

УДК 537.311.33  
PACS: 71.10-W

В.О. Надточій, М.К. Нечволод, М.М. Голоденко, Д. Г. Сущенко  
**Про рекомбінацію нерівноважних носіїв заряду у  
дефектному поверхневому шарі монокристалічного Ge**

*Слов'янський державний педагогічний інститут,  
м. Слов'янськ, вул. Ген. Батюка, 19, Донецька область, Україна, 84116  
E-mail: [sgpi@slav.dn.ua](mailto:sgpi@slav.dn.ua)*

Методом модуляції провідності у точковому контакті досліджувався вплив циклічного деформування монокристалічного германію при кімнатній температурі на час життя нерівноважних носіїв заряду. Показано, що внаслідок деформації виникає поверхневий дефектний шар. Час життя нерівноважних носіїв заряду у такому шарі зменшується порівняно з недеформованим кристалом.

**Ключові слова:** деформування, германій, дефектний шар, нерівноважні носії заряду.

*Стаття постуила до редакції 22.05.2001; прийнята до друку 22.06.2001*

## I. Вступ

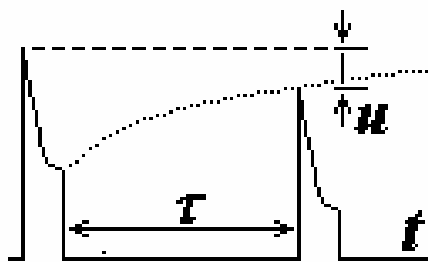
В області температур, нижчих за 550 К, а також за умови низьких напруг (20-100 МПа) дислокації в кристалах з високим потенціальним рельєфом Паєрлса (Ge, Si та інші) мають можливість рухатись подвійним поперечним ковзанням та переповзанням. Основною фізичною моделлю руху дислокацій при низьких температурах в області крихкого руйнування є їх неконсервативний рух [1-4]. Дифузійно-дислокаційний механізм релаксації напружень теоретично має місце при як завгодно малих значеннях навантаження. Згідно моделі вакансійного наносу [3,4], стискання кристала викликає пересичення по вакансіях, що становить

$$C_0 / C = (C_1 + C) / C = \exp[\sigma V_a / kT],$$

де  $C_0, C, C_1$  – відповідно рівноважна, реальна та надлишкова концентрація вакансій в полі нормальних напруг  $\sigma$ ,  $V_a$  – атомний об'єм. Це приводить до того, що вакансії рухаються на стоки й утворюють

кластери та дислокаційні петлі в бездислокаційних та малодислокаційних кристалах і викликають переповзання дислокацій, що вже є в кристалі (ростові та деформаційні дислокації). При розвантаженні кристала виникає недосиченість по вакансіях приблизно того ж порядку і вакансії засмоктуються з поверхні. При циклічному навантаженні кожне наступне стискання примушує вакансії рухатись до стоків у вигляді поступово зростаючих кластерів і дислокаційних петель, а впродовж циклу розвантаження вакансії засмоктуються з поверхні для поновлення попереднього значення рівноважної концентрації при незмінних умовах деформування.

При циклічному деформуванні в режимі стискання-розвантаження зразків у формі прямокутної призми напружений стан через наявність сил тертя між навантажуючими площинами є неоднорідним, бо біля ребер зразка виникає концентрація напруг. Таким чином в напрямках від бічних ребер до середньої частини бічних граней та углуб



**Рис. 1.** Металографічна структура дефектів поблизу бічного ребра зразка германію. Періодична структура обумовлена періодичністю циклів стискання–розвантаження. В процесі кожного циклу з’являється нова смуга, і система смуг рухається вздовж бічної грані до її середини у вказаному напрямку.

зразка виникає градієнт напруг. Як результат, вакансії мігрують до мікрооб’єктів, де всебічна напруга більша (тобто до ребер зразка), в той час як атоми рухаються у протилежному напрямку [5,6]. Після декількох циклів стискання-розвантаження в тонкому приповерхневому шарі кристала формується періодична структура з кластерів та вакансійних петель, що утворилися поетапним розповсюдженням за цикл деформації фронту дефектного шару від ребер зразка до середини його бічних граней. При великій кількості циклів увесь зразок охоплюється тонким поверхневим шаром структурних дефектів [3]. Дефектоутворення є особливо інтенсивним при ультразвуковому опромінюванні зразка.

В цій роботі використовувались зразки n-Ge розміром 3×4×10 мм. Вісь найдовшої грані була [110], бічні поверхні – площини (111) та (112). Питомий опір напівпровідника становив 30 Ом·см.

Деформування проводили циклами стискання-розвантаження впродовж доби з амплітудою 100 Мпа, періодом циклу 0,5 години при температурі 310 К. Процес деформування супроводжувався ультразвуковим опромінюванням з частотою 22,5 кГц при потужності 5 Вт. В результаті деформування товщина поверхневого дефектного шару в середній частині бічної грані складала 10 мкм, біля ребер 50 мкм. На рис. 1 наведена металографічна структура дефектів поблизу бічного ребра.

Структурні дефекти суттєво впливають на процес генерації та рекомбінації носіїв заряду напівпровідника і на властивості напівпровідникових приладів [7,8]. Були проведені вимірювання часу життя неосновних носіїв заряду методом модуляції провідності у точковому контакті [9]. Для недеформованого зразка обробку результатів проводили з використанням рівняння

$$U(t) = \text{const} \cdot \exp(-t/\tau_p), \quad (1)$$

тут  $U(t) = U_2(\infty) - U_2(t)$ ;  $U_2(t)$  – напруга переднього фронту вимірювального імпульсу у вибраний момент часу з затримкою  $t$  відносно заднього фронту інжектуючого імпульсу;  $\tau_p$  – час життя дірок в n-Ge.

Для деформованих зразків інжекція носіїв з металевого зонду вглиб кристала здійснюється через проміжний дефектний шар товщини  $H$ . Аналіз процесу інжекції у такій структурі [10] дозволяє записати  $U(t)$  у вигляді

$$U(t) = c_s \exp(-t/\tau_s) \int_a^H j p_i dr + c_v \exp(-t/\tau_v) \int_a^H j p_i dr, \quad (2)$$

де коефіцієнти

$$c_s = (b + 1) / [\sigma_s (p_s + bn_s)], \quad (3)$$

$$c_v = (b + 1) / [c_v (p_v + bn_v)], \quad (4)$$

$$b = \mu_n / \mu_p \quad (5)$$

$\tau_s, \tau_v$  – час життя дірок в дефектному поверхневому шарі та в глибині кристала відповідно;

$p_s, p_v$  – концентрація дірок в дефектному поверхневому шарі кристала та у глибині кристала відповідно;  $p_i$  – концентрація інжектованих дірок в момент закінчення імпульсу;

$j$  – густина струму в напівпровіднику вздовж осі зонду;

$r$  – відстань від плоскої поверхні кристала

вздовж осі зонду;

$a$  – радіус сферичного вістря зонду;

$\sigma_s, \sigma_v$  – провідність дефектного поверхневого шару та провідність у глибині кристала;

$n_s, n_v$  – концентрація електронів в дефектному поверхневому шарі та в глибині кристала;

$\mu_p, \mu_n$  – рухливість дірок та електронів відповідно.

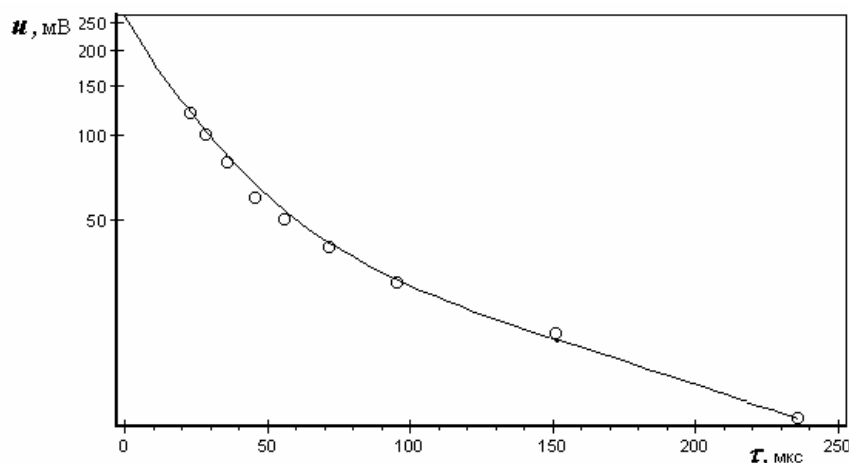
Згідно (2), експериментальну залежність апроксимуємо функцією:

$$U(t) = a \exp(-t / \tau_s) + c \exp(-t / \tau_v). \quad (6)$$

В експерименті амплітуди імпульсів напруги на виході генератора становили 15 В, напруга на зразку – близько 1 В, тривалість імпульсу 100 мкс, частота повторення пар імпульсів дорівнювала 100 Гц.

На рис. 2 показана залежність  $U$  від часу затримки вимірювального імпульсу відносно інжектуємого. Крива отримана за допомогою комп'ютерної обробки експериментальної бази даних. Розрахунок часу життя неосновних носіїв в

приповерхневому дефектному шарі дає  $\tau_s = 18$  мкс, у глибині кристала  $\tau_v = 129$  мкс. Останнє значення співпадає з величиною, наведеною в сертифікаті кристала. Оскільки методика дає можливість визначити локальний час життя в місці контакту зонду з напівпровідником, була також складена топограма часу життя нерівноважних носіїв бічної поверхні кристала. Ця топограма досить повно відповідає металографічним даним густини



**Рис. 2.** Залежність  $U$  від часу затримки вимірювального імпульсу відносно інжектуємого (експериментальні точки та апроксимаційна крива у напівлогарифмічному масштабі). На ділянці стрімкого спаду  $U$  при малому часі затримки визначалось  $\tau_s = 18$  мкс в приповерхневому шару зразка, похилій частині кривої праворуч відповідає  $\tau_v = 129$  мкс для внутрішньої частини кристалу.

дефектів. Після хімічного видалення кристалів та співпадає з об'ємним дефектного шару  $\tau_s$  відновлюється до значенням, але знову зменшується, якщо значень, знайдених для недеформованих деформування повторити.

- [1] В.П. Алехин, В.А. Надточий, В.В. Господаревский, М.Х. Шоршоров. Неконсервативное движение ростовых дислокации в макрообразцах и нитевидных кристаллах Si и Ge в условиях одноосного сжатия и растяжения при 20°C // *Дефекты структуры в полупроводниках*, сс. 31-32 (1978).
- [2] В.П. Алехин. *Физические закономерности микропластической деформации и разрушения поверхностных слоев твердого тела. Автореф. докт. диссерт.*, Киев, ИПМ АН УССР, (1978).
- [3] В.П. Алехин, М.Х. Шоршоров. О механизме релаксационных процессов в полупроводниковых кристаллах в области низких напряжении и температур // *Внутреннее трение в металлах и неорганических материалах*. Наука, М., сс. 152-156 (1982).
- [4] Н.К. Нечволод. *Ползучесть кристаллических тел при низких температурах*. Вища школа, Киев (1980).
- [5] В.М. Розенберг. *Основы жаропрочности металлических материалов*. Наука, М. (1973).
- [6] Дж. Хирт, И. Лоте. *Теория дислокаций*. Атомиздат, М. (1972).
- [7] Г. Матарэ. *Электроника дефектов в полупроводниках*. Мир, М. (1974).
- [8] В.А. Надточий, А.З. Калимбет, В.П. Алехин, А.Я. Белошапка. Влияние низкотемпературной микропластической деформации на электрические свойства р-п переходов // *Физика и химия обработки материалов*, 1, сс. 115-120 (1985).
- [9] Л.П. Павлов. *Методы измерения параметров полупроводниковых материалов*. Наука, М. (1987).
- [10] Н.Н. Голоденко, В.А. Надточий, Б.А. Свиридюк. *Ток в точечном контакте полупроводника с дефектным поверхностным слоем*, Киев, Деп. в Укр. ИНТЭИ, №852 (1992).

V. Nadtochii, M. Nechvolod, M. Golodehko, D. Sushchenko

### **Unbalance Charge Carriers Recombination in Thing Sub-Surface Layer of Ge Single Crystal**

*Slovyansk State Teachers' Pedagogical Institute,  
Slovyansk, 84116, Ukraine*

Influence of the cyclical low-temperature straining on charge carriers lifetime in Ge single crystals investigated by the method of the point contact conductivity modulation. It is shown that sub-surface defect layer is arise after deformation. Charge carriers lifetime is decreasing in this layer as compared with undeformed crystal.