

<sup>1</sup> аспірант кафедри фізики, СДПУ

<sup>2</sup> завідувач кафедри фізики, доктор фіз.-мат. наук, професор, СДПУ

<sup>3</sup> старший викладач кафедри фізики, СДПУ

e-mail: ukolov-aleksei@mail.ru

## ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ПОВЕРХНЕВОЇ РЕКОМБІНАЦІЇ І ЇЇ ВПЛИВУ НА ЧАС ЖИТТЯ НЕРІВНОВАЖНИХ НОСІЇВ ЗАРЯДУ

Вимірювання структурно чутливих електрофізичних параметрів дозволяє визначити якість матеріалів для створення напівпровідникових пристроїв. У даній роботі розглянута теорія впливу швидкості поверхневої рекомбінації на час життя і довжину дифузії нерівноважних носіїв заряду в приповерхневих шарах напівпровідникового зразка. Отримані нові експериментальні результати параметрів рекомбінації нерівноважних носіїв заряду на розробленому вимірювальному пристрої з урахуванням впливу поверхні напівпровідника.

**Ключові слова:** монокристал, швидкість поверхневої рекомбінації, час життя.

### Вступ

У роботах [1-3] було показано, що введення дефектів структури в приповерхневих шар кристалів може значно зменшити час життя  $\tau$  і дифузійну довжину пробігу  $L_D$  нерівноважних носіїв заряду. Для багатьох напівпровідникових приладів (діодів, транзисторів, твердотільних інжекційних лазерів, оптоелектронних приладів) ці параметри визначають робочі характеристики і працездатність. З іншого боку, контролюючи зміну  $\tau$  і  $L_D$  під дією зовнішніх чинників, можна досліджувати процеси дифузії в кристалах, явище деградації у часі, визначати кінетичні параметри структурних змін у напівпровідниках. Оскільки зовнішня дія на кристал (опромінювання частками високих енергій, легування домішками, деформація при низьких температурах) спонукає генерацію дефектів в приповерхневих шарах, то у процесі вимірювань  $\tau$  і  $L_D$  необхідно враховувати вплив самої поверхні, де швидкість рекомбінації  $s$  може бути значною і близькою до швидкості рекомбінації нерівноважних електронів і дірок у приповерхневому шарі. Тому визначення  $s$  повинне бути супутним процесом при вимірюваннях  $\tau$  і  $L_D$ .

## Основна частина

У відомій літературі знайдені рішення задачі для обчислень  $s$  напівпровідникових зразків простих геометричних форм (тонких ниток прямокутного поперечного перерізу, тонких пластин)[4]. Загальне ж рішення задачі стосовно руху електронів і дірок під дією електричного поля в однорідному макрокристалі довільної форми з урахуванням впливу швидкості поверхневої рекомбінації елементарними методами отримати не можна[4]. Сутність впливу поверхневої рекомбінації полягає в наступному. У рівноважному стані потік дірок, які підходять до поверхні кристала  $n$ -типу, повинен дорівнювати потоку дірок, які рухаються у зворотному напрямі. Але при відхиленні від рівноважного стану ці потоки вже не компенсують один одного. Тоді число дірок, що падають на одиничну площу поверхні за одиницю часу дорівнює  $\frac{1}{4}v_t p$ , де  $v_t$  - середня теплова швидкість дірок,  $p$  - концентрація дірок. Число дірок, що пішли з поверхні за одиницю часу, буде дорівнювати  $\frac{1}{4}r v_t p + s'$ , де  $r$  - вірогідність відбивання дірки,  $s'$  - темп виникнення дірок на одиниці площі поверхні. В стані рівноваги маємо співвідношення

$$\frac{1}{4}v_t p_0 = \frac{1}{4}r v_t p_0 + s_0, \quad (1)$$

де  $s_0 = \frac{1}{4}(1 - r)v_t p_0$ .

Таким чином, темп зникнення дірок біля поверхні  $s_a$  визначається виразом

$$s_a = \frac{1}{4}(1 - r)v_t(p - p_0), \quad (2)$$

який можна записати у вигляді  $s_a = s\Delta p$ , де  $s_a$  має розмірність швидкості і називається швидкістю поверхневої рекомбінації. Розглянемо тепер, яким чином поверхнева рекомбінація впливає на процес відновлення рівноваги. Візьмемо плоску поверхню і нехай  $x$  - відстань від поверхні до деякої точки у напівпровіднику. Вплив поверхневої рекомбінації врахуємо через граничну умову при  $x = 0$ , де справедливе співвідношення

$$D \frac{d\Delta p}{dx} = s\Delta p. \quad (3)$$

Як другу граничну умову приймемо, що  $\Delta p \rightarrow \tau_p \mathfrak{R}$  ( $\mathfrak{R}$  - темп рекомбінації), якщо  $x \rightarrow \infty$ . Таким чином, маємо

$$\Delta p = \mathfrak{R}\tau_p \left[ 1 - \frac{s\tau_p \exp(-x/L_D)}{L_D + s\tau_p} \right], \quad (4)$$

а величина  $\Delta p$  при  $x = 0$ ,  $\Delta p_0$ , визначається виразом

$$\Delta p_0 = \mathfrak{R}\tau_p \left( 1 - \frac{s\tau_p}{L_D + s\tau_p} \right). \quad (5)$$

Ступінь зменшення  $\Delta p$  залежить від відношення  $s/v_p$ , де  $v_p$  - швидкість, яка дорівнює  $L_D/\tau_p$ . Якщо  $s \gg v_p$ , то  $\Delta p_0$  дуже мале і зменшення концентрації надлишкових дірок поблизу поверхні буде значним. Вказані математичні викладки є основою для врахування швидкості поверхневої рекомбінації при визначенні середнього значення часу життя  $\bar{\tau}_p$  для напівпровідникових пластин

$$\frac{1}{\bar{\tau}_p} = \frac{1}{\tau_p} + \frac{s}{a}, \quad (6)$$

де  $a$  - товщина пластини. Рішення відповідної задачі для стрижня прямокутного перерізу виявляється складнішим, оскільки доводиться враховувати розміри, форму і стан поверхні після різних способів його обробки. Тому в кожному дослідженні слід проводити вимірювання  $s$  експериментально. У даній роботі запропонована методика вимірювань швидкості поверхневої рекомбінації  $s$  на основі розробленого і виготовленого авторами вимірювального комплексу. У його склад (рис.1) входять: універсальний двокоординатний столик із зразком (1), освітлювач (2), що формує вузьку світлову смугу на поверхні зразка, дзеркало на мікродвигуні (3), при обертанні якого промінь збуджує одночасно імпульси струму в ланцюзі фотодіода і генерацію нерівноважних носіїв заряду у зразку.

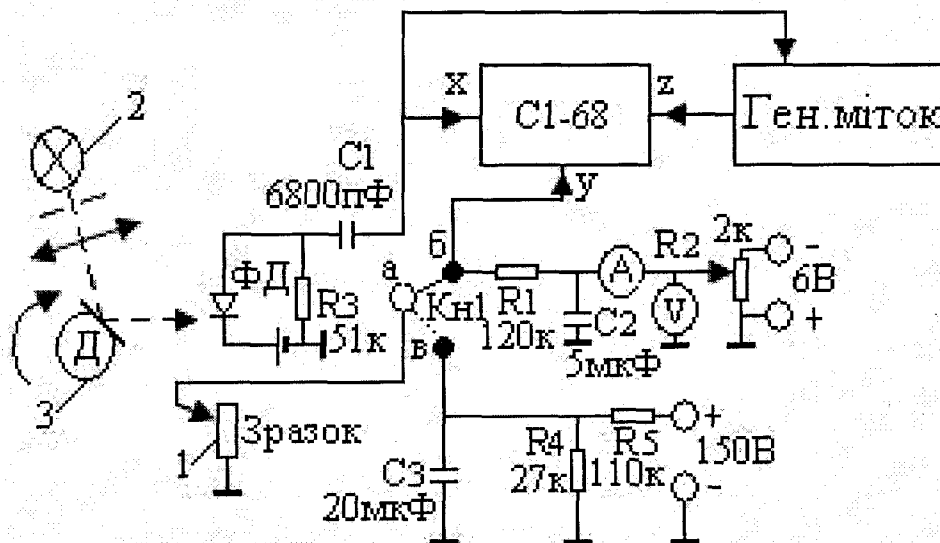


Рис. 1: Принципова схема вимірювального комплексу швидкості поверхневої рекомбінації

Фотодіодні імпульси дозволяють синхронізувати розгортку осцилографа і генератора імпульсних сигналів, які через вхід  $z$  осцилографа створюють мітки часу на осцилограмі  $C1 - 68$  (рис.2,а). Перемикач  $Кн1$  в положенні (б) дозволяє подавати на вольфрамовий зонд-колектор зворотну напругу

(1-1,5)В. Величина струму встановлюється (1-2)мА. У положенні (в) перемикача Кн1 на цей же зонд можна подавати короткочасні  $t = 0, 1с$  імпульси напругою 30В для формування його контакту. При обертанні дзеркала промінь світла швидко переміщується уздовж зразка, генерує нерівноважні носії заряду, які створюють імпульсний сигнал фото ЕРС, пропорційний їх концентрації у ланцюзі зонда-колектора.

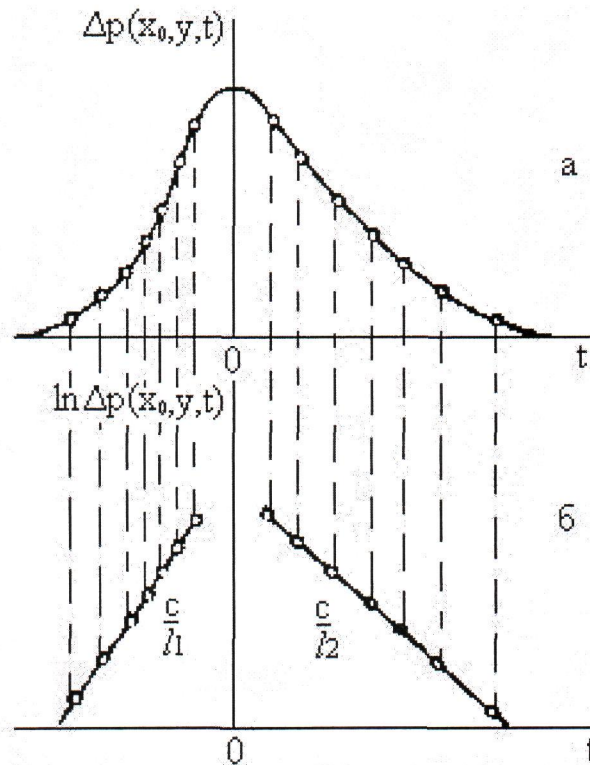


Рис. 2: Осцилограма фото ЕРС в лінійному (а) і напівлогарифмічному (б) масштабі

З опору навантаження  $R1$  в колекторному ланцюзі імпульси напруги подаються на осцилограф  $C1 - 68$ . В результаті на екрані осцилографа з'являється крива (рис.2,а), що є залежністю концентрації нерівноважних носіїв заряду від часу в точці контакту вимірювального зонда. Несиметрія сигналу відносно початку відліку обумовлена тим, що дифузійні швидкості нерівноважних носіїв заряду направлені в протилежні сторони від світлового променя і в одному випадку співпадають з напрямом руху самої світлової смуги, а в іншому випадку йому протилежні. Тому сталі часу  $l_1/c$  і  $l_2/c$ , визначені по тангенсу кута нахилу графіка (рис. 2,б), є різними. Залежності вигляду (рис.2,а) знімають для двох зразків різної товщини  $d$ . Тоді швидкість поверхневої рекомбінації

$$s = \frac{D}{2} \frac{d_1 d_2}{d_2 - d_1} \left( \frac{1}{L_{\alpha_1}^2} - \frac{1}{L_{\alpha_2}^2} \right), \quad (7)$$

де  $L_\alpha = \sqrt{l_1 l_2}$  знаходяться для двох зразків різної товщини  $d$ . У цьому ж експерименті визначається коефіцієнт біполярної дифузії  $D$ , як

$$D = \frac{c}{\frac{1}{l_1} - \frac{1}{l_2}}, \quad (8)$$

де  $c$  – швидкість руху променя. Коефіцієнт біполярної дифузії за отриманими експериментальними даними для зразка  $n - Ge$  марки ГЕ45гЗ становив  $D = 80,57 \text{ см}^2/\text{с}$  при швидкості руху світлового променя уздовж поверхні зразка  $c = 42,7 \text{ м/с}$ .

## Висновки

У роботі розроблена і виготовлена універсальна установка для визначення швидкості поверхневої рекомбінації і коефіцієнта біполярної дифузії в приповерхневих шарах напівпровідникового зразка. Показана можливість врахування цих параметрів при визначенні часу життя і довжини дифузії нерівноважних носіїв заряду. Отримані експериментальні результати дозволяють контролювати міру дефектності приповерхневих шарів напівпровідникових матеріалів, що необхідне при створенні поверхневих структур і багат шарових напівпровідникових пристроїв.

## Література

- [1] *Надточій В.А., Нечволод Н.К., Голоденко Н.Н.* Изменение времени жизни носителей заряда и проводимости дефектного приповерхностного слоя Ge при термообработках // Физ. и техн. высоких давлений. — 2004. — Т. 4, № 3. — С. 42–48.
- [2] *Nadtochiy V., Golodenko N., Nechvolod N.* Microplasticity and electrical properties of subsurface layers of diamond-like semiconductors strained at low temperatures // Functional Materials. — 2003. — V. 10, № 4. — P. 702 – 706.
- [3] *Nadtochiy V., Golodenko N., Nechvolod N.* Recombination of non-equilibrium charge carriers injected into Ge through intermediate defective layer // Functional Materials. — 2005. — V. 12, № 4. — P. 45 – 50.
- [4] *Смит Р.* Полупроводники/ Пер. с англ. — М.: Мир, 1982. — 560с.