) за дотримання такої умови [3]:

$$\frac{2\pi\sigma_0}{3\mu_p\tau_p I} (4D_p t)^{\frac{3}{2}} \ll \frac{\sqrt{\pi}}{2}. \quad (14)$$

За досить великого струму та часу затримки (у межах від  $\tau_p$  до  $3\tau_p$ ) ця умова неважко реалізується.

Схема генератора на основі транзисторної структури з від'ємним опором по змінному

струму у загальному вигляді подана на рис. 2. На схемі сумарна індуктивність  $L=L_0+L_1$  і опір  $R=r_0+R_1$ , де  $L_0, r_0$  – індуктивність і опір зовнішнього кола,  $L_1, R_1$  – індуктивність і опір виводів транзисторної структури. Розвиток процесів у цій схемі пов'язаний зі зміною струму  $i_T$  і напруги  $U$  [6]:

$$\frac{di_T}{dt} = \frac{U_{\text{жив}} - i_T R - U}{L}, \quad (15)$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{i_T - I(U)}{C(U)}. \quad (16)$$

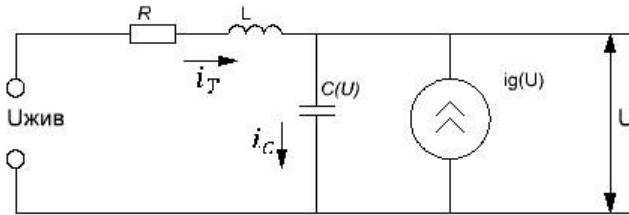


Рис. 2. Схема генератора за змінним струмом

Рівняння (15) та (16) можна об'єднати шляхом ділення першого на друге, тобто [6]:

$$\frac{di_T}{dt} = \frac{U_{\text{жив}} - i_T R - U}{i_T - I(U)} \cdot \frac{C(U)}{L}. \quad (17)$$

У стані рівноваги ( $U_0, i_{T0}$ ) струми і напруги схеми не змінюються, тому [6]:

$$\left. \frac{di_T}{dt} \right|_{i_T=i_{T0}} = 0, \quad \left. \frac{dU}{dt} \right|_{U=U_0} = 0. \quad (18)$$

Використовуючи умову (18), із рівнянь (15) і (16) знаходимо [6]:

$$U_{\text{жив}} - i_{T0} R - U_0 = 0, \quad (19)$$

$$i_{T0} - I(U_0) = 0. \quad (20)$$

Диференціальне рівняння коливальної схеми має вигляд [6]:

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{du}{dt} \left( \frac{R}{L} + \frac{1}{R_g C} \right) + \frac{u}{LC} \left( \frac{R}{R_g} + 1 \right) = 0. \quad (21)$$

Тоді характеристичне рівняння можна записати у вигляді [6]:

$$x^2 + x \left( \frac{R}{L} + \frac{1}{R_g C} \right) + \frac{u}{LC} \left( \frac{R}{R_g} + 1 \right) = 0. \quad (22)$$

Корені характеристичного рівняння визначають із (22) [6]:

$$x_{1,2} = \frac{-\left( \frac{R}{L} + \frac{1}{R_g C} \right) \pm \sqrt{\left( \frac{R}{L} + \frac{1}{R_g C} \right)^2 - 4 \frac{1}{LC} \left( \frac{R}{R_g} + 1 \right)}}{2}. \quad (23)$$

Розв'язок рівняння (21) можна записати у вигляді [6]:

$$\begin{aligned}
 u(t) = & A \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{R}{L} + \frac{1}{R_g C} \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{1}{R_g C} + \frac{R}{L} \right)^2 - \frac{1}{LC} \left( 1 + \frac{R}{R_g} \right)} \right] t + \\
 & + B \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{R}{L} + \frac{1}{R_g C} \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{1}{R_g C} + \frac{R}{L} \right)^2 - \frac{1}{LC} \left( 1 + \frac{R}{R_g} \right)} \right] t + \frac{U_{\text{жив}}}{\left( 1 + \frac{R}{R_g} \right)}.
 \end{aligned}
 \tag{24}$$

На основі визначення повного опору визначають частоту генерації [6]:

$$Z = R + \frac{R_g}{(\omega C R_g)^2 + 1} + j \left( \omega L - \frac{\omega C R_g^2}{1 + (\omega C R_g)^2} \right).
 \tag{25}$$

За виконання умови [6]:

$$\omega L - \frac{\omega C R_g^2}{1 + (\omega C R_g)^2} = 0,
 \tag{26}$$

у схемі наступає резонанс. Із рівняння (21) визначаємо частоту [6]:

$$F = \frac{1}{2\pi |R_g(\tau) C_{\text{екв}}(\tau)|} \sqrt{\frac{R_g^2(\tau) C_{\text{екв}}(\tau)}{L} - L}.
 \tag{27}$$

Відносну чутливість можна обрахувати за допомогою рівняння [6]:

$$S_F^\tau = \frac{\tau}{F} \cdot \frac{dF}{d\tau}.
 \tag{28}$$

### Результати моделювання

Мікроелектронний сенсор із частотним виходом для визначення часу життя носіїв заряду складається із пристрою для визначення часу життя носіїв заряду методом модуляції провідності в точковому контакті та мікроелектронного частотного перетворювача (рис. 3).

У початковий момент часу через точковий контакт на поверхні зразка в прямому напрямку не проходить прямокутний імпульс. Підвищенням напруги джерела постійної напруги  $E_{ж}$  до величини, коли на електродах транзисторів  $VT1$  і  $VT2$  виникає від'ємний опір, який призводить до виникнення електричних коливань у контурі, утвореному паралельним включенням повного опору з ємнісним складником на електродах транзисторів  $VT1$  і  $VT2$  та індуктивності  $L$ . Конденсатор  $C$  запобігає проходженню змінного струму через джерело постійної напруги  $E_{ж}$ . Прямокутний імпульс струму від генератора  $G1$  надходить на зразок. Через деякий час, який регулюється за допомогою лінії затримки  $L3$ , на зразок від генератора  $G2$  подають наступний імпульс струму. Генератори  $G1$  та  $G2$  разом з лінією затримки  $L3$  утворюють генератор спарених імпульсів (рис. 3). Напруга на зразку через обмежувач імпульсів подається на мікроелектронний частотний перетворювач, це призводить до ефективної зміни частоти коливання мікроелектронного частотного перетворювача.

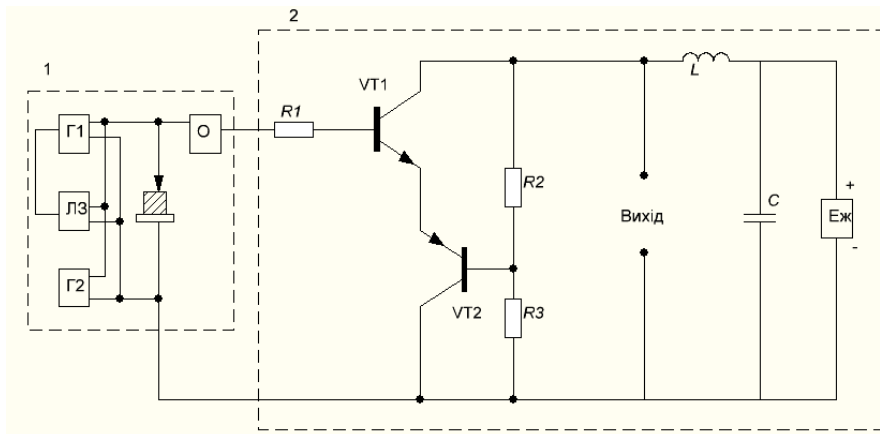


Рис. 3. Мікроелектронний сенсор з частотним виходом для визначення часу життя носіїв заряду методом модуляції провідності в точковому контакті

Для коректності моделювання, яке проведено за допомогою середовища OrCad 9.2, пристрій для визначення часу життя носіїв заряду методом модуляції провідності в точковому контакті (рис. 3) замінено на джерело живлення  $V2$ , на яке подавалась напруга, що була визначена за допомогою експериментальних досліджень [5].

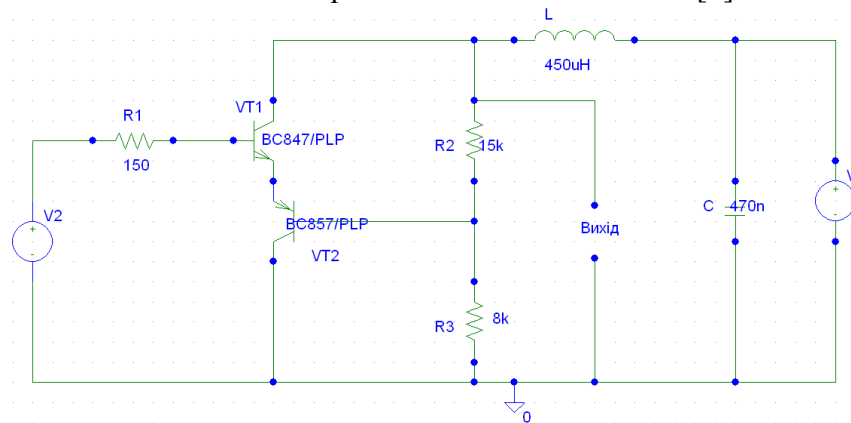


Рис. 4. Схема моделювання

Змінюючи значення напруги на джерелі живлення  $V2$ , знімають відповідні значення частоти коливання мікроелектронного частотного перетворювача, а за результатами моделювання будують графік залежності частоти вихідного сигналу від часу життя носіїв заряду (рис. 5).

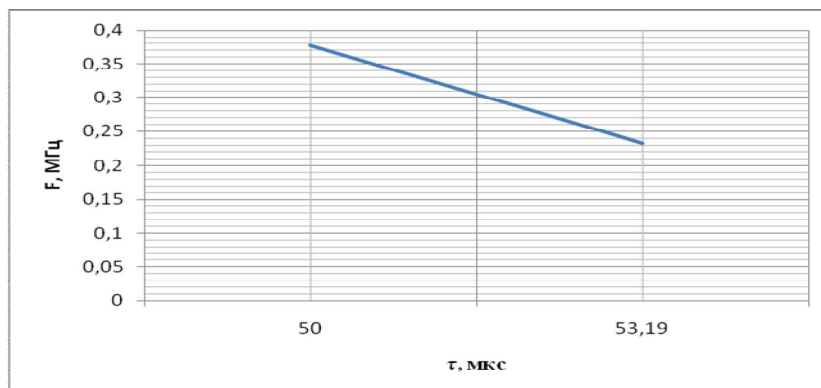


Рис. 5. Графік залежності частоти від зміни часу життя носіїв заряду

Для обрахунку відносної чутливості побудовано низку графіків, дослідження яких показало, що відносна чутливість запропонованого методу майже на порядок вища порівняно з теоретичними дослідженнями [5].

**Висновки**

На основі представленої математичної моделі розроблено та промодельовано мікроелектронний сенсор з частотним виходом для визначення часу життя носіїв заряду методом модуляції провідності в точковому контакті. Відносна чутливість запропонованого методу, як показали розрахунки, майже на порядок вища порівняно з теоретичними дослідженнями.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Блад П. Методы измерения электрических свойств полупроводников / П. Блад, Дж.В. Оргон. – Зарубежная радиоэлектроника, 1981. – 49 с.
2. Ковтонюк Н. Ф. Измерение параметров полупроводниковых материалов / Н. Ф. Ковтонюк, Ю. А. Концевой. – «Металургия», 1970. – 432 с.
3. Павлов Л. П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов: Учеб. для вузов по спец. «Полупроводниковые и микроэлектронные приборы» / Л. П. Павлов. – М.: Высш. школа, 1987. – 239 с.
4. Батвин В. В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур / Батвин В. В., Концевой Ю. А., Федорович Ю. В. – М.: Радио и связь, 1985. – 264 с.
5. Уколов А. И. О применимости методик определения параметров рекомбинации носителей заряда к приповерхностным слоям полупроводника / А. И., Уколов, В. А. Надточий, А. З. Калимбет, Д. С. Москаль // Пошук і знахідки. Серія: фізико – математичні науки. – 2010. – № 1. – С. 88 – 94.
6. Осадчук В. С. Напівпровідникові перетворювачі інформації / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця ВНТУ, 2004. – 208 с.
7. Огляд методів визначення часу життя носіїв заряду в напівпровідниках [Електронний ресурс] / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Р. В. Дуда // Новости научной мысли – 2013: VIII Міжнародна науково технічна конференція, 27 жовтня – 5 листопада 2013 р. м. Прага, Чехія: тези доповідей – Режим доступу: [http://www.rusnauka.com/31\\_NNM\\_2013/Tecnic/6\\_145682.doc.htm](http://www.rusnauka.com/31_NNM_2013/Tecnic/6_145682.doc.htm).

**Осадчук Володимир Степанович** – д. т. н., професор кафедри електроніки.

**Осадчук Олександр Володимирович** – д. т. н., професор кафедри радіотехніки.

**Дуда Роман Валерійович** – аспірант кафедри електроніки.  
Вінницький національний технічний університет.