

## Механізм виникнення коливань напруги в кремнієвій структурі при протіканні екстремальних струмів

С.П. Павлюк\*, В.І. Григоруk, В.М. Телега, М.В. Петричук, А.В. Іванчук

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, пр-т. Глушкова, 4г, 03022 Київ, Україна

(Одержано 10.04.2018, опубліковано online 25.08.2018)

В роботі проведені дослідження коливань напруги, що виникають при протіканні струмів високої густини через кремнієву структуру з діелектричною ізоляцією (КСДІ-структури). Досліджувались вольт-амперні характеристики структури в імпульсному режимі, характерні параметри отриманих осцилограм коливань як релаксаційних, так і квазігармонічних. Запропонована модель виникнення коливань.

**Ключові слова:** КСДІ-структура, Екстремальний струм, Коливання напруги.

DOI: [10.21272/jnep.10\(4\).04010](https://doi.org/10.21272/jnep.10(4).04010)

PACS numbers: 73.40.Ty, 00.00.Xx

### 1. ВСТУП

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.

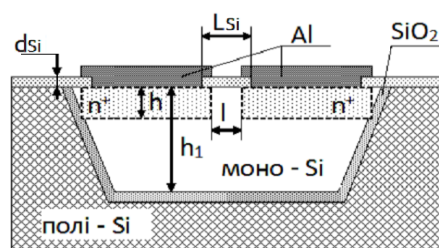
У роботах [1, 2] досліджувалось протікання струму великої густини ( $\geq 10^5$  А/см<sup>2</sup>) в кремнієвих структурах з діелектричною ізоляцією (КСДІ). В використаних структурах виконувалось співвідношення  $d_{Si} < L_{Si}$  між товщинами робочого шару кремнію  $d_{Si}$  і шару збіднення в ньому  $L_{Si}$ . Саме завдяки виконанню умови  $d_{Si} < L_{Si}$  і наявності в КНІ структурах так званого "тильного затвору" ("back gate") [3] опір робочого шару кремнію при протіканні струму ставав суттєво неоднорідним. В цих умовах в структурах спостерігались різноманітні ефекти: коливання напруги і струму, його регулярне розшарування, випромінювання світла та інше, про що йшлося в [1, 2].

Метою цієї роботи було дослідження коливань напруги, механізму їх утворення, та ефектів, що виникають в структурах з діелектричною ізоляцією" (КСДІ), якщо в них реалізоване співвідношення  $d_{Si} > L_{Si}$ .

Нижче наведені результати цих досліджень при живленні структур, з опорами більше ніж на порядок, в порівнянні з [4, 5], струмами високої густини ( $\bullet 10^6$  А/см<sup>2</sup>) від генератора струму в імпульсному режимі, що дозволило запобігти передчасному тепловому пробою структури.

### 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ЗРАЗКИ

Досліджувані зразки являють собою дифузійні резистори, що виготовлені по стандартній КСДІ технології. Ця технологія дозволяє створювати місток з монокристалічного кремнію, покритого діелектричною ізоляцією і розміщеного в матриці.



**Рис. 1** – Загальний вигляд напівпровідникової структури на основі КСДІ резистора:  $l$  – реальна довжина  $n$ -каналу;  $L_{Si}$  – відстань між краями вікон в окислі, через які проводилось йонне легування кремнію фосфором;  $h_1$  – глибина легування "кишені";  $h$  – глибина легування

Підкладка виготовлена із полікристалічного кремнію. Як показано на рис. 1, в полікристалічному кремнії знаходиться "кишеня" із  $SiO_2$ , в якій розміщений дифузійний резистор, що являє собою структуру  $n^+ - n - n^+$  з металічними контактами до  $n^+$  областей, через які здійснюється струмопідвід. Область енерговиділення являє собою ділянку напівпровідника площею  $S = 10^{-6} - 10^{-8}$  см<sup>2</sup>, яка розміщена між ділянками металізації і покрита шаром діоксиду кремнію. Основним параметром, що характеризує цю область є омичний опір структури  $R$ . Величина  $R$  для різних КСДІ структур змінювалася від сотень Ом до одиниць кОм і визначається геометрією структури: довжиною каналу  $l$  між  $n^+$  областями і глибиною кишені  $h$ .

### 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Досліджувались вольтамперні характеристики КСДІ з довжиною каналу 2 мкм.

Типова вольтамперна характеристика КСДІ структури зображена на рис. 2.

Ділянка ВАХ від 0 до  $I_1$  є класичною ВАХ польового транзистора. Спочатку вона є лінійною, а із збільшенням струму спостерігається насичення [6].

Починаючи із струмів  $I > I_1$  на ВАХ структури виникає  $S$ -подібна ділянка, на якій спостерігалися коливання напруги. Для побудови цієї ділянки викорис-

\*pps@univ.kiev.ua

тані середні значення струму  $I$  і напруги  $V$ , отримані шляхом електричного інтегрування коливань струму й напруги.

Осцилограми коливань для різних ділянок ВАХ введени на рис. 3-5.

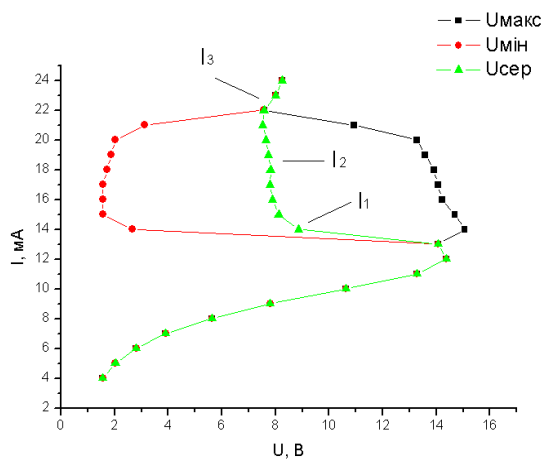


Рис. 2 – ВАХ

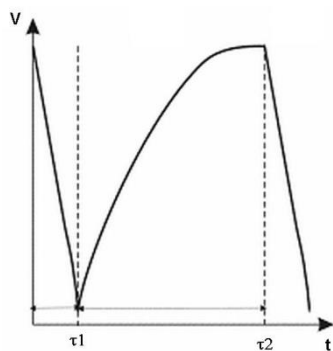


Рис. 3 – Осцилограма початку коливань

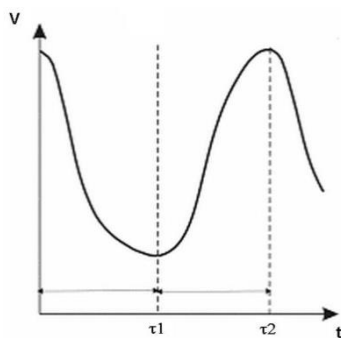


Рис. 4 – Осцилограма середини коливань

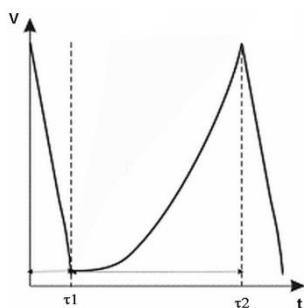


Рис. 5 – Осцилограма кінця коливань

Осцилограма 3 на рис. 3 характерна для початку коливань (ділянка  $I_1$  ВАХ), тоді як осцилограма 4 рис. 4 характерна для середини коливань (ділянка  $I_2$  ВАХ) осцилограма 5 рис. 5 характерна для кінця коливань (ділянка  $I_3$  ВАХ). Як бачимо коливання початку та кінця мали релаксаційний характер, а в середині ВАХ – квазігармонічний. З отриманої ВАХ було побудовано залежності амплітуди коливань напруги та частоти від струму генератора, які приведені на рис. 6 та рис. 7 відповідно.

Аналіз цих графіків показує, що спочатку спостерігається невелике зростання амплітуди з подальшим плавним спадом, а під кінець коливань іде різке зменшення амплітуди. При цьому відбувалося майже лінійне підвищення частоти коливань зі збільшенням струму генератора.

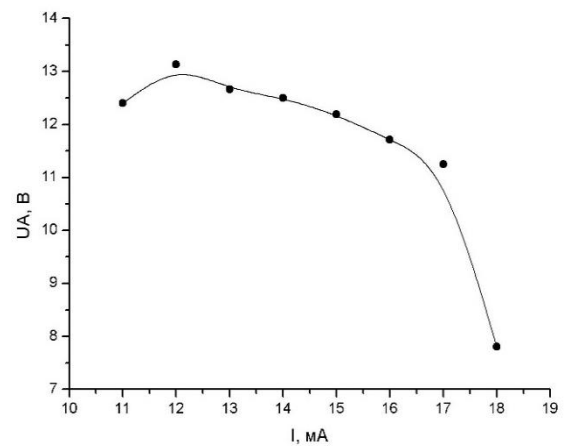


Рис. 6 – Залежність амплітуди коливань напруги від струму генератора

Аналіз цих графіків показує, що спочатку спостерігається невелике зростання амплітуди з подальшим плавним спадом, а під кінець коливань іде різке зменшення амплітуди. При цьому відбувалося майже лінійне підвищення частоти коливань зі збільшенням струму генератора.

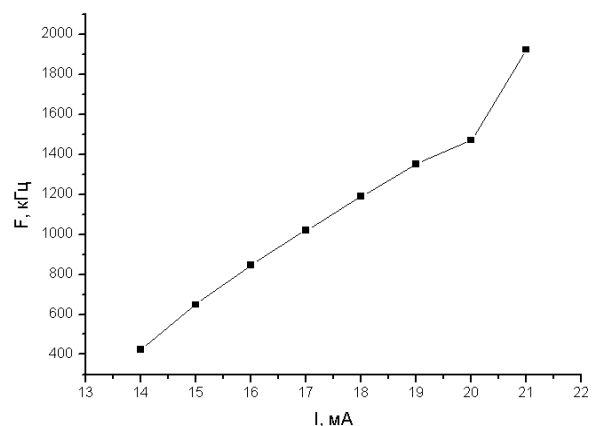


Рис. 7 – Залежність частоти коливань від струму генератора

Частота, форма й амплітуда коливань були відтворені при зміні струму  $I$  в інтервалі значень від 0 до  $I_3$ . Після перевищення значення  $I_3$  властивості структури необоротно змінювалися. Тому, всі описані нижче результати отримані за умови, що струм через

транзистор завжди був менше  $I_3$ .

При струмі  $I_1$  на структурі виникають коливання напруги релаксаційного типу (рис. 3). За час  $t_1$  напруга швидко зростає по експоненті від  $V_{\min}$ , до максимального значення  $V_{\max}$ , після чого за час  $t_2$  зменшується до вихідного значення  $V_{\min}$ . При цьому  $t_2 \ll t_1$ .

Збільшення струму від  $I_1$  до  $I_2$  супроводжувалося зменшенням  $t_1$ , збільшенням  $t_2$  і виконанням рівності  $t_1 \approx t_2$ . При цьому коливання  $V$  ставали квазігармонічними.

При подальшому зростанні струму від  $I_2$  до  $I_3$ , відбувалося перетворення коливань знову на релаксаційні, у яких виконувалася нерівність  $t_1 \gg t_2$ .

Пояснити отримані результати можна за допомогою моделі в якій періодично утворюється та зникає шнур струму.

Такий шнур струму утворюється в збідненій на носії заряду області (стоку, витоку), яка утворюється під дією двох механізмів: 1 – за рахунок запірного включення  $p$ - $p^+$  контакту, 2 – за рахунок ефекту поля.

При збільшенні струму, який протікає через структуру, збіднена область виникає біля додатного контакту і поступово розширюється в  $p^+$ -область. Таку область можна представити у вигляді конденсатора  $C$ , який заряджається струмом генератора (рис. 8). При заряді напруга на конденсаторі зростає. Виникають умови для виникнення шнура струму якщо шнур починає виникати за рахунок іонізаційного механізму, як у лавино-прольотному діоді, то конденсатор повинен зарядитися до певної напруги, яка достатня для виникнення лавини. Тоді для різних довжин структур коливання повинні початися при сталій напрузі.

Якщо працює перегрівний механізм, як у даному випадку, то виникнення шнура буде відбуватися при досягненні достатнього розігріву. Тоді коливання будуть виникати при певному струмі.

Утворення шнура струму призводить до шунтування збідненої області й розряду конденсатора. При цьому падіння напруги на структурі падає до величини, яка визначається протікаючим струмом  $I$  та опором баластної (не збідненої) частини структури.

Еквівалентна схема процесу показана на рис. 8.

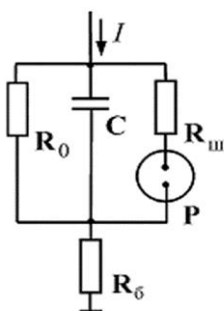


Рис. 8 – Еквівалентна схема кола:  $I$  – протікаючий струм;  $C$  – ємність обернено-зміщеного і-п переходу;  $R_0$  – опір збідненої частини структури (внутрішній опір ємності);  $R_{ш}$  – опір шнура струму;  $P$  – розрядник;  $R_б$  – опір баластної частини структури, тобто опір структури за межами високоомної області;  $R_0$  – опір генератора струму

Розряд ємності призводить до зникнення умов існування шнура струму, оскільки напруга на структурі

різко зменшується й стає недостатньою для підтримання потрібних умов (рис. 3-5). Зникнення шунтуючого каналу знову призводить до появи збідненої області з ємністю  $C$ . Ємність знову починає заряджатися струмом, який проходить через структуру, напруга на структурі знову зростає до величини  $V_{\max}$ , за час  $t_1$  (рис. 3), яка достатня для виникнення шнура струму і цикл коливань напруги повторюється.

Подальше збільшення струму призводить до зменшення часу заряду ємності  $C - t_1$  (рис. 3). Час заряду  $t_1$  визначається величинами  $C$  та сумою опорів генератора струму  $R_0$  та  $R_0 + R_б$ . Час розряду  $t_2$  визначається величиною  $C$  та опором самого шнура струму  $R_{ш}$ . Оскільки величини ємності  $C$  та опору шнура  $R_{ш}$  змінюються незначно, то час розряду  $t_2$  спочатку також майже не змінюється. Так як  $R_0 + R_б + R_б \gg R_{ш}$ , то час заряду значно більший за час розряду. На початку коливального процесу маємо виконання такої умови й форма коливань має явно виражений релаксаційний вигляд.

Зі збільшенням протікаючого струму  $I$ , поступово зменшується час заряду, а час розряду трохи збільшується і при деякому  $I$  виникає ситуація, при якій  $t_1 \approx t_2$ . При цьому коливання мають вигляд, близький до періодичних синусоїдальних коливань (рис. 4).

При досить великих протікаючих струмах канал шнура починає розігріватись. Кожен послідовний цикл коливань "пам'ятає", попередній цикл і тому шнур виникає при меншій напрузі. Амплітуда коливань у середині діапазону зменшується. Подальше збільшення струму призводить до суттєвого розігріву каналу шнура струму. Канал не встигає охолонути за період розряду ємності і час існування шнура збільшується. Шнур існує до охолодження каналу за рахунок відведення тепла в підкладку. Чим більше струм, тим довше існує шнур. Амплітуда коливань збільшується, частота їх зменшується, оскільки час заряду  $t_1$  зменшується, а час розряду – збільшується.

Форма коливань знову стає релаксаційною. Але, якщо на початку коливань напруги відношення  $t_1/t_2 \gg 1$ , то в кінці діапазону коливань це відношення стало  $t_1/t_2 \ll 1$ . Тобто змінилась скважність (фаза) коливань.

Оскільки коливання напруги виникають при досягненні якоїсь критичної напруги на збідненій області, то стає ясно, чому на самому початку процесу виникнення коливань їх частота дуже нестабільна. Величина ємності збідненої області на структурах з довжиною каналу 2-10 мкм, невелика, тому така ємність встигає невеликим струмом майже повністю зарядитися. Форма заряду ємності – майже класично експоненціальна. Досягнення напруги утворення шнура досягається довгий і не чіткий час, тому момент утворення шнура неоднозначний. Із збільшенням струму, який протікає через структуру, крутизна наростання напруги збільшується і момент досягнення напруги шнурування стає однозначним. Частота коливань при цьому стає стабільною. В кінці діапазону коливань частота стає знову нестабільною по аналогічній причині.

Якщо ємність збідненого шару велика, то форма коливань повинна змінюватись. Заряд  $C$  відбувається майже по лінійному закону, напруга шнурування досягається при крутій зміні напруги, тому частота та

амплітуда коливань у таких структурах повинні бути стабільними в усьому діапазоні коливань.

#### 4. ВИСНОВКИ

При дослідженні протікання струмів у КСДІ структурах було встановлено, що на ВАХ виникає S-подібна ділянка. В таких умовах спостерігалися коливання напрути на КСДІ структурі. Поза S-подібною ділянкою коливання не спостерігалися. Отримані результати були добре відтворені.

В залежності від величини струму, який протікає крізь КСДІ-структуру, коливання напрути мали різну форму та скважність. На початку і в кінці коливань вони мали релаксаційну форму. В середині s-подібної ділянки ВАХ вони мали квазісінусоїдальну форму. Форма коливань може бути змінена за допомогою протікаючого струму.

Запропоновано механізм виникнення коливань, який базується на моделі періодичного виникнення шнура струму.

### Механизм возникновения колебаний напряжения в кремневой структуре при протекании экстремальных токов

С.П. Павлюк, В.И. Григорук, В.Н. Телега, М.В. Петричук, А.В.Иванчук

*Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, пр-т. Глушкова, 4г, 03022, Киев, Украина*

В работе проведены исследования колебаний напряжения, которые возникают при протекании токов высокой плотности через кремневую структуру с диэлектрической изоляцией (КСДИ-структуры). Исследовались вольт-амперные характеристики структуры в импульсном режиме, характерные параметры полученных осциллограмм колебаний, как релаксационных, так и квазигармонических. Предложена модель возникновения колебаний.

**Ключевые слова:** КСДИ-структура, Экстремальный ток, Колебания напряжения.

### The Mechanism of Voltage Oscillations in a Siliceous Structure with the Occurrence of Extreme Currents

S.P. Pavlyuk, V.I. Grygoruk, V.M. Telega, M.V. Petrychuk, A.V.Ivanchuk

*Taras Shevchenko National University of Kyiv, 4g, Glushkov Ave., 03022 Kyiv, Ukraine*

In the work, studies of voltage oscillations that occur during the flow of high-density currents through a silicon structure with dielectric insulation (SSDI structure) are carried out. Volt-ampere characteristics of the structure in the pulsed mode, characteristic parameters of the oscillograms of oscillations, both relaxation and quasi-harmonic, were studied. A model of the occurrence of oscillations is proposed.

**Keywords:** SSDI structure, Extreme current, Voltage oscillations.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. V.N. Dobrovolsky, L.V. Ishchuk, G.K. Ninidze, M. Balucani, A. Ferrari, G. Lamedica, *J. Appl. Phys.* **88** No11, 6554 (2000).
2. В.М. Добровольський, Л.В. Ішчук, Г.К. Нінідзе, С.П. Павлюк, *УФЖ* **47** No5, 495 (2002) (V.M. Dobrovolsky, L.V. Ishchuk, H.K. Ninidze, S.P. Pavlyuk, *UFZh* **47** No 5, 495 (2002)) [In Ukrainian].
3. S. Cristaloveanu, S.S. Li, *Electrical Characterization of Silicon-On-Insulator Materials and Devices* (Kluwer Academic Publishers: 1995).
4. Н.А. Колобов, *Основы технологии электронных приборов* (Москва: Высшая школа: 1980) (N.A. Kolobov, *Osnovy tekhnologii elektronnykh priborov* (Moskva: Vysshaya shkola: 1980)) [In Russian].
5. Л.Д. Коноваленко, В.В. Кушніренко, Г.К. Нінідзе, С.П. Павлюк, *Вісник Київського університету, сер.: Фіз.-мат. науки* No 1, 325 (2004) (L.D. Konovalenko, V.V. Kushnirenko, H.K. Ninidze, S.P. Pavlyuk, *Visnyk Kyiv's'koho universytetu, ser.: Fiz.-mat. nauky* No 1, 325 (2004)) [In Ukrainian].
6. V.N. Dobrovolsky, L.V. Ishchuk, G.K. Ninidze, M. Balucani, A. Ferrari, *Microelectron. Eng.* **38** No1-4, 343 (1999).