

УДК 537.311.33

Гандзюк В.І.<sup>1</sup>, студ.,  
Оберемок О.С., к.ф.н., м.н.с.  
Павлюк С.П.<sup>2</sup>, к.ф.-м.н, с.н.с

### Інжекційні ефекти в кремнієвій симетричній $n^+ - n - n^+$ структурі при живленні в режимі генератора напруги

Показано, що неоднорідний розігрів кремнієвої симетричної  $n^+ - n - n^+$  мікροструктури при живленні в режимі генератора напруги призводить до формування в ній високоомної області. Проведено розрахунки поля, температури та концентрації у високоомній області структури, показано, що вона являє собою термічний градієнтно-дрейфовий домен з концентрацією носіїв заряду менше за термічно рівноважну. Досліджена динаміка формування та руйнування домену.

Ключові слова: інжекція, ТГД-домен,  $b$ -дрейф

<sup>1</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 03680, м. Київ, пр-т. Глушкова 4г, e-mail: gandziuk2009@gmail.com,

<sup>2</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 03680, м. Київ, пр-т. Глушкова 4г, e-mail: pps@univ.kiev.ua

V. I. Gandziuk<sup>1</sup>, stud.,  
O.S.Oberemok Ph.D  
S. P. Pavliuk<sup>2</sup>, Ph.D.

### Injection effects in silicon symmetric $n^+ - n - n^+$ structure in power generator mode

It was shown that non-uniform heating of silicon symmetric  $n^+ - n - n^+$  microstructure in power generator mode leads to formation of high-resistance region in it. The calculations of field, temperature and concentration in high resistance region were conducted. It was shown that region was formed by thermal gradient-drift domain with concentration of charged carriers lower than equilibrium once. The dynamics of formation and destruction of domain was investigated.

Key Words: injection, THD-domain,  $b$ -drift

<sup>1</sup> Taras Shevchenko National University of Kyiv, 03680, Kyiv, Glushkova st., 4g, e-mail: gandziuk2009@gmail.com

<sup>2</sup> Taras Shevchenko National University of Kyiv, 03680, Kyiv, Glushkova st., 4g, e-mail: pps@univ.kiev.ua

Статтю представив д.ф.-м.н., проф. Скришевський В.А.

Неоднорідний джоулів розігрів зразка з інжектуючою через контакти електронно-дірковою плазмою призводить до утворення термічного градієнтно-дрейфового (ТГД) домену [6,7]. Виникаюча ситуація характеризується тим, що при сильній контактній інжекції електронів і дірок у зразку виникає область - ТГД домен, де концентрація носіїв заряду нижче за рівноважну. В цей же час поза доменом концентрація електронів і дірок на порядок і більше перевищує рівноважну. Факт утворення домену й такий розподіл концентрації носіїв заряду були встановлені з розподілів вздовж зразка питомого опору, знятих у різні моменти дії на зразок імпульсу напруги й після його закінчення, а також з розрахунків температури різних точок зразка [6]. Можливий більш безпосередній спосіб фіксації домену. Якщо скрізь у зразку, крім області домену, концентрація носіїв заряду значно перевищує рівноважну, то із усього

зразка, за винятком цієї області, повинно виходити рекомбінаційне випромінювання, яке можна спостерігати в ІЧ діапазоні. З іншого боку після виникнення, домен є найбільш високоомною частиною зразка і тому найбільше розігрівається. При сильному розігріві домену швидкість термічної генерації в ньому електронно-діркових пар перевищує швидкість їхнього виносу, і домен руйнується. Виходячи зі сказаного, варто очікувати, що в режимах, близьких до граничного для існування домену, тобто перед його руйнуванням, з домену й прилягаючої до нього частини зразка повинно виходити інтенсивне випромінювання [8], пов'язане із електролюмінесценцією.

Експериментальні дослідження [6-8] повністю підтвердили теоретичні передбачення. Дослідження проводились на зразках германію та кремнію, з розмірами до 1 см, виготовлених з інжектуючими контактами і зі структурою

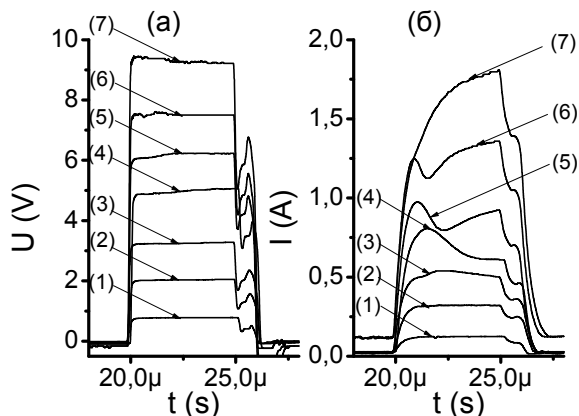


Рис.1 Осцилограми імпульсів напруги та струму

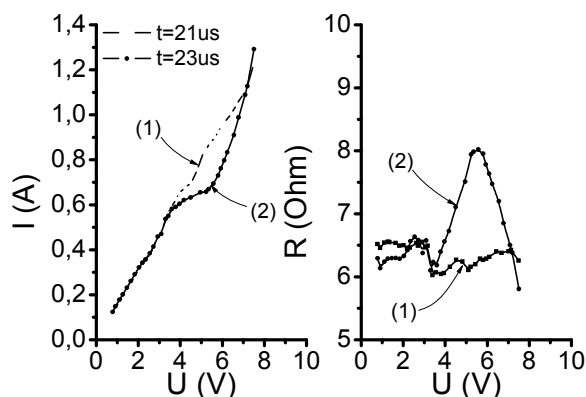


Рис.2 Вольт-амперні характеристики та залежність опору структури від амплітуди імпульсу напруги

$p^+ - n - n^+$ . В роботі [9] наведено експериментальні результати дослідження кремнієвих польових транзисторів, виготовлених за технологією «кремній на ізоляторі» (КНІ транзистори), які мали структуру  $p^+ - i - n^+$ , товщину плівки кремнію до 400 нм. На таких структурах в режимі живлення генератором струму спостерігалось виникнення високопольової області.

У зв'язку з мікромініатюризацією всіх компонентів інтегральних мікросхем (ІМС) суттєво зменшується їх розмір. Значення протікаючих струмів при цьому зберігається, що призводить до зростання їх густини. Тому дослідження симетричних структур типу  $n^+ - n - n^+$ , які є найпоширенішим типом резисторів напівпровідникових ІМС, за великої густини протікаючих струмів є актуальними і можуть бути цікавими для розробників елементів ІМС. Експериментальні результати таких досліджень при живленні структур в режимі генератора струму описано в роботі [5].

Метою даної роботи було дослідження симетричних структур типу  $n^+ - n - n^+$  резисторів із різними геометричними розмірами при живленні в режимі генератора напруги.

Залежності рухливості електронів  $\mu_n$  і дірок  $\mu_p$  від температури  $T$  часто мають різний вигляд. Наприклад, у випадку, що нас далі буде цікавити, при розсіюванні носіїв заряду на теплових коливаннях ґратки в германії, кремнії й ряді інших напівпровідників  $\mu_n \sim T^\alpha$ ,  $\mu_p \sim T^\beta$ ,  $\alpha \neq \beta$  [6]. При неоднорідному розігріві таких

напівпровідників у них виникає градієнт  $b = \mu_n / \mu_p$

$$\frac{db}{dx} = (\alpha - \beta) \frac{b}{T} \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

$x$  — координата вздовж зразка.

Неоднорідний розігрів може виникнути через джоулів розігрів зразка струмом, що протікає через нього, або може бути створений зовнішніми джерелами тепла. Якщо в зразку є електронно-діркова плазма, то градієнт  $b$  призводить до зміни концентрації електронів  $n$  і дірок,  $p$  зі швидкістю

$$B = \frac{np}{q(bn + p)^2} j \frac{db}{dx} \quad (2)$$

$q$  — заряд електрона,  $j$  — густина струму,  $n$ ,  $p$  — концентрації електронів та дірок відповідно.

Механізм цього процесу, названого *в-дрейфом* [6], пояснений у роботі [8]. Він є причиною різних сильних ефектів. Однак фізичні механізми, що лежать в основі цих ефектів, мають досить загальний характер, і тому можуть реалізуватися в електронно-дірковій плазмі й інших напівпровідниках. У цей час, щодо виявлення й дослідження цих ефектів, одним з найцікавіших матеріалів є кремній. Це зв'язано з наступною обставиною. У германії  $\alpha - \beta = 0.67$ , а в кремнії  $\alpha - \beta = -0.3$ , тому в співвідношенні (1) у них різні знаки. Це, відповідно до наведених у [6, 7] теоретичних представлень, повинно призводити до принципових відмінностей ефектів в германії та кремнії, що легко спостерігаються. Так ТГД-домен в германії утворюється при додатному градієнті

температури, а у кремнії – відповідно, при від’ємному.

### Експериментальні зразки.

Експериментальні зразки – кремнієві дифузійні резистори, виготовлені за технологією КСДІ. Це симетричні  $n^+ - n - n^+$  структури з електричними контактами із алюмінію (Al) до  $n^+$ -областей. Вони розташовані в «кишенях», що відокремлені шаром  $SiO_2$  завтовшки  $\approx 2$  мкм від підкладинки із полікремнію товщиною 300 мкм. «Кишені» мають різну глибину  $h_l$  (від 2.8 мкм до 10.5 мкм). Довжина структур 2.4 мкм, ширина 9.8 мкм. Докладно експериментальні зразки описано в роботі [5].

### Методика досліджень.

Досліджувалися осцилограми імпульсів струму та будувалися імпульсні вольт-амперні характеристики в режимі живлення генератором напруги для різних моментів імпульсу. З ВАХ структур розраховувалися залежності їх опору від амплітуди імпульсу напруги.

### Осцилограми імпульсів струму.

Осцилограми імпульсів напруги були прямокутні (рис. 1, а), і їх форма не змінювалась при зміні величини протікаючого струму (рис. 1, б). За невеликих амплітуд імпульсу напруги імпульс струму теж мав прямокутну форму (криві 1-3, рис. 1, а, б). За достатньо великих амплітуд напруги спостерігалось після досягнення струмом величини  $I_{max}$  його падіння до  $I_{min}$  (крива 5, рис. 1, б).

При подальшому збільшенні амплітуди імпульсу пік струму зміщується до початку імпульсу (крива 6, рис. 1, б). Падіння струму в кінці імпульсу змінюється на збільшення струму і руйнування зразка (крива 7, рис. 1, б).

### Вольт-амперні характеристики

Для моментів часу, коли імпульс струму досягав максимального  $I_{max}$  та мінімального  $I_{min}$  значень, будувалися вольт-амперні характеристики (рис. 2, а) і залежності опору структури від напруги (рис. 2, б).

ВАХ моменту  $I_{max}$  має лінійний вигляд (рис. 2, а, крива 1), і опір майже не змінюється в досліджуваному діапазоні напруг.

ВАХ для моменту  $I_{min}$  має нелінійну форму (рис. 2, а, крива 2). На ній є 3 ділянки: 1 – лінійна – постійне поле та опір (рис. 3). 2 ділянка – область насичення струму – поле збільшується, виникає високопольова область ТГД домену. 3 область – зникнення ТГД домену, зменшення поля та опору.

### Оцінка поля $E$

Зразок при лінійній частині ВАХ можна розділити на три частини – дві інжекційні області і середину зразка. Оцінити  $E$  можна розділивши довжину без дифузійних областей на напругу. Поле буде приблизно лінійне і до моменту виникнення ТГД домену воно досягає величини  $E = 1.27 \times 10^4$  В/см.

Після організації ТГД домену картина змінюється. Відповідно до результатів, описаних в [5], основне падіння напруги відбувається на області виникнення домену, і з цієї області спостерігається інтенсивне випромінювання, яке пов’язане з електролюмінісценцією. Розмір області випромінювання складає в середньому 1.5 мкм. Після виникнення домену поле збільшилося до  $E = 2.16 \times 10^4$  В/см. Перед зникненням домену поле досягло  $E = 3.55 \times 10^4$  В/см. Після руйнування домену поле зменшилось до величини  $E = 2.33 \times 10^4$  В/см.

### Оцінка температури

Поле в домені досягає величини, за якої відбувається насичення дрейфової швидкості носіїв заряду [3]. Відповідно до методики, яка описана в роботі [4,] можна оцінити температуру в області домену. В різні моменти існування ТГД домену вона досягає значень  $T = 1390 \div 1490$  К

### Оцінка концентрації

Знання  $E$  і  $T$  дозволило за допомогою формул

$$n = \frac{j}{q(\mu_n + \mu_p)E} = \frac{j}{q(v_{dn} + v_{dp})}$$
$$n_i = 7.54 \times 10^{15} T^{\frac{3}{2}} \exp\left[\frac{-6493}{T}\right],$$

де  $v_{dn}$  та  $v_{dp}$  - дрейфові швидкості електронів та дірок відповідно, оцінити в певних точках зразка концентрацію  $n$  та термодинамічну рівноважну концентрацію  $n_i$ . В точці максимуму поля, в області середини зразка, поле досягає  $E = 3.55 \times 10^4$  В/см. Температура оцінена за методикою [3] і в моменти  $I_{\max}$  досягає  $T \approx 1440$  К. Значення концентрації носіїв  $n = 1.45 \times 10^{17}$  см<sup>-3</sup>, а  $n_i = 4.53 \times 10^{18}$  см<sup>-3</sup>

### Обговорення отриманих результатів

Відомо, що при протіканні струму крізь зразок з контактами, які інжектують електрони та дірки, в ньому завжди встановлюється розподіл електричного поля  $E(x)$  з максимумом [3]. Саморозігрів зразка також неоднорідний. Відповідно до [4], градієнт температури може досягати  $5 \times 10^6$  К/см. Відповідно виникає градієнт  $b$  і його величина, оцінена за формулою (1), досягає величини  $-5000$  см<sup>-1</sup>. Домен, який виникає, є найбільш високоомною областю, і область максимальної температури знаходиться в

ньому. Концентрація носіїв заряду в максимумі поля менше термодинамічно-рівноважної концентрації, і в області домену носії заряду не рекомбінують, а генеруються. Зазначимо, що розігрів зразка, зменшення концентрації зарядів в максимумі поля та падіння струму відбуваються одночасно. Тому домен, що виникає в симетричній  $n^+ - n - n^+$  структурі, – ТГД домен.

### Висновки

1. Термічний розігрів КСДІ структури протікаючим струмом призводить до виникнення термічного градієнтно-дрейфового домену.
2. Термічний розігрів структури протікаючим струмом, формування домену та падіння струму відбуваються одночасно.
3. Концентрація носіїв в домені може досягати значень менших за термодинамічно-рівноважні.

### Список використаних джерел

1. *Smith R.* Semiconductors – Moscow: Mir, 1982 – 560 p. (in Russian).
2. *Zi S.* Physics of semiconductor devices – Moscow: Mir, 1 – 1984 – 454 p (in Russian)
3. *Dobrovolsky V.N., Ishchuk L.V., Ninidze G.K., Balucani M., Ferrari A., Lamedica G.* High-amplitude high-frequency oscillations of temperature, electron-hole concentration, and current in silicon-on-insulator structures // J.Appl.Phys. – 2000. – **88**, N 11. – P.6554-6559.
4. *Lampert M., Mark P.* Injection currents in solids – Moscow: Mir, 1973 (in Russian)
5. *Pavliuk S.P., Kushnirenko V.V., Ninidze G.K., Konovalenko L.D.* Investigation of silicon diffusion resistors in the flow of current pulse of high density // Technology and designing of microchips, **5** – 2005 – N 59 – P. 23-26. (in Russian)
6. *Dobrovolsky V.N., Pavliuk S.P.* Thermal gradient-drift domain in electron-hole plasma of germanium // FTS, **15** – 1981 – N 1. (in Russian)
7. *Dobrovolsky V.N., Pavliuk S.P., Romanov A.V.* Injection effects in non-uniform heated silicon // FTS, **15** – 1981 (in Russian)
8. *Dobrovolsky V.N., Pavliuk S.P., Paltsev I.E., Romanov A.V.* Light emission of electron-hole plasma, which contains thermal gradient-drift domain // FTS, **19** – 1985 – N 8. (in Russian)
9. *Dobrovolsky V.N., Ischuk L.V., Ninidze G.K., Pavljuk S.P., Plichko Y.O.* Self-organization in SOI FET // Microelectronic engineering, **72** – 2004 – P. 383-387.

Надійшла до редколегії 18.11.13