

УДК 536.48+621.35

doi:10.20998/2413-4295.2021.03.12

РЕЗИСТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ ТОЧКОВИХ КОНТАКТІВ ЯНСОНА В УМОВАХ ІНВЕРСІЇ ПОЛЯРИЗАЦІЇ

**О. П. ПОСПЕЛОВ^{1*}, Г. В. КАМАРЧУК², М. Д. САХНЕНКО¹, А. В. САВИЦЬКИЙ²,
В. О. ПРОСКУРИНА¹, С. І. ЗЮБАНОВА¹**

¹ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА

² Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАНУ, Харків, УКРАЇНА

*e-mail: apetrovych@gmail.com

АНОТАЦІЯ Чутливим елементом квантового сенсора нового покоління є дендритний точковий контакт Янсона. Аналіти, які знаходяться в просторі, що оточує чутливий елемент, здатні взаємодіяти зі свіжоутвореною поверхнею каналу провідності квантового точкового контакту Янсона, а також з верхівкою дендриту в процесі його росту. Така взаємодія забезпечує вплив досліджуваних речовин на конфігурацію вихідної характеристики сенсора, якою є гістограма провідності системи. Гістограма провідності будується на основі хронорезистограми автоколивального процесу точково-контактної комутації, яка безпосередньо реєструється в умовах автоколивань. У структурі сенсорного елемента дендритний точковий контакт Янсона, занурено в електроліт і в електричному полі формує хронорезистограму, характер якої залежить від складу оточуючого середовища. В роботі розглянуто один з аспектів механізму формування таких хронорезистограм. Проаналізовано особливості функціонування безцілинної електрохімічної системи в процесі автоколивального ефекту точково-контактної комутації. Моделювання чутливого елемента у вигляді безцілинної електродної системи дозволило пояснити механізм і динаміку переходу «точковий контакт Янсона – дендрит та протиелектрод в електроліті». Найважливішим параметром безцілинної електродної системи є координата межі інверсії поляризації. Показано, що уявлення про координату межі інверсії поляризації відіграє принципову роль при моделюванні резистивних властивостей точково-контактної системи та часу її життя. Синтезовані математичні моделі добре описують отримані експериментально залежності опору від часу експозиції наноструктури в електричному полі. Виявилось, що залежність опору контакту від часу експозиції, отримана в припущенні про лінійний розподіл анодної поляризації вздовж головної осі каналу провідності, описується диференціальним рівнянням, в якому швидкість росту опору прямо пропорційна кубу цього опору. Одержані матеріали забезпечують можливість цілеспрямованої оптимізації конструкційних параметрів та експлуатаційних режимів сенсорних пристроїв на основі точкових контактів Янсона для аналізу складних газоподібних та рідких сумішей.

Ключові слова: квантовий сенсор; дендритний точковий контакт Янсона; межа інверсії поляризації; резистивні властивості; безцілинна електродна система

RESISTIVE PROPERTIES OF JANSON'S POINT CONTACTS IN THE CONDITIONS OF POLARIZATION INVERSION

**O. POSPELOV¹, G. KAMARCHUK², M. SAKHNENKO¹, A. SAVYTSKYI², V. PROSKURINA¹,
S. ZYUBANOVA¹**

¹ National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

² B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The sensitive element of a new quantum sensor generation is the Janson dendritic point contact. Analytes that are in the space surrounding the sensitive element are able to interact with the freshly formed surface of the conduction channel of the Janson quantum point contact, as well as with the surface of the dendrite during its growth. This interaction provides the influence of the substances under study on the configuration of the output characteristic of the sensor, represented by the system conductivity histogram. The conductivity histogram is built on the basis of the chrono-resistogram of the self-oscillating point-contact cyclic switchover effect, which is directly recorded under self-oscillation conditions. In the structure of the sensor element, Janson's dendritic point contact is immersed in an electrolyte and in an electric field forms a chrono-resistogram, which depends on the environment composition. The paper considers one of the aspects of such chrono-resistograms formation. The features of a gapless electrochemical system in the process of realizing the point-contact cyclic switchover effect are analyzed. Modeling the sensitive element in the form of a gapless electrode system allowed explaining the mechanism and dynamics of the transition "Janson point contact – dendrite and counter electrode in the electrolyte". The most important parameter of the gapless electrode system is the coordinate of the polarization inversion boundary. It is shown that the idea of the coordinate of the polarization inversion boundary plays a fundamental role in modeling the resistive properties of a point-contact system and its lifetime. The synthesized mathematical models describe well the experimentally obtained dependences of the resistance on the exposure time of the nanostructure in an electric field. It was found that the dependence of the contact resistance on the exposure time, obtained under the assumption of a linear distribution of the anodic polarization along the main axis of the conduction channel, is described by a differential equation in

which the growth rate of resistance is directly proportional to the cube of this resistance. The materials obtained make it possible to purposefully optimize the design parameters and operating conditions of sensor devices based on Janson point contacts for the analysis of complex gaseous and liquid mixtures.

Keywords: quantum sensor; Janson's point contact; polarization inversion line; resistive properties; gapless electrode system

Вступ

Селективний квантовий сенсор на основі ефекту електрохімічної точково-контактної комутації має широкі перспективи і значні переваги в порівнянні з існуючими на сьогоднішній день пристроями для диференціального аналізу рідких і газоподібних середовищ [1,2]. Принцип дії квантового сенсора базується на тому, що під час циклічної точково-контактної комутації [3,4] аналіти, які знаходяться в просторі, що оточує чутливий елемент, здатні взаємодіяти зі свіжоутвореною поверхнею каналу провідності квантового точкового контакту Янсона, а також з верхівкою дендрита в процесі його росту. Така взаємодія забезпечує вплив досліджуваних речовин на конфігурацію вихідної характеристики сенсора, якою є гістограма провідності системи. Гістограма провідності будується на основі хронорезистограми автоколивального процесу, яка безпосередньо реєструється у процесі автоколивань. Характеристичні параметри гістограми провідності, таким чином, є маркерами компонентів довілля, що піддаються аналізу. У зв'язку з цим надзвичайно важливо виявити природу специфічних конфігурацій хронорезистограм.

Мета та задачі роботи

Метою роботи є обґрунтування однієї з причин нерегулярного характеру та гальмування автоколивального процесу точково-контактної комутації.

Для досягнення визначеної мети необхідно вирішити наступні задачі:

- проаналізувати механізм виникнення автоколивань опору точкового контакту Янсона;
- виділити принципи для обраної цілі фази процесу точково-контактної комутації;
- у відповідності до обраного механізму побудувати математичну модель виділених фаз;
- верифікувати модель зіставленням з експериментальними даними;
- використати отриману інформацію при конструюванні та експлуатації квантових сенсорних пристроїв.

Матеріали і методи

Експериментальні дані були отримані на дендритних точкових контактах Янсона, які створювались на основі модифікованого методу «голка-ковадло» [4]. Голкою служив електрохімічно загострений мідний дріт діаметром 0,1 мм. Як «ковадло» використовувалась мідна пластинка з

розмірами $0,5 \times 10 \times 20$ мм. Голка за допомогою спеціального пристрою плавно підводилася до «ковадла» на відстань близько 1 мкм. У проміжок між електродами вводилася крапля електроліту і подавався стабілізований струм 20 мкА. Електролітом служив 0,01 моль / дм^3 водний розчин CuSO_4 . Полярність підключення і струм задавалися імпульсним потенціоаом ПІ-50-1. Вихідні параметри системи контролювалися мультиметром Keithley 2000 і виводилися на екран монітора.

Виклад основного матеріалу

При проходженні струму між голкою, підключеною до негативного полюса джерела струму, і «ковадлом» на вістрі голки спостерігається зародження і ріст дендритів через високу щільність силових ліній електричного поля. Через деякий час один з дендритів торкається протиелектрода, і формується дендритний точковий контакт, канал якого забезпечує пряму електронну провідність між голкою і «ковадлом». У момент утворення точкового контакту починається його електростимульоване руйнування, оскільки верхівка дендрита розташовується у зоні дії більш позитивного потенціалу порівняно з потенціалом протиелектроду. Такий розподіл потенціалів стимулює анодне розчинення верхівки дендрита і переривання прямої провідності в момент повного руйнування каналу точкового контакту. Описані трансформації призводять до різких коливань опору системи, які отримали назву автоколивального ефекту точково-контактної комутації. На використанні цього ефекту заснований принцип дії селективного квантового сенсора для аналізу складних газоподібних і рідких середовищ. Вихідним сигналом квантового сенсора є хронорезистограма, отримана в процесі автоколивань в аналізованому середовищі. Конфігурація хронорезистограми є енергетичним відбитком фізико-хімічних властивостей складного багатокомпонентного середовища, що контактує з чутливим елементом, який може знаходитися в двох основних станах. Перший стан - дендритний точковий контакт Янсона, по каналу провідності якого тече електричний струм. Другий стан - голка і «ковадло», розділені шаром електроліту, де формується і росте дендрит. Визначальну роль у фіксуванні всієї сукупності властивостей оточуючого сенсора аналізованого середовища відіграють переходи між цими станами. І якщо ріст дендритів був предметом вивчення багатьох дослідників [5–9], то перехід «точковий контакт Янсона – вихідна система голка-«ковадло» є практично невивченим процесом. Для його опису автори ввели концепцію безщілинної електродної системи, робота якої пояснює механізм і

динаміку цього переходу [10]. Найважливішим параметром безщільної електродної системи є координата межі інверсії поляризації (МІП).

МІП є віртуальною лінією на поверхні каналу провідності точкового контакту Янсона, що при накладенні електричного поля уздовж головної осі каналу ділить поверхню на дві області з протилежними знаками поляризації.

Раніше було показано, що найбільш важливу роль у формуванні конфігурації хронорезистогам відіграє координата МІП [10]. Уявлення про розташування МІП в геометричному центрі каналу провідності є значною мірою ідеалізованим і не дозволяє пояснити складний характер хронорезистогам провідності. Уявлення про точковий контакт Янсона як про довгий канал є модельним і, поряд з моделлю отвору [11,12], використовується для теоретичного опису властивостей наноструктури. Це дозволяє розглядати координату МІП як параметр, значення якого з великою ймовірністю стохастично розподілені у межах довжини каналу провідності в автоколивальному процесі. Ці межі обумовлені тим, що практично все падіння напруги при протіканні через контакт струму припадає на цей канал. У процесі автоколивань під дією електричного поля формуються і розчиняються металеві дендрити. Це призводить до утворення перехідних ділянок між межами каналу і масивними берегами під час комутації верхівки дендрита з протиелектродом, що викликає зсув координати МІП відносно геометричного центру. Опір перехідних ділянок може бути порівняним з опором точкових контактів, що, в свою чергу, зсуває МІП у той або інший бік. У результаті такої комутації весь канал провідності може опинитися у зоні впливу катодної або анодної поляризації. У даній роботі розглянуто обидва ці випадки.

Наведемо деякі концептуальні положення, що визначають функціонування базової модифікації квантового сенсора.

- Чутливим елементом пристрою є металевий точковий контакт Янсона.
- Металевий точковий контакт формується в місці торкання верхівки дендрита з масивним протиелектродом («ковадлом»).
- Формування контакту відбувається в умовах електрохімічного росту дендрита в електричному полі.
- Під впливом електричного поля сформований дендрит руйнується в результаті роботи безщільної електродної системи, локалізованої на ділянці з максимальним опором [3,10].
- На процеси формування і руйнування дендритного точкового контакту суттєво впливає склад електроліту, який контактує з наноструктурою, та природа і морфологія протиелектрода.

Відповідно до теорії мікроконтактної спектроскопії Янсона [11-13], при протіканні струму в

системі «електрод-точковий контакт-електрод» все падіння напруги відбувається у контакті. Це дозволяє виключити масивні електроди, що беруть участь у створенні точкового контакту Янсона, з процесів формування його електричного опору. Однак в процесі автоколивань поверхня «ковадла» змінює свою природу і морфологію, і перехідні опори включаються до складу безщільної електродної системи. Вочевидь, падіння напруги в системі, що складається з точкового контакту і ряду інших послідовно включених опорів, визначається рівнянням

$$\Delta U = \sum_{i=1}^{i=n} \left[\int_{x=0}^{x=x_i} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_i dx \right], \quad (1)$$

де i – номер ділянки системи, на якій падає напруга при протіканні струму; x – лінійна координата системи; u – поточне значення падіння напруги.

Для випадку, коли система складається з точкового контакту з опором R_0 і деякого перехідного опору R_{tr} , справедливим є рівняння

$$\Delta U = I(R_0 + R_{tr}) \quad (2)$$

У гранично формалізованому модельному уявленні канал провідності точкового контакту довжиною l має постійний діаметр. За умови, що в точці інверсії сукупне падіння напруги в системі має бути поділений навпіл, отримуємо вираз для координати точки інверсії

$$x_{\alpha} = \frac{l}{2} \left(\frac{R_{tr}}{R_0} + 1 \right) \quad (3)$$

Якщо перехідний опір дорівнюватиме вихідному опору точкового контакту, точка інверсії зсунеться на край каналу провідності, що прилягає до «берегу», який з'єднаний з позитивним полюсом джерела живлення. Виходячи з того, що у вихідному стані голка з'єднується з негативним полюсом джерела живлення, весь канал провідності у такому випадку буде поляризований негативно, що забезпечить на всій його поверхні катодний процес - осадження металу. В процесі цього осадження зменшується опір точкового контакту за рахунок збільшення товщини шару, який осаджується. Природно, в такому стані не доводиться очікувати ефекту точково-контактної комутації, і спостерігається гальмування процесу автоколивань. У цьому випадку з хорошим наближенням діє співвідношення

$$\Delta E(\tau) = \frac{IR(\tau)}{2}, \quad (4)$$

де $\Delta E(\tau)$ - усереднена по довжині каналу провідності катодна поляризація поверхні; $R(\tau)$ - поточне значення опору контакту.

З часом, при експозиції в електричному полі, опір контакту знижується завдяки осадженню шару металу на поверхні каналу провідності. З використанням поляризаційної характеристики металевго електрода можна знайти відповідну даній поляризації густину катодного струму j . При незначному зсуві від рівноважного потенціалу можна прийняти, що поляризація (ΔE) і густина катодного струму (j) пов'язані лінійною залежністю [14]:

$$j(\tau) = g\Delta E(\tau), \quad (5)$$

де g - коефіцієнт пропорційності, А/м²В; $j(\tau)$ - поточне значення густини струму, А/м².

Тоді, у припущенні про 100% вихід за струмом і у відповідності до закону Фарадея, можна записати

$$kj(\tau)\tau CE = \gamma\delta(\tau), \quad (6)$$

де k - електрохімічний еквівалент відповідного металу, кг/Кл; τ - поточний час, с; γ - питома маса металу, кг/м³; $\delta(\tau)$ - товщина осадженого металевго шару, м.; CE - вихід за струмом (current efficiency). З урахуванням (4) - (6), товщину шару металевго осаду можна надати рівнянням

$$\delta(\tau) = \frac{kg\tau}{\gamma} \frac{IR(\tau)CE}{2} \quad (7)$$

Якщо розглядати опір каналу провідності і опір осадженого шару як включені паралельно резистори, для сумарного опору справедливим є вираз

$$R(\tau) = \frac{R_c(\tau)R_0}{R_0 + R_c(\tau)}, \quad (8)$$

де $R_c(\tau)$ - опір шару.

У відповідності до закону Ома отримуємо

$$R_c(\tau) = \frac{\rho l}{\pi(d_0\delta(\tau) + \delta(\tau)^2)}, \quad (9)$$

де d_0 - діаметр каналу провідності вихідного точкового контакту, м.

З урахуванням рівняння

$$R_0 = \frac{16}{3} \frac{\rho l}{\pi d_0^2} \quad (10)$$

[15] і співвідношення (8), маємо вираз, який характеризує залежність опору точкового контакту від часу експозиції в електричному полі при катодній поляризації усїєї поверхні каналу провідності

$$R(\tau) = \frac{R_0}{\frac{4\sqrt{\pi}\delta(\tau)\sqrt{R_0}}{\sqrt{3\rho l}} + \frac{\pi\delta^2(\tau)R_0}{\rho l} + 1} \quad (11)$$

У процесі автоколивань спостерігаються випадки зниження опору сформованого контакту. Характер і динаміка такого зниження на прикладі міді добре описуються отриманою математичною моделлю (рис. 1).

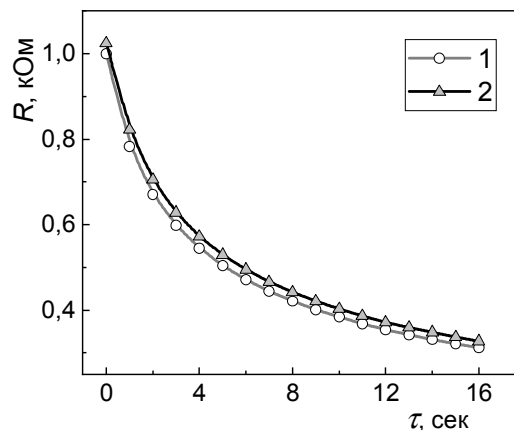


Рис. 1 – Залежність опору точкового контакту від часу експозиції в електричному полі при катодній поляризації поверхні каналу провідності:

(1) – результати розрахунку, (2) – дані експерименту

При виконанні розрахунків за (11) використано наступні значення параметрів: питома маса міді 8890 кг/м³; питомий опір $1,724 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; електрохімічний еквівалент міді $0,329 \cdot 10^{-6}$ кг/Кл; коефіцієнт пропорційності між густиною струму і поляризацією $2 \cdot 10^3$ А/м²·В [14]; вихід за струмом 80%; струм вздовж головної вісі каналу провідності 20 мкА; вихідний опір точкового контакту 1000 Ом; добуток $\rho l = 0,66 \cdot 10^{-15}$ Ом·м² [16].

Кожна точка на модельній залежності отримана шляхом ітерацій опору контакту при фіксованому часі експозиції в електричному полі. Характерно, що зі збільшенням часу експозиції збільшується кількість необхідних ітерацій. Якщо для секундної експозиції досить п'яти, то для експозиції 15 секунд необхідно понад 50 ітераційних кроків.

Зауважимо, що робота безщілинної електродної системи передбачає т.зв. планарну поляризацію межі розділу фаз, зумовлену тим, що протяжний провідник на кінцях своєї головної осі має різні потенціали. У той же час на межу розділу з електролітом ця різниця

потенціалів може не індукюватись, наприклад, за умов пасивації поверхні каналу провідності. Така «не директивна» поляризація практично не супроводжується електрохімічними процесами. У математичній моделі внесок такого характеру планарної поляризації можна врахувати, використовуючи уявлення про ефективний вихід за струмом. У цьому випадку побічним процесом, на який витрачається струм, слід вважати перенесення електронів в об'ємі провідника.

Поряд із повним блокуванням розчинення каналу провідності в електричному полі можна спостерігати зворотну картину - підвищену швидкість анодного руйнування наноструктури. Така динаміка може реалізуватися в разі підвищення опору ділянки дендрита, прилеглого до вістря голки. Крім того, процес активного розчинення контакту можна реалізувати примусово при запуску нового циклу автоколивань, заблокованих зсувом МПП у бік позитивних значень поляризації. У цьому випадку достатньо на короткий час (кілька секунд) змінити полярність, щоб забезпечити зміщення границі інверсії в бік негативного полюса джерела струму, і при певному опорі навантаження весь канал провідності може опинитися в зоні впливу позитивної поляризації, що призведе до розчинення каналу вздовж всієї головної осі і відповідного зростання опору точкового контакту. Якщо припустити, що поляризація каналу провідності вздовж головної осі змінюється лінійно, можна, з урахуванням фундаментальних співвідношень електрохімії [13], отримати залежність опору контакту від часу експозиції. Опір в цьому випадку коректно знаходити як опір усіченого конуса за рівнянням

$$R(\tau) = \frac{16}{3} \frac{\rho l}{\pi d_0 d(\tau)} \quad (12)$$

де $d(\tau)$ - діаметр верхівки усіченого конуса;
 d_0 - діаметр основи усіченого конуса.

У процесі експозиції діаметр верхівки усіченого конуса зменшується за рахунок анодного розчинення. У відповідності до цього математична модель залежності опору від часу приймає наступний вигляд

$$R(\tau) = \frac{R_0}{\sqrt{1 - \frac{kg_a I(CE) R_0 \sqrt{3\pi R_0}}{\gamma \sqrt{\rho l}} \tau}} \quad (13)$$

Якщо розглянути ділянку каналу провідності деякої малої довжини, то можна прийняти, що він має циліндричну форму. На цій ділянці, відповідно до умов організації системи, анодна поляризація має максимальне значення. Природно, що повне розчинення цього фрагмента каналу еквівалентно перериванню прямої провідності. З урахуванням того, що час життя контакту - це відрізок часу від моменту

початку експозиції, при якій через контакт протікає постійний струм, до моменту переривання прямої провідності через канал провідності, цей параметр можна визначити у відповідності до рівняння

$$\tau_l = \frac{\gamma \sqrt{\rho l}}{kg_a I(CE) R_0 \sqrt{3\pi R_0}} \quad (14)$$

де g_a - коефіцієнт пропорційності між анодною густиною струму і анодною поляризацією електрода.

Зіставлення рівнянь (13) і (14) вказує на те, що поточний опір точкового контакту безпосередньо визначається часом його життя:

$$R(\tau) = \frac{R_0}{\sqrt{1 - \frac{\tau}{\tau_l}}} \quad (15)$$

Паралельно із моделюванням за умови лінійного взаємозв'язку між поляризацією і густиною струму були отримані моделі розв'язанням диференціальних рівнянь. Вихідні диференціальні рівняння записані в припущенні, що швидкість зміни опору прямо пропорційна величині опору в певній ступені

$$\frac{dR}{dt} = k_d R^n \quad (16)$$

Для знаходження коефіцієнта пропорційності припускали, що при досягненні системою значення опору одноатомного контакту пряма провідність переривається. Виявилось, що залежність опору контакту від часу експозиції, отримана в припущенні про лінійний розподіл анодної поляризації вздовж головної осі каналу провідності, описується диференціальним рівнянням, в якому швидкість росту опору прямо пропорційна кубу цього опору, тобто рівнянням (16) при $n = 3$. Його рішення має вигляд

$$R(\tau) = \frac{R_0}{\sqrt{1 - \frac{\tau}{\tau_l} \left(1 - \frac{R_0^2}{(12,9 \cdot 10^3)^2} \right)}} \quad (17)$$

Як видно, введення в модель уявлення про нехтування часом життя одноатомного контакту в умовах анодної поляризації дозволило виключити ситуацію поділу на нуль при $\tau = \tau_l$ в рівнянні (15).

Таким чином, час життя контакту можна надати через фундаментальні характеристики системи. Графічна інтерпретація отриманих моделей має такий вигляд (рис. 2).

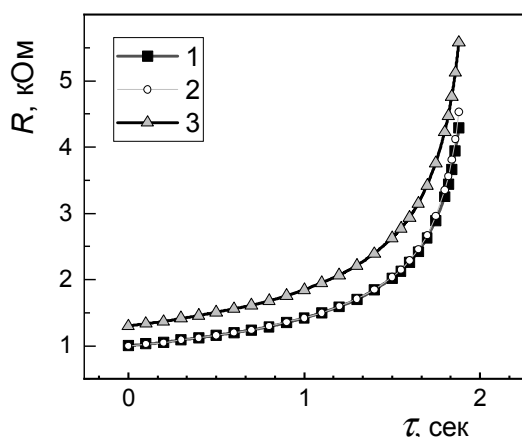


Рис. 2 – Залежність опору точкового контакту від часу експозиції в електричному полі при анодній поляризації поверхні каналу провідності. (1) – дані рішення диференціального рівняння, (2) – дані фізико-хімічних розрахунків, (3) – результати експерименту

Висновки

Наведені співвідношення, що базуються на уявленні про вирішальну роль координати межі інверсії поляризації при формуванні відгуку квантового сенсора.

Синтезовані математичні моделі адекватно описують резистивні властивості точкових контактів, які знаходяться в електричному полі.

Показано суттєву роль в динаміці автоколивального процесу перехідного опору, який може виникати при комутації верхівки дендриту з протиелектродом завдяки трансформаціям морфології та властивостей поверхні підкладки.

Отримана інформація дозволяє знизити ймовірність непрогнозованого припинення автоколивального процесу та досягти його форсованого поновлення.

Використання математичних моделей дозволяє глибше зрозуміти особливості автоколивального процесу, забезпечує можливість цілеспрямованої оптимізації конструкційних параметрів та експлуатаційних режимів сенсорних пристроїв на основі точкових контактів Янсона.

ПОДЯКА Ця робота була частково підтримана програмою НАТО NATO SPS Programme (Ref: SPS.MYP 985481), Міністерством освіти і науки та Національною академією наук України.

Список літератури

1. Kamarchuk G., Pospelov A., Savytskyi A., Gudimenko V., Vakula V., Herus A., Harbuz D., Kamarchuk L., Pereira M.F. On the Prospect of Application of Point-Contact Sensors to Solving the Global Security Problems: An Analytical Review. In: Pereira M.F., Apostolakis A. (eds) Terahertz (THz), Mid Infrared (MIR) and Near Infrared (NIR) Technologies for Protection of Critical Infrastructures Against Explosives and CBRN. *NATO Science for Peace*

- and Security Series B: Physics and Biophysics. Springer, Dordrecht. 2021. P. 203-225. doi:10.3762/bjnano.11.146.
2. Kamarchuk G. V., Pospelov A. P., Kamarchuk L. V., Savytskyi A. V., Harbuz D. A., Vakula V. L. Point-Contact Sensors as an Innovative Tool in Defense Against Chemical Agents, Environment and Health Risks: A Review. In: Sidorenko A., Hahn H. (eds) Functional Nanostructures and Sensors for CBRN Defence and Environmental Safety and Security. *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*. Springer, Dordrecht. 2020. P. 245-270. doi:10.1007/978-94-024-1909-218.
3. Kamarchuk G. V., Pospelov A. P., Savytskyi A. V., Herus A. O., Doronin Yu. S., Vakula V. L., Faulques E. Conductance quantization as a new selective sensing mechanism in dendritic point contacts. *J. Applied Sciences*. 2019. P. 119-127. doi:10.1364/FIO.2019.JTu3A.55.
4. Pospelov A.P., Pilipenko A. I., Kamarchuk G. V., Fisun V. V., Yanson I. K., Faulques E. A New Method for Controlling the Quantized Growth of Dendritic Nanoscale Point Contacts via Switchover and Shell Effects. *J. Phys. Chem.* 2015. № 119(1). P. 632-639. doi:10.1021/jp506649u.
5. Зубов М. С., Ваграмян А. Т. Исследование влияния поверхностно-активных веществ на скорость роста монокристалла серебра в процессе электролиза. *Электрохимия*. 1966. № 12. С. 1426-1430.
6. Yasuji Sawada, Dougherty A., Gollub J.P. Dendritic and Fractal Patterns in Electrolytic Metal Deposits. *Phys. Rev. Letters*. 1986. № 12. С. 1260-1263. doi: 0.1103/PhysRevLett.56.1260.
7. Peppler K, Pölleth M., Meiss S., Rohnke M., Janek J. Electrodeposition of Metals for Micro- and Nanostructuring at Interfaces between Solid, Liquid and Gaseous Conductors: Dendrites, Whiskers and Nanoparticles. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*. 2006. № 220. P. 1507-1527. doi: 10.1524/zpch.2006.220.10.1507.
8. Мурашова И. Б., Помосов А. В. *Электроосаждение металлов в виде дендритов. Итоги науки и техники. Серия: Электрохимия*. Москва: ВИНТИ, 1989. 117 с.
9. Мурашова И. Б., Бурханова Н. Г. Расчет структурных изменений дендритного осадка в процессе гальваностатического электролиза. *Электрохимия*. 2001. № 7. С. 871-877.
10. Pospelov A. P., Kamarchuk G. V., Savytskyi A. V., Sakhnenko M.D., Ved M.V., Vakula V.L. Macroscopic simulation of atom-sized structures of functional materials: phenomenology of the elongated electrode system. *Functional Materials*. 2017. № 24. P. 463-468. doi:10.15407/fm24.03.463.
11. Naidyuk Yu. G., Yanson I. K. *Point-contact spectroscopy*. New York: Springer, 2005. 300 p.
12. Kulik I. O., Omelyanchuk A. N., Shekhter R. I. Electrical Conductivity of Point Microcontacts and the Spectroscopy of Phonons and Impurities in Normal Metals. *Sov. J. Low Temp. Phys.* 1977. № 3 (12). P. 1543-1558. doi:10.1063/1.5097356.
13. Кулик И. О., Омелянчук А. Н., Шехтер Р. И. Электропроводность точечных микроконтактов и спектроскопия фононов и примесей в нормальных металлах. *Физика низких температур*. 1977. № 12. С. 1543-1558.
14. Дамаскин Б. Б., Петрий О. А., Цирлина Г. А. *Электрохимия*. Москва: Химия, 2006. 672 с.
15. Шарвин Ю. В. Об одном возможном методе исследования поверхности Ферми. *ЖЭТФ*. 1965. № 48. С. 984-985.

16. Александров Б. Н. Остаточное сопротивление как критерий чистоты металлов. В кн.: *Физика конденсированного состояния*. Харьков: ФТИНТ АН УССР, 1978. С. 52-101.

References (transliterated)

1. Kamarchuk G., Pospelov A., Savitskiy A., Gudimenko V., Vakula V., Herus A., Harbuz D., Kamarchuk L., Pereira M. F. On the Prospect of Application of Point-Contact Sensors to Solving the Global Security Problems: An Analytical Review. In: Pereira M.F., Apostolakis A. (eds) *Terahertz (THz), Mid Infrared (MIR) and Near Infrared (NIR) Technologies for Protection of Critical Infrastructures Against Explosives and CBRN. NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics. Springer, Dordrecht, 2021, pp. 203-225, doi:10.3762/bjnano.11.146.*
2. Kamarchuk G. V., Pospelov A. P., Kamarchuk L. V., Savitskiy A. V., Harbuz D. A., Vakula V. L. Point-Contact Sensors as an Innovative Tool in Defense Against Chemical Agents, Environment and Health Risks: A Review. In: Sidorenko A., Hahn H. (eds) *Functional Nanostructures and Sensors for CBRN Defence and Environmental Safety and Security. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer, Dordrecht, 2020, pp. 245-270, doi:10.1007/978-94-024-1909-218.*
3. Kamarchuk G. V., Pospelov A.P., Savitskiy A. V., Herus A. O., Doronin Yu. S., Vakula V. L., Faulques E., Conductance quantization as a new selective sensing mechanism in dendritic point contacts. *J. Applied Sciences*, 2019, pp. 119-127, doi:10.1364/FIO.2019.JTu3A.55.
4. Pospelov A. P., Pilipenko A. I., Kamarchuk G.V., Fisun V. V., Yanson I. K., Faulques E., A New Method for Controlling the Quantized Growth of Dendritic Nanoscale Point Contacts via Switchover and Shell Effects. *J. Phys. Chem.*, 2015, no. 119 (1), pp. 632-639, doi: 10.1021/jp506649u.
5. Zubov M. S., Vagramjan A. T. Issledovanie vliyanija poverhnostno-aktivnyh veshhestv na skorost' rosta monokristalla serebra v processe jelektroliza [Study of the effect of surfactants on the growth rate of a silver single crystal during electrolysis]. *Electrochemistry*, 1966, no. 12, pp. 1426-1430.
6. Yasuji Sawada, Dougherty A., Gollub J. P. Dendritic and Fractal Patterns in Electrolytic Metal Deposits. *Phys. Rev. Letters*, 1986, no. 12, pp. 1260-1263, doi: 10.1103/PhysRevLett.56.1260.
7. Peppeler K., Pölleth M., Meiss S., Rohnke M., Janek J. Electrodeposition of Metals for Micro- and Nanostructuring at Interfaces between Solid, Liquid and Gaseous Conductors: Dendrites, Whiskers and Nanoparticles. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 2006, no. 220, pp. 1507-1527, doi: 10.1524/zpch.2006.220.10.1507.
8. Murashova I. B., Pomosov A. V. Jelektroosazhdenie metallov v vide dendritov [Electrodeposition of metals in the form of dendrites]. *Results of Science and Technology. Series: Electrochemistry*, Moscow, 1989, 117 p.
9. Murashova I. B., Burhanova N. G. Raschet strukturnykh izmenenij dendritnogo osadka v processe gal'vanostatsicheskogo jelektroliza [Calculation of structural changes in the dendritic deposit during galvanostatic electrolysis]. *Electrochemistry*, 2001, no.7, pp. 871-877.
10. Pospelov A. P., Kamarchuk G. V., Savitskiy A. V., Sakhnenko M. D., Ved M. V., Vakula V. L. Macroscopic simulation of atom-sized structures of functional materials: phenomenology of the elongated electrode system. *Functional Materials*, 2017, no. 24, pp. 463-468, doi: 10.15407/fm24.03.463.
11. Naidyuk Yu. G., Yanson I. K. *Point-contact spectroscopy*, New York: Springer, 2005, 300 p.
12. Kulik I. O., Omelyanchuk A. N., Shekhter R. I. Electrical Conductivity of Point Microcontacts and the Spectroscopy of Phonons and Impurities in Normal Metals. *Sov. J. Low Temp. Phys.*, 1977, no. 3 (12), pp. 1543-1558, doi: 10.1063/1.5097356.
13. Kulik I. O., Omel'januchuk A. N., Shekhter R. I. Jelektroprovodnost' tochechnykh mikrokontaktov i spektroskopija fononov i primesej v normal'nyh metallah [Electrical conductivity of point microcontacts and spectroscopy of phonons and impurities in normal metals]. *Low temperature physics*, 1977, Vol. 3, no. 12, pp. 1543-1558.
14. Damaskin B. B., Petrij O. A., Cirlina G. A. *Jelektrohimiya [Electrochemistry]*, Moscow, 2006, 672 p.
15. Sharvin Ju. V. Ob odnom vozmozhnom metode issledovaniya poverhnosti Fermi [One possible method for studying the Fermi surface]. *ZhJeTF*, 1965, no. 48, pp. 984-985.
16. Aleksandrov B. N. Ostatochnoe soprotivlenie kak kriterij chistoty metallov [Residual resistance as a criterion for the purity of metals]. V kn.: *Fizika kondensirovannogo sostojaniya [In the book: Physics of Condensed Matter]*, Kharkov, 1978, pp. 52-101.

Відомості про авторів (About authors)

Поспелов Олександр Петрович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри фізичної хімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-5136-9268; e-mail: apetrovych@gmail.com

Pospelov Alexander – Ph.D. in Technology, Senior Researcher, Associate Professor of the Department of Physical Chemistry, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5136-9268; e-mail: apetrovych@gmail.com

Камарчук Геннадій Васильович – доктор фізико-математичних наук, завідувач відділом спектроскопії молекулярних систем та наноструктурних матеріалів, Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАНУ, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-1105-8019; e-mail: kamarchuk@ilt.kharkov.ua

Kamarchuk Gennadii – Doctor of physical and mathematical sciences, Head of the Department of Spectroscopy of molecular Systems and Nanostructured Materials, B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1105-8019; e-mail: kamarchuk@ilt.kharkov.ua

Сахненко Микола Дмитрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри фізичної хімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-5525-9525; e-mail: sakhnenko@kpi.kharkov.ua

Sakhnenko Mykola – Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of Physical Chemistry, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5525-9525; e-mail: sakhnenko@kpi.kharkov.ua.

Савицький Андрій Володимирович – кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник, Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАНУ, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-4927-5932; e-mail: asavitsky@ilt.kharkov.ua

Savitskii Andrii – candidate of physical and mathematical sciences, researcher, B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-4927-5932; e-mail: asavitsky@ilt.kharkov.ua

Проскуріна Валерія Олегівна – кандидат технічних наук, асистент кафедри загальної та неорганічної хімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-4215-4190; e-mail: voproskurina@gmail.com

Proskurina Valeriya – Ph.D. in Technology, Assistant of the Department of General and Inorganic Chemistry, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-4215-4190; e-mail: voproskurina@gmail.com

Зюбанова Світлана Іванівна – науковий співробітник кафедри фізичної хімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-4215-4190; e-mail: voproskurina@gmail.com

Zyubanova Svitlana – researcher of the Department of Physical Chemistry, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-4215-4190; e-mail: voproskurina@gmail.com

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Поспелов О. П., Камарчук Г. В., Сахненко М. Д., Савицький А. В., Проскуріна В. О., Зюбанова С. І. Резистивні властивості точкових контактів Янсона в умовах інверсії поляризації. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 3 (9). С. 81-88. doi:10.20998/2413-4295.2021.03.12.

Please cite this article as:

Pospelov O., Kamarchuk G., Sakhnenko M., Savitskyi A., Proskurina V., Zyubanova S. Resistive properties of Janson's point contacts in the conditions of polarization inversion. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 3 (9), pp. 81-88, doi:10.20998/2413-4295.2021.03.12.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Поспелов А. П., Камарчук Г. В., Сахненко Н. Д., Савицький А. В., Проскуріна В. О., Зюбанова С. І. Резистивные свойства точечных контактов Янсона в условиях инверсии поляризации. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 3 (9). С. 81-88. doi:10.20998/2413-4295.2021.03.12.

АННОТАЦІЯ Чувствительным элементом квантового сенсора нового поколения является дендритный точечный контакт Янсона. Аналиты, которые находятся в пространстве, окружающем чувствительный элемент, способны взаимодействовать со свежесформированной поверхностью канала проводимости квантового точечного контакта Янсона, а также с поверхностью дендрита в процессе его роста. Такое взаимодействие обеспечивает влияние исследуемых веществ на конфигурацию выходной характеристики сенсора, представленной гистограммой проводимости системы. Гистограмма проводимости строится на основе хронорезистограммы автоколебательного процесса точечно-контактной коммутации, которая непосредственно регистрируется в условиях автоколебаний. В структуре сенсорного элемента дендритный точечный контакт Янсона погружен в электролит и в электрическом поле формирует хронорезистограмму, характер которой зависит от состава окружающей среды. В работе рассмотрен один из аспектов механизма формирования таких хронорезистограмм. Проанализированы особенности функционирования бесцелевой электрохимической системы в процессе реализации автоколебательного эффекта точечно-контактной коммутации. Моделирование чувствительного элемента в виде бесцелевой электродной системы позволило объяснить механизм и динамику перехода «точечный контакт Янсона – дендрит и противозлектрод в электролите». Важнейшим параметром бесцелевой электродной системы является координата границы инверсии поляризации. Показано, что представление о координате границы инверсии поляризации играет принципиальную роль при моделировании резистивных свойств точечно-контактной системы и времени ее жизни. Синтезированные математические модели хорошо описывают полученные экспериментально зависимости сопротивления от времени экспозиции наноструктуры в электрическом поле. Установлено, что зависимость сопротивления контакта от времени экспозиции, полученная при допущении о линейном распределении анодной поляризации вдоль главной оси канала проводимости, описывается дифференциальным уравнением, в котором скорость роста сопротивления прямо пропорциональна кубу этого сопротивления. Полученные материалы обеспечивают возможность целенаправленной оптимизации конструктивных параметров и эксплуатационных режимов сенсорных устройств на основе точечных контактов Янсона для анализа сложных газообразных и жидких смесей.

Ключевые слова: квантовый сенсор; точечный контакт Янсона; граница инверсии поляризации; резистивные свойства; бесцелевая электродная система

Надійшла (received) 01.09.2021