

УДК 538.956

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.1.300025>

ЕЛЕКТРИЧНЕ ПЕРЕМИКАННЯ В СКЛОКЕРАМІЧНИХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВІ ДІОКСИДУ ВАНАДІЮ

В. Р. Колбунов, М. П. Трубіцин, А. О. Дяченко

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
пр. Науки, 72, Дніпро, 49010, Україна, kolbunov_vadim@i.ua

ЕЛЕКТРИЧНЕ ПЕРЕМИКАННЯ В СКЛОКЕРАМІЧНИХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВІ ДІОКСИДУ ВАНАДІЮ

В. Р. Колбунов, М. П. Трубіцин, А. О. Дяченко

Анотація. В роботі вивчено зміни електричного струму під час перемикання зразків склокераміки на основі діоксиду ванадію зі стану з великим опором (off-state) у стан із малим опором (on-state) і зворотно. Затримка переходу з off-state в on-state, при застосуванні до зразка склокераміки перемикаючої напруги U_0 , пов'язана з часом t_{don} , необхідним для його розігріву до температури фазового переходу метал-напівпровідник у VO_2 . Час затримки t_{don} зменшується зі зростанням U_0 . Встановлено, що затримку зворотного переходу з on-state в off-state контролює шнур струму, в межах якого кристаліти VO_2 склокераміки перебувають у металевій фазі. Час затримки t_{doff} цього переходу визначає час, упродовж якого в зразку VO_2 -склокераміки існує шнур струму після вимкнення напруги U_0 . Величина t_{doff} зростає при збільшенні U_0 .

Ключові слова: склокераміка, VO_2 , електричне перемикання

ELECTRICAL SWITCHING IN GLASS-CERAMIC STRUCTURES BASED ON VANADIUM DIOXIDE

V. R. Kolbunov, M. P. Trubitsyn, A. O. Diachenko

Abstract. The changes in electric current during the switching of vanadium dioxide-based glass-ceramic samples from the off-state to the on-state and vice versa were studied in this paper. The delay in the transition from the off-state to the on-state when a switching voltage U_0 is applied to the glass-ceramic sample is related to the time t_{don} required to heat it to the metal-semiconductor phase transition temperature in VO_2 . The delay time t_{don} decreases with increasing U_0 . It was found that the delay of the reverse transition from on-state to off-state is controlled by the current cord within which the VO_2 crystallites of the glass-ceramics are in the metal phase. The delay time t_{doff} of this transition determines the time during which the current cord exists in the VO_2 glass-ceramic sample after the voltage U_0 is switched off. The value of t_{doff} increases as U_0 increases.

Keywords: glass-ceramic, VO_2 , electric switching

Вступ

Науковий і практичний інтерес до діоксиду ванадію VO_2 та матеріалам на його основі зумовлений фазовим переходом метал-напівпровідник (ФПМН), який спостерігається у VO_2 при температурі $T_t = 68^\circ\text{C}$ [1–3]. Склокерамічні матеріали на основі VO_2 та ванадій-фосфатного скла (ВФС) демонструють стрибкоподібну зміну електропровідності (~2–3 порядки) в межах температури T_t та мають вольт-амперні характеристики S-типу з пороговим перемиканням [4]. Такі склокераміки можуть бути використані як матеріал для критичних терморезисторів та порогових перемикачів з робочим струмом до 10 А. Це вигідно відрізняє склокераміку на основі VO_2 від плівок VO_2 , які мають робочий струм не більше 100 мА [5, 6] та оксидних стекол з робочим струмом не більше 1 А [7, 8].

Найважливішу роль у функціонуванні критичних терморезисторів відіграє кінетика струму через них при перемиканні з високоомного стану в низькоомний і зворотно. Слід зауважити, що тривалість переходу з високоомного (off-state) у низькоомний (on-state) стан визначалася в ряді робіт [8–12], а даних про тривалість зворотного переходу після проходження імпульсу напруги вкрай мало [13].

Метою цієї роботи є експериментальне дослідження процесу електричного перемикання зразків склокераміки на основі діоксиду ванадію та аналіз отриманих результатів у рамках моделі «критичної температури».

Зразки та деталі експерименту

Дослідження проводились на зразках склокераміки, які мали склад $\text{VO}_2\text{-SnO}_2\text{-Cu-ВФС}$. Ці зразки мали форму дисків з діаметром основи 10 мм і висотою біля 2 мм. Як електродний матеріал використовували індій-галієву евтектику. У таблиці 1 наведено значення основних параметрів зразків склокераміки.

Дослідження виконували на установці, схема якої показана на рис. 1. Резистор R_0 з опором 20 Ом обмежував струм через зразок склокераміки R_t після його перемикання в низькоомний стан (on-state). Струм через зразок визначали за падінням напруги на прецизійному

резисторі R_c з опором $0,104 \pm 0,001$ Ом. Напруги вимірювали з відносною похибкою $\pm 1\%$.

Табл. 1

Основні електрофізичні параметри досліджуваних зразків

Опір при температурі 25°C (R_0), Ом	146
Опір при температурі 100°C (R_{on}), Ом	0,58
Напруга порогового перемикання U_{Son} , В	5,5
Струм порогового перемикання I_{Son} , мА	70
Струм порогового перемикання I_{Soff} , мА	11
Теплова стала часу τ_p , с	40

В якості джерела постійної напруги ДН1 та ДН2 (рис. 1) використовували стабілізовані регульовані джерела напруги типу ТЕС 14 НТР 30.5. Вимірювання виконували за температури 25°C після встановлення термодинамічної рівноваги зразка склокераміки з навколишнім середовищем.

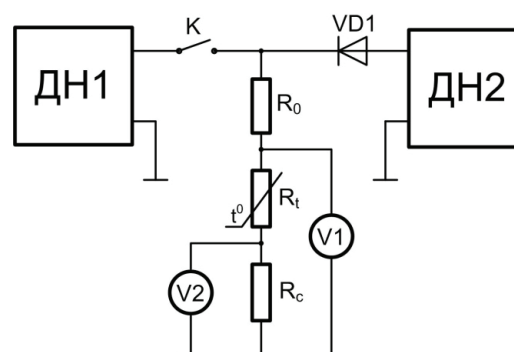


Рис. 1. Схема установки для дослідження електричного перемикання в зразках склокераміки на основі діоксиду ванадію.

Для перемикання терморезистора з високоомного стану в низькоомний на нього подавалася постійна напруга U_0 з ДН1. Після розмикання ключа К на зразок подавали напругу $U_{01} = 1$ В з ДН2. Така методика давала змогу реєструвати кінетику електричного струму, що протікає через досліджуваний зразок склокераміки, після зняття перемикальної напруги U_0 .

Експериментальні результати та їх обговорення

Затримка ввімкнення склокераміки на основі діоксиду ванадію

На рис. 2б показано типову зміну значення струму, що протікає через зразок склокераміки на основі VO_2 , із часом при подаванні та знятті напруги перемикавання U_0 (рис. 2а).

Доцільно розглянути окремо процес перемикавання зразка VO_2 -склокераміки в стан on-state і зворотно в off-state.

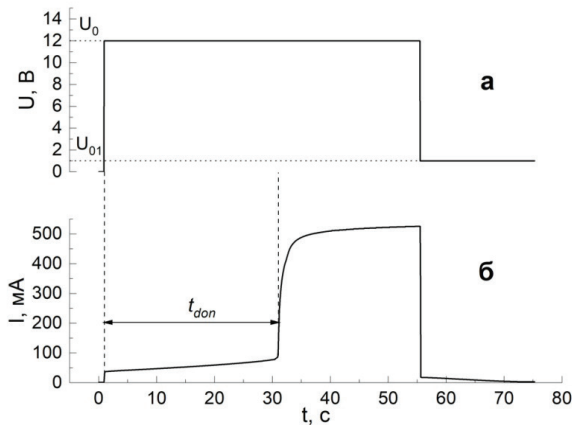


Рис. 2. Кінетика струму через зразок VO_2 -склокераміки (б) після подачі та зняття перемикальної напруги U_0 (а).

Як видно, після подачі постійної напруги U_0 , на початку, за рахунок розігріву зразка, струм через нього повільно зростає (рис. 2б). У цьому інтервалі часу кристаліти VO_2 -склокераміки перебувають у напівпровідниковій фазі, і опір склокераміки змінюється з температурою так само, як для напівпровідникових терморезисторів з негативним температурним коефіцієнтом опору [14]. Через інтервал часу t_{don} від початку процесу зразок нагрівається до температури ФПМН $T_t \approx 70^\circ\text{C}$ і перемикається в стан із низьким електричним опором (on-state). Відбувається різке збільшення електричного струму. У зразку склокераміки формується шнур струму, у межах якого кристаліти VO_2 перебувають у провідній металевій фазі [15]. Через деякий час діаметр шнуру струму досягає рівноважного значення, що визначається термодинамічною рівновагою з навколишнім середовищем. Тому струм I зразка склокераміки перестає змінюватися (рис. 2б).

Таким чином, для розігрівання зразка електричним струмом до температури T_t , за якої відбувається перемикавання в стан із низь-

ким опором, потрібен деякий час t_{don} . Цей час визначає затримку перемикавання критичних терморезисторів і порогових перемикачів на основі матеріалів із фазовим переходом метал-напівпровідник. Значення t_{don} можна знайти за часовими залежностями струму (рис. 2б). Для цього треба врахувати, що перемикавання починається, коли опір зразка склокераміки досягає величини $R_s = U_{Son}/I_{Son}$, який визначається пороговими значеннями струму I_{Son} і напруги U_{Son} (табл. 1). Значення I_{Son} і U_{Son} для досліджуваних зразків знаходили за пороговою точкою вольт-амперної характеристики, у якій температура зразка досягає значення T_t . Для напруги $U = U_d$ (рис. 2б), з якої починається порогове перемикавання, з урахуванням схеми, показаної на рис. 1, нехтуючи малим опором R_c , нескладно отримати таке співвідношення:

$$U_d = U_0 R_s / (R_s + R_0), \quad (1)$$

яке в нормалізованому вигляді можна записати як

$$U_d/U_0 = 1/(1 + R_0/R_s). \quad (2)$$

Співвідношення (2) визначає рівень, що дає змогу знайти за часовими залежностями відносного падіння напруги на зразку склокераміки U_t/U_0 час затримки перемикавання t_{don} при будь-якому значенні ступені напруги U_0 . На рис. 3 показано такі часові залежності, зареєстровані за різних значень напруги U_0 . Рівень, який визначається співвідношенням (2), показано на рис. 3 пунктирною лінією. Він розрахований для $R_0 = 20 \text{ Ом}$ і значення опору R_s , яке відповідно до параметрів U_{Son} , I_{Son} , представлених у табл. 1, дорівнює $84,6 \text{ Ом}$.

На рис. 3 абсциси точок перетину пунктирної лінії з кінетичними кривими визначають значення часу затримки перемикавання зразка VO_2 -склокераміки t_{don} за різних значень напруги U_0 .

Кінетика відносного падіння напруги U/U_0 для зразків склокераміки була досліджена за різних значень напруги U_0 для визначення залежності тривалості затримки перемикавання t_{don} від напруги. Зазначена залежність прослідковується на рис. 4, де наведено відносні значення часу затримки перемикавання

t_d/τ_p , а кружки відповідають експериментальним даним. Тут як τ_p позначено теплову сталу часу зразка (табл. 1).

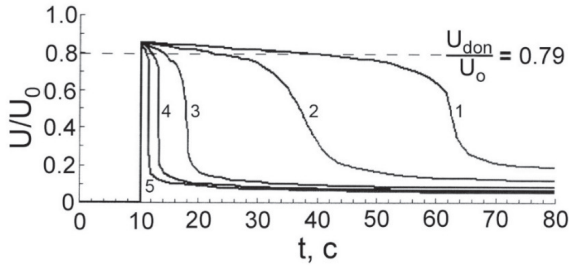


Рис. 3. Відносне падіння напруги на зразку склокераміки на основі діоксиду ванадію як функція часу при значеннях U_0 , В: 1–8, 2–10, 3–15, 4–20, 5–25.

Як видно, зі зростанням U_0 час затримки монотонно зменшується. Коли падіння напруги на зразку склокераміки наближається до порогової напруги $U_S \sim 5,5$ В, час затримки різко зростає, прямуючи до нескінченності. Це узгоджується з тим, що за напруг, менших за U_S , зразок не може бути перемкнутим у стан із низьким опором.

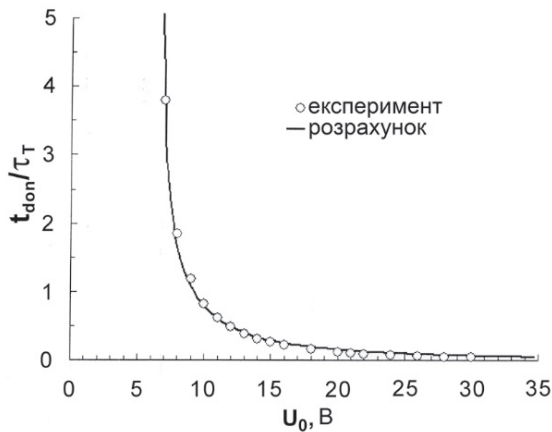


Рис. 4. Експериментальна та розрахункова залежності нормованого часу затримки перемикання зразка склокераміки на основі діоксиду ванадію.

Для визначення зв'язку між часом затримки перемикання t_{don} і напругою U_0 скористаємося моделлю «критичної температури» [1]. Запишемо рівняння теплового балансу зразка склокераміки на основі діоксиду ванадію, увімкненого в коло, як представлено на рис. 1:

$$C_T \frac{dT}{dt} + k(T - Q) = \frac{U_0^2 R_T}{(R_0 + R_T)^2}, \quad (3)$$

де C_T , T , k – теплоємність, температура і коефіцієнт теплового розсіювання зразка, відповідно; t – час; Q – температура навколишнього середовища.

Рівняння (3) не враховує розподілу температури в об'ємі зразка і навколишньому середовищі. Однак таке наближення досить добре виправдовується на практиці під час аналізу електричних кіл із терморезисторами [14].

Нижче температури ФПМН T_i залежність опору зразка склокераміки від температури описується формулою:

$$R_T = R_\infty \exp\left(\frac{\Delta E}{k_B T}\right),$$

де ΔE – енергія активації електропровідності; R_∞ – опір зразка при $T \rightarrow \infty$; k_B – стала Больцмана. Якщо R_Q – опір зразка за температури навколишнього середовища Q , а $\Delta T = T - Q$, то залежність опору зразка склокераміки від температури можна представити у вигляді:

$$R_T = R_Q \exp\left(-\frac{\Delta E \Delta T}{k_B Q(Q + \Delta T)}\right). \quad (4)$$

Коефіцієнт теплового розсіювання k , що входить до рівняння (3), виразимо через порогову напругу U_{Son} і опір R_S зразка VO_2 -склокераміки з огляду на те, що в пороговій точці вольт-амперної характеристики баланс потужності, що виділяється та розсіюється, у статичному режимі визначається співвідношенням $k(T_i - Q) = U_{Son}^2/R_S$. З цього співвідношення випливає:

$$k = U_{Son}^2/(R_S \Delta T_i), \quad (5)$$

де $\Delta T_i = (T_i - Q)$.

Час затримки перемикання зразка t_{don} визначається часом, необхідним для його розігріву від температури довкілля Q до «критичної температури», за якої відбувається перемикання зразка склокераміки в стан on-state. Такою «критичною температурою» є температура фазового переходу метал-напівпровідник T_i в діоксиді ванадію. Тому, виконавши інтегрування (3) в інтервалі $0 \leq \Delta T \leq \Delta T_i$, з урахуван-

ням співвідношення (5) та $T = Q + \Delta T$, для відносної величини часу затримки перемикавання t_d/τ_T отримаємо такий вираз:

$$\frac{t_{don}}{\tau_T} = \int_0^{\Delta T_t} \frac{d\Delta T}{\left(\frac{U_0}{U_S}\right)^2 \frac{R_T R_S \Delta T_t}{(R_0 + R_T)^2} - \Delta T}, \quad (6)$$

де теплова постійна часу склокераміки дорівнює $\tau_T = C_T/k$ [7].

Вираз (6) визначає зв'язок між відносним часом затримки перемикавання зразка склокераміки на основі VO_2 і постійною напругою U_0 , прикладеною до зразка в момент часу, починаючи з якого відраховується час затримки.

Результати розрахунку для дослідженого в роботі зразка склокераміки (параметри в табл. 1), виконані в діапазоні напруги $7 \text{ В} \leq U_0 \leq 35 \text{ В}$ з кроком $0,1 \text{ В}$ при $Q = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $R_0 = 20 \text{ Ом}$ і кроку інтегрування $0,01 \text{ град}$, представлені на рис. 4 суцільною лінією. Ці результати дають змогу знайти напругу $U_0 = 9 \text{ В}$, за якої час затримки перемикавання зразка збігається з його тепловою постійною часу τ_T ($t_{don}/\tau_T = 1$). За часовою залежністю відносного падіння напруги на зразку склокераміки, зареєстрованою за $U_0 = 9 \text{ В}$, знайдено значення теплової постійної часу $\tau_T = 40 \text{ с}$, до якої нормовано експериментальні значення t_{don} , представлені кружками на рис. 4. Як видно, має місце хороша відповідність між результатами розрахунку й експерименту, що підтверджує застосовність моделі «критичної температури» для опису кінетики перемикавання зразків діоксиднованадієвої склокераміки.

Вимкнення склокераміки на основі діоксиду ванадію

Як видно на рис. 2, протягом деякого часу після зняття перемикальної напруги U_0 і подачі на зразок малої опорної напруги U_{01} спостерігається спад струму. Така поведінка свідчить, що шнур струму з кристалітами VO_2 у металевій фазі зберігається протягом деякого часу після вимкнення перемикальної напруги. Отже, має місце затримка вимкнення t_{doff} зразків VO_2 -склокераміки, яка пов'язана з переходом зі стану з малим опором (on-state) у стан з великим опором (off-state).

На рис. 5 показано часові залежності струму через зразок VO_2 -склокераміки, зареєстровані за різних значень перемикальної напруги U_0 , починаючи з моменту її зняття (початковий момент часу відповідає задньому фронту прямокутного імпульсу на рис. 2а). Зменшення струму зразка з часом пов'язане з його охолодженням від температури в момент вимкнення напруги U_0 до температури навколишнього середовища Q . На початковій стадії у зразку існує шнур струму з кристалітами VO_2 в провідній металевій фазі. За досить великих напруг U_0 , коли шнур струму має досить великий поперечний переріз, зразок склокераміки має малий опір R_t . Тому, оскільки $R_t \ll R_0$, його струм у схемі на рис. 1 повністю контролює обмежувальний резистор R_0 . Це пояснює наявність ділянки зі слабкою залежністю струму від часу на початковій стадії кінетичного процесу (рис. 5, region 1). Як видно на рис. 5, довжина цієї ділянки збільшується зі зростанням напруги U_0 . Причиною такої поведінки є те, що при збільшенні U_0 шнур струму розширюється в поперечному напрямку. Це веде до збільшення кількості кристалітів VO_2 у металевій фазі. Тому потрібен більший час для розсіювання теплоти ФПМН, що виділяється під час переходу кристалітів VO_2 з металеві фазу в напівпровідникову фазу.

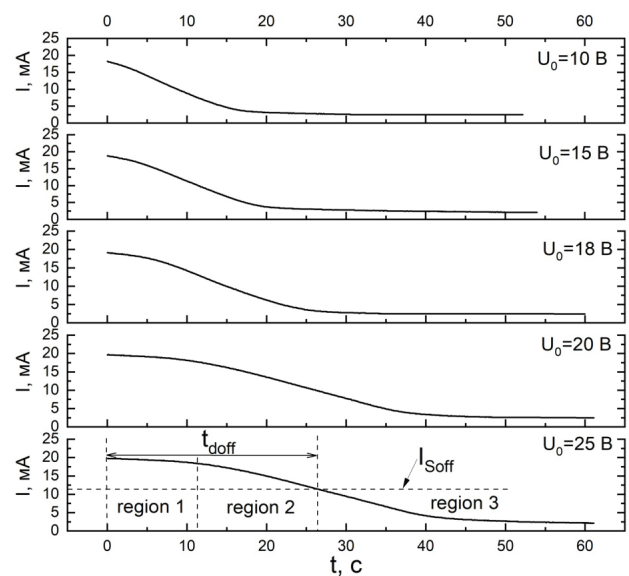


Рис. 5. Кінетика струму під час вимкнення зразка VO_2 -склокераміки за різних величин напруги перемикавання U_0

У процесі переходу кристалітів VO_2 з металеві фази в напівпровідникову фазу поперечні розміри шнура струму зменшуються, що веде до збільшення опору зразка VO_2 склокераміки. Це є причиною зменшення струму з часом (рис. 5, region 2). Тому за струмів, менших за I_{soff} у зразку VO_2 склокераміки шнур струму відсутній, і подальше зменшення струму зумовлене зменшенням температури зразка, в якому всі кристаліти VO_2 перебувають у напівпровідниковій фазі (рис. 5, region 3).

Таким чином, час t_{doff} , що визначає затримку перемикання зразків VO_2 -склокераміки та критичних терморезисторів на основі такої кераміки з on-state в off-state, можна знайти з даних, представлених на рис. 5, використовуючи рівень струму $I_{\text{soff}} = 11$ мА (див. таблицю 1). На рис. 6 представлено залежність часу затримки перемикання зразків VO_2 -склокераміки з on-state в off-state від величини перемикальної напруги U_0 . Час затримки t_{doff} на відміну від часу затримки t_{don} (рис. 2), зростає при збільшенні напруги U_0 . Таким чином, має місце протилежний характер залежностей від напруги U_0 часів затримки перемикання зразків VO_2 -склокераміки зі стану з високим опором у стан з низьким опором і навпаки.

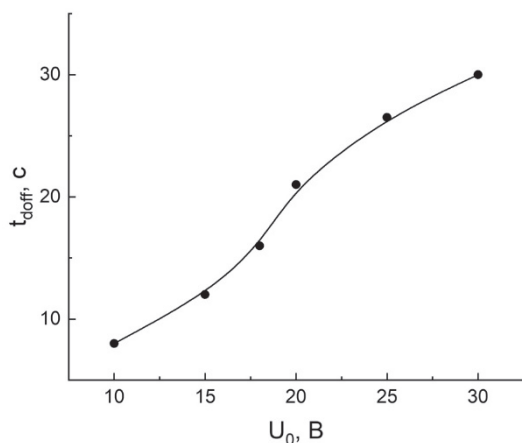


Рис. 6. Залежність часу затримки t_{doff} зразків VO_2 -склокераміки від напруги перемикання U_0

Слід зауважити, що після зняття напруги U_0 струм через зразок практично моментально падає більш ніж на порядок (див. рис. 2б), а після цього протікають релаксаційні проце-

си, описані вище. Тому кінетика перемикання склокераміки на основі діоксиду ванадію в off-state стан має значно менший вплив на її практичне застосування, ніж кінетика перемикання в on-state стан.

Висновки

Вивчено кінетику перемикання зразків склокераміки на основі VO_2 зі стану з великим опором (off-state) у стан із малим опором (on-state) і навпаки. Встановлено, що затримка переходу з off-state в on-state, при застосуванні до зразка перемикаючої напруги U_0 , пов'язана з часом його розігріву до температури фазового переходу метал-напівпровідник у VO_2 . Час затримки такого переходу t_{don} зменшується зі зростанням U_0 . Показано, що розрахована залежність t_{don} від напруги U_0 , отримана з використанням спрощеного рівняння теплового балансу зразка і моделі «критичної температури», перебуває в хорошій відповідності з експериментальними даними. Встановлено, що затримку зворотного переходу з on-state в off-state контролює шнур струму, в межах якого кристаліти VO_2 склокераміки перебувають у металевій фазі. Час затримки t_{doff} цього переходу визначається часом існування шнура струму після вимкнення напруги U_0 , яка перевела зразок VO_2 -склокераміки в on-state. Величина затримки t_{doff} зростає при збільшенні U_0 . Причиною такої поведінки є розширення шнура струму зі зростанням U_0 . Як наслідок, збільшується кількість кристалітів VO_2 у металевій фазі. Тому t_{doff} зростає за рахунок збільшення часу, необхідного для розсіювання теплоти, що виділяється під час переходу кристалітів VO_2 з металеві фази в напівпровідникову фазу.

Список використаної літератури

- [1]. W. Bruckner, H. Opperman, W. Reihelt, J. I. Terukow, F. A. Tschudnowski, E. Wolf. Vanadiumoxide: Darstellung, Eigenschaften, Anwendung. Akademie-Verlag, Berlin. 252 s. (1983).
- [2]. X. Gao, C. M. M. Rosário; H. Hilgenkamp. Multi-level operation in VO_2 -based resistive switching devices // AIP Advances, **12**, p. 015218 (2022).

- [3]. K. Liu, S. Lee, S. Yang, O. Delaire, J. Wu. Recent progresses on physics and applications of vanadium dioxide // *Materials Today*, **21(8)**, pp. 875–896 (2018).
- [4]. V. R. Kolbunov, A. I. Ivon, I. M. Chernenko. Conductivity of VO₂-based ceramics // *J. Mater. Sci: Mater. Electron.*, **17(1)**, pp. 57–62 (2006).
- [5]. Z. A. Umar, R. Ahmed, H. Asghar, U. Liaqat, A. Fayyaz. VO₂ thin film based highly responsive and fast VIS/IR photodetector // *Materials Chemistry and Physics*, **290(15)**, p. 126655 (2022).
- [6]. H. Zhang, Zh. Wu, C. Wang, Y. Sun. VO₂ film with small hysteresis width and low transition temperature // *Vacuum*, **170**, p. 108971 (2019).
- [7]. A. Pergament, G. Stefanovich, V. Malinenko, A. Velichko. Electrical switching in thin film structures based on transition metal oxides // *Adv. Condens. Matter Phys.*, **26**, p. 654840 (2015).
- [8]. D. Li, A. A. Sharma, D. K. Gala et al. Joule heating-induced metal-insulator transition in epitaxial VO₂/TiO₂ devices // *ACS Applied Materials & Interfaces*, **8**, pp. 12908–12914 (2016).
- [9]. B. Walls, O. Murtagh, S. I. Bozhko et al. VO_x phase mixture of reduced single crystalline V₂O₅: VO₂ resistive switching // *Materials*, **15(21)**, p. 7652 (2022).
- [10]. G. M. Liao, S. Chen, L. L. Fan et al. Dynamically tracking the joule heating effect on the voltage induced metal-insulator transition in VO₂ crystal film // *AIP Advances*, **6**, p. 045014 (2016).
- [11]. E. Janod, J. Tranchant, B. Corraze, et al. Resistive switching in mott insulators and correlated systems // *Adv. Funct. Mater.*, **25**, p. 6287 (2015).
- [12]. A. Rana, C. Li, G. Koster et al. Resistive switching studies in VO₂ thin films // *Sci. Rep.* **10**, p. 3293 (2020).
- [13]. I. P. Radu, B. Govoreanu, S. Mertens et al. Switching mechanism in two-terminal vanadium dioxide devices // *Nanotechnology*, **26**, p. 165202 (2015).
- [14]. J. Fraden. Handbook of Modern Sensors. Physics, Designs and Applications. Springer International Publishing, Switzerland. 663 p. (2016).
- [15]. A. I. Ivon, I. M. Chernenko, V. R. Kolbunov et al. The size effect in current-voltage characteristic of VO₂-based ceramics in the on-state // *J. Mater. Sci: Mater Electron.*, **18**, pp. 1009–1012 (2007).

Стаття надійшла до редакції 16.03.2024 р.

UDC538.956

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.1.300025>

ELECTRICAL SWITCHING IN GLASS-CERAMIC STRUCTURES BASED ON VANADIUM DIOXIDE

V. R. Kolbunov, M. P. Trubitsyn, A. O. Diachenko

Oles Honchar Dnipro National University
72 Nauky av., Dnipro, 49010, Ukraine, kolbunov_vadim@i.ua

Summary

The current kinetics during the switching of VO₂ glass-ceramic samples from the high resistance state (off-state) to the low resistance state (on-state) and vice versa has been studied. The delay of the transition from the off-state to the on-state, when the switching voltage U_0 is applied to the glass-ceramic sample, is related to the time t_{don} required for it to heat up to the temperature of the metal-semiconductor phase transition in VO₂. The delay time t_{don} decreases with increasing U_0 . It is shown that the calculated dependence of t_{don} on the voltage U_0 is in good agreement with the experimental

data. It is found that the delay of the reverse transition from the on-state to the off-state is controlled by the current cord within which the VO₂ crystallites of the glass-ceramics are in the metallic phase. The delay time t_{doff} of this transition determines the time during which the current cord is present in the VO₂ glass-ceramic sample after the voltage U_0 is switched off. The value of t_{doff} increases as U_0 increases. The reason for this behaviour is the expansion of the current cord as U_0 increases. As a result, the number of VO₂ crystallites in the metallic phase increases. Therefore, t_{doff} increases due to the increase in the time required to dissipate the heat released during the transition of the VO₂ crystallites from the metallic phase to the semiconductor phase.

Keywords: glass-ceramic, VO₂, electric switching

УДК 538.956

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.1.300025>

ЕЛЕКТРИЧНЕ ПЕРЕМИКАННЯ В СКЛОКЕРАМІЧНИХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВІ ДІОКСИДУ ВАНАДІЮ

В. Р. Колбунов, М. П. Трубіцин, А. О. Дяченко

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
пр. Науки, 72, Дніпро, 49010, Україна, kolbunov_vadim@i.ua

Реферат

Метою цієї роботи було вивчення зміни струму під час перемикання зразків VO₂-склокераміки зі стану з високим опором (off-state) у стан із низьким опором (on-state) і зворотно. Затримка переходу з off-state в on-state, при застосуванні до зразка склокераміки перемикаючої напруги U_0 , пов'язана з часом t_{don} , необхідним для його розігріву до температури фазового переходу метал-напівпровідник у VO₂. Час затримки t_{don} зменшується зі зростанням U_0 . Показано, що розрахункова залежність t_{don} від напруги U_0 , перебуває в хорошій відповідності з експериментальними даними. Встановлено, що затримку зворотного переходу з on-state в off-state контролює шнур струму, в межах якого кристаліти VO₂ склокераміки перебувають у металевій фазі. Час затримки t_{doff} цього переходу визначає час, упродовж якого в зразку VO₂ склокераміки існує шнур струму, після вимкнення напруги U_0 . Величина t_{doff} зростає при збільшенні U_0 . Причиною такої поведінки є розширення шнура струму зі зростанням U_0 . Як наслідок, збільшується кількість кристалітів VO₂ у металевій фазі. Тому t_{doff} зростає за рахунок збільшення часу, необхідного для розсіювання теплоти, що виділяється під час переходу кристалітів VO₂ з металевієї фази в напівпровідникову фазу.

Ключові слова: склокераміка, VO₂, електричне перемикання