

## ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПЕДАНСУ ДВОЗАТВОРНИХ МДН-СТРУКТУР ПРИ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

© Кравчук Н., Яремчук В., Тимошенко О., 2003

*Вінницький державний педагогічний університет ім. М. Коцюбинського, Вінниця, Україна*

*Наведено результати експериментальних досліджень залежності імпедансу каналу двозатворних МДН-структур з індукованим каналом від частоти змінного сигналу при температурах  $-85^{\circ}\text{C}$ ,  $-65^{\circ}\text{C}$ ,  $-45^{\circ}\text{C}$  за відсутності зміщень на затворах. Проаналізовано фізичні процеси, які встановлюють характер отриманих залежностей. Визначено критерій ефективності використання таких структур для побудови автогенераторних вимірювальних перетворювачів.*

*Приведены результаты экспериментальных исследований зависимости импеданса канала двухзатворных МДН-структур с индуцированным каналом от частоты переменного сигнала при температурах  $-85^{\circ}\text{C}$ ,  $-65^{\circ}\text{C}$ ,  $-45^{\circ}\text{C}$  при отсутствии смещений на затворах. Проанализированы физические процессы, которые определяют характер полученных зависимостей. Определен критерий эффективности использования таких структур для построения автогенераторных измерительных преобразователей.*

*In work the results of experimental researches of dependence of an impedance of the channel of twogate's MOS-structures with induced by the channel from frequency of a variable signal are given at temperatures  $-85^{\circ}\text{C}$ ,  $-65^{\circ}\text{C}$ ,  $-45^{\circ}\text{C}$  at absence of displacement on gates. The analysis of physical processes is carried spent which determine character of the received dependences. The criterion of efficiency of use of such structures for construction of auto generating measuring converters is determined.*

Електрично керовані напівпровідникові реактивні елементи широко використовують у різних галузях науки і техніки, зокрема, для побудови автогенераторних вимірювальних перетворювачів (АВП) температури. Великий інтерес становлять реактивні властивості МДН-структур, проте аналіз літературних джерел свідчить, що сьогодні характеристики МДН-транзисторів та їх основні параметри не враховують впливу температури на частотах поза граничними, не досліджено змін імпедансу таких транзисторів, зокрема при низьких температурах. У [1] наведено результати експериментальних досліджень імпедансу МДН-транзистора при температурах ( $-198$ – $0^{\circ}\text{C}$ ), але не виконано фізичного аналізу отриманих залежностей, зокрема функціональних залежностей  $R$ ,  $L$ ,  $C$  як від температури, так і від частоти.

З появою багатфункціональних МДН-структур, зокрема двозатворних, та їх застосуванням для побудови АВП виникла необхідність відповідних експериментальних досліджень та аналізу отриманих результатів.

Для цього були виконані експериментальні дослідження частотної залежності імпедансу каналу двозатворної МДН-структури з індукованим  $n$ -типу каналом при температурах  $-85^{\circ}\text{C}$ ,  $-65^{\circ}\text{C}$ ,  $-45^{\circ}\text{C}$  фазометричним методом без постійних зміщень на затворах.

На рис. 1 подано функційну залежність активної складової імпедансу від частоти. Як видно з рисунка, активна складова імпедансу із зростанням частоти зменшується і при частотах більше за  $470$  МГц стає від'ємною.

Механізм утворення від'ємного опору в напівпровідникових приладах, як показав Бонч-Бруєвич, для змінного струму, полягає в тому, що потужність, яка виділяється на споживачеві за умови  $3\pi/2 < \varphi < \pi/2$ , набуває від'ємні значення.

Якщо  $P < 0$ , відношення  $U/I$ , що має розмірність опору, менше від нуля. Отже, такому елементу формально приписують від'ємний опір, а його імпеданс може бути поданий виразом:

$$Z^- = R^- + jX^-.$$

У такому разі вважають, що прилад має динамічний від'ємний опір. Як впливає з експерименту, цей опір істотно залежить від температури (рис. 2). З підвищенням температури опір зростає (за модулем), в той час як активна складова при частоті  $200$  МГц додатна і з підвищенням температури зростає, а температурний коефіцієнт опору становить  $0,065$  Ом/ $^{\circ}\text{C}$ .

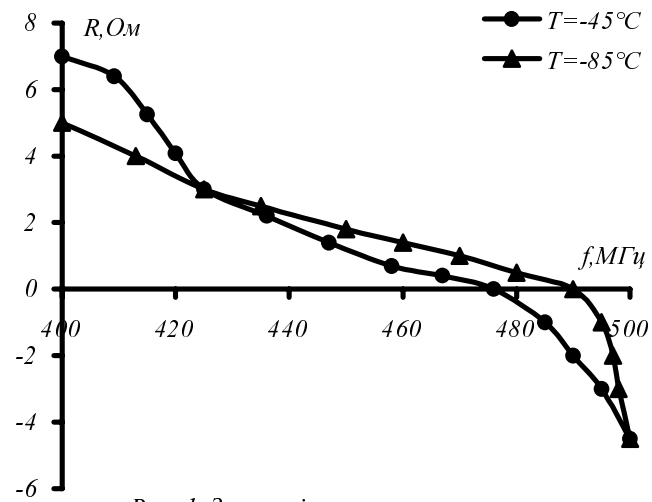


Рис. 1. Залежність активного опору імпедансу  $R$  від частоти змінного сигналу

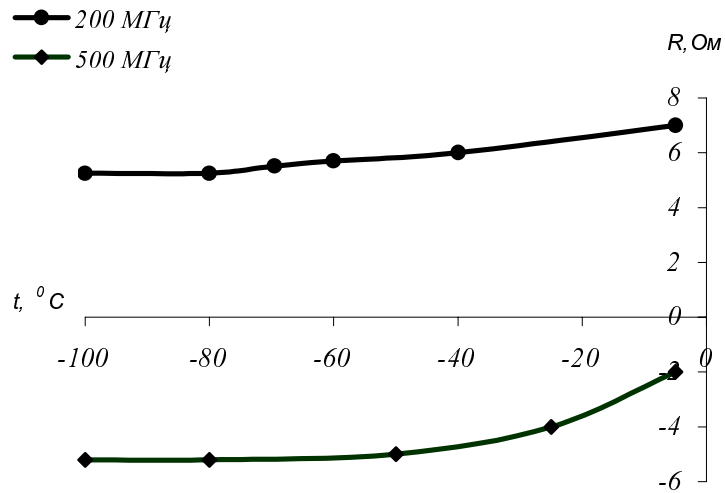


Рис. 2. Залежність активної складової імпедансу  $R$  від температури

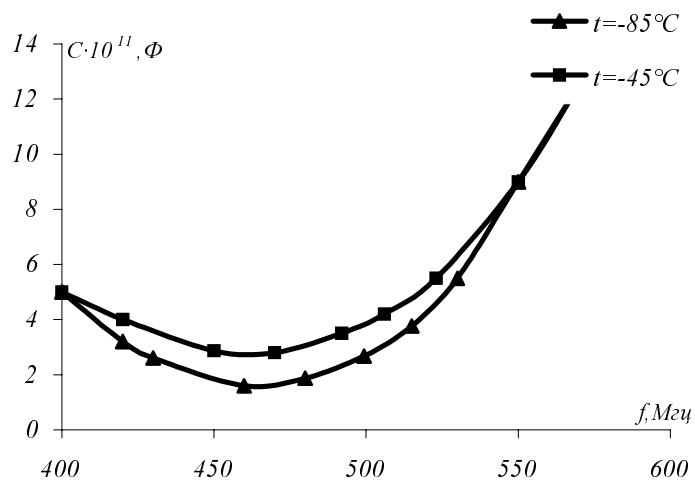


Рис. 3. Залежність ємнісної складової  $C$  імпедансу від частоти змінного сигналу

Розглядаючи реактивну складову імпедансу, необхідно врахувати умови експерименту. Оскільки дослідження велись за відсутності постійних зміщень на затворах, МДН-структуру можна розглядати як еквівалентне RC-коло [2]. Вплив температури на ємність р-п-переходів може бути оцінено через температурний коефіцієнт ємності [3]

$$TK_C = \frac{1}{2}TK_\epsilon - \frac{1}{2} \frac{\Phi_k}{\Phi_k + U_B} TK\Phi_k, \quad (1)$$

де  $TK\Phi_k = \frac{1}{\Phi_k} \cdot \frac{\alpha\Phi_k}{2T} = -\frac{1}{T} \left( \frac{\Delta W + 3kT}{e\Phi_k} - 1 \right)$ ,

де  $T$  – абсолютна температура;  $\Delta W$  – ширина забороненої зони;  $k$  – стала Больцмана;  $e$  – заряд електрона;  $\Phi_k$  – контактна різниця потенціалів.

Як відомо [4], бар'єрна ємність р-п-переходу в частотному діапазоні (100 – 1000 МГц) майже не змінюється, в той час як активна провідність істотно зростає. За відсутності постійного зміщення на р-п-переходах (у нас  $U_B = U_0 \sin(\omega t + \varphi_0)$ ) ємність р-п-переходів є функцією частоти змінного сигналу (рис. 3). Зміна частоти на 180 МГц призводить до зміни ємності на  $11 \cdot 10^{-11}$  Ф, в той час як температура майже не впливає на цю ємність. Отже, впливом температури на ємнісну складову імпедансу можна знехтувати.

Дослідження впливу температури на індуктивну складову імпедансу показало, що це пов'язано зі зміною рухливості носіїв заряду.

Відомо [5], що в області слабких полів ( $E < 3 \cdot 10^3$  В/см)  $v \sim E$ , а далі прямує до насичення. Дрейфова швидкість насичення  $v_{ns} = v_{ps} = 10^7$  см/с, причому рухливість від поля не залежить, а її значення визначають як механізмом розсіювання носіїв заряду на коливаннях ґратки, так і на іонах домішок. Для розрахунку напівпровідникових приладів використовують емпіричні залежності рухливості, одна з яких має такий вигляд [5]:

$$\mu(N_\Sigma, T) = \left[ \mu_1 + \frac{\mu_2}{1 + (N_\Sigma/N_{\mu_0})^p} \right] \left( \frac{T}{T_0} \right)^b, \quad (2)$$

де  $N_\Sigma = N_D + N_A$ ;  $T$  – абсолютна температура,  $T_0 = 300$  К, решта величин є емпіричними константами, що відповідають  $T = 300$  К, і наведені нижче:

$$\mu_1 = 65 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с}),$$

$$\mu_2 = 1265 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с}), N_{\mu_0} = 8,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3},$$

$$a = 0,72, N_\Sigma (10^{17} - 10^{20}) \text{ см}^{-3},$$

$$b = 0,356 \ln N_\Sigma - 14,9 - \text{для електронів};$$

$$\mu_1 = 47,7 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с}), \mu_2 = 447 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с}),$$

$$N_{\mu_0} = 6,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} a = 0,76,$$

$$N_\Sigma (10^{16} - 7 \cdot 10^{21}) \text{ см}^{-3},$$

$$b = 0,282 \ln N_\Sigma - 12,7 - \text{для дірок}.$$

Крім того, необхідно врахувати частотну залежність рухливості [6]

$$\mu_n = qD_n(1 + i\omega\tau_n) / kT. \quad (3)$$

Дійсно, враховуючи (2), (3), і вираз для індуктивності каналу [2]

$$L_k = \frac{32m_e Pl^2 d^2}{\mu_n qb^2 (\epsilon_d \epsilon_0)^2 U_3^4}, \quad (4)$$

можна стверджувати, що індуктивна складова імпедансу залежить як від температури, так і від частоти змінного сигналу (рис. 4, 5), що узгоджується з дослідженнями [7] індуктивної складової імпедансу в температурному інтервалі від  $-196^\circ\text{C}$  до  $+150^\circ\text{C}$ .

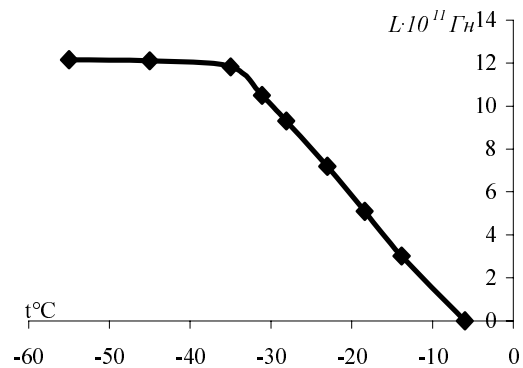


Рис. 4. Залежність індуктивної складової імпедансу  $L$  від температури при частоті змінного сигналу 650 МГц

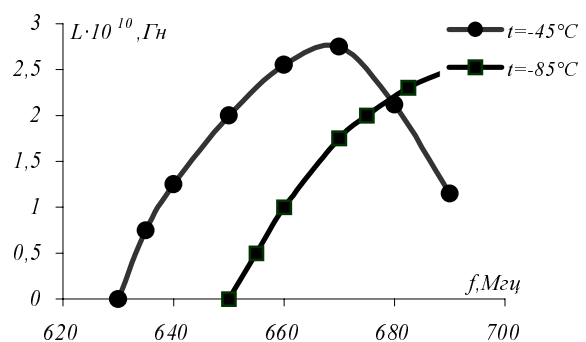


Рис. 5. Залежність індуктивної складової імпедансу від частоти змінного сигналу

Границю між областями емнісного та індуктивного характеру повного опору можна визначити з умови зіставлення концентрації основних з концентрацією неосновних носіїв заряду за напругою інверсії знака реактивності [8]

$$U = \frac{kT}{q} \cdot \ln \frac{n_n^2 + n_i^2}{n_i^2}, \quad (5)$$

де  $n_i^2 = n_n \cdot p_n$ .

У нас (тестовий сигнал  $U = U_0 \sin(\omega t + \varphi_0)$ ) малий порівняно з  $kT/q$  ефект інверсії знака реактивності буде спостерігатися на частотах  $\omega\tau \geq 1$  ( $\tau$  – час життя неосновних носіїв,  $\omega$  – частота змінного сигналу).

Згідно з нашими дослідженнями із зростанням температури точка інверсії знака реактивності настає при нижчих частотах і при зміні температури на  $40^\circ\text{C}$  точка інверсії зміщується на 20 МГц (рис. 5).

Вплив температури на індуктивну складову подано на рис. 5. Як випливає з експерименту, температурний коефіцієнт індуктивності  $TK_L = 0,5 \cdot 10^{-11}$  Гн/ $^\circ\text{C}$ .

**Висновки.** Експериментальні дослідження частотної залежності імпедансу двозатворних МДН-структур при низьких температурах показали високу чутливість їх параметрів до температури, що свідчить про можливість їх використання для побудови АВП температури.

Для проектування і масового виготовлення таких перетворювачів потрібно мати відповідну методику їх розрахунку, яка дала б змогу оцінити ефективність застосування того чи іншого типу напівпровідникових приладів як термореактивного елемента і розрахувати функцію перетворення АВП, створеного на його основі.

На нашу думку, для оцінювання ефективності елементів керування на основі реактивних транзисторів необхідно враховувати критерій [9], суть якого зводиться до оцінювання інтегральної крутості елементів перетворення. Найдоцільніше використовувати елементи, інтегральна чутливість яких більша від одиниці. Проте іноді елементи з інтегральною крутістю, меншою від одиниці, можуть бути використані для покращання характеристик пристроїв з керованою індуктивністю.

1. Осадчук В.С., Одобецький С.І., Яремчук В.Ф. *Использование реактивных свойств МДП-фототранзисторов при высокочастотном смещении* // *Электроника СВЧ. Материалы Всесоюзной конференции. Орджоникидзе, 1986.* – С.210. 2. Кравчук Н.С. *Температурні перетворювачі на основі реактивних властивостей структур метал–діелектрик–напівпровідник* : Дис... канд. техн. наук: 05.11.04. – Вінниця, 2001. 3. Карпов Ю.С., Минин В.І. *Температурная зависимость барьерной емкости кремниевых электронно-дырочных переходов* // *Известия Ленинградского электротехнического института им. В.И. Ульянова.* – Л., 1966. – Вып. 57. – Ч.1. 4. Бабенко С.Г. и др. *Экспериментальное исследование частотной зависимости импеданса p-n-перехода в широком диапазоне частот* // *Сб. Полупроводниковые приборы и их применение* / Под ред. Я.А. Федотова. – М., 1970. – Вып. 23. – С.297–304. 5. Тугов Н.М., Глебов Б.А., Чарыков Н.А. *Полупроводниковые приборы.* – М., 1990. 6. Викулин В.М., Стафеев В.И. *Физика полупроводниковых приборов.* – М., 1980. 7. Абдуллаев Г.Б. *Об индуктивности кремниевых диффузионных диодов с различной длиной базы* // *ФТП.* 1966. – Т. 3. – Вып. 5. – С. 778–781. 8. Абдуллаев Г.Б., Исхандерзаде З.А., Джафаров Э.А. *О реактивных свойствах кремниевых диффузионных p-n-переходов* // *Радиотехника и электроника.* 1965. – Т. 10. – №4. – С. 778–780. 9. Філінюк М.А., Павлов С.М., Ле Гуан Ту. *Оцінка ефективності елементів на базі транзисторних перетворювачів імпедансу* // *Вісник ВПІ.* – 1998. – №4. – С.85–90.