

DOI: 10.20535/kpiscn.2022.1-2.251016

УДК 681.586.6

Л.М. Павлов, П.О. Яганов*
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна
*Відповідальний автор: p.yahanov@ukr.net

МОДЕЛЬ ТЕРМОМЕТРИЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДІОДНОГО СЕНСОРА ТЕМПЕРАТУРИ

Проблематика. Мікроелектронні технології дозволяють створити структури з високою чутливістю до зовнішніх впливів. У напівпровідниковій мікроелектроніці це структури типу потенційного бар'єру на $p-n$ переході. Кремнієві діодні сенсори мають високу термочутливість у широкому діапазоні температур. Розроблено як фізичні, так і формальні математичні моделі термометричної характеристики діодного сенсора. Похибка вимірювання температури за деякими з цих методів виявилась неприйнятною для контролю багатьох технологічних процесів. Актуальним є проведення досліджень температурних властивостей $p-n$ переходу у нерівноважному стані для формалізації нової термометричної характеристики діодного сенсора.

Мета дослідження. Метою роботи є модель термометричної характеристики діодних сенсорів за результатами вимірювань вольт-амперних характеристик у діапазоні температур.

Методика реалізації. Здійснено аналіз методів градування термометричної характеристики діодних сенсорів за вольт-амперними характеристиками, виявлено чинники, що впливають на точність вимірювання температури, обґрунтовано метод регресійного аналізу для формування поліноміальної моделі термометричної характеристики.

Результати дослідження. В результаті досліджень вольт-амперних характеристик кремнієвих діодів у діапазоні температур (248 ... 393) К встановлено, що похибка вимірювання температури діодними сенсорами пов'язана з залежністю фактора неідеальності $p-n$ переходу від температури. Проведена оцінка точності термометричної характеристики, де ця функціональна залежність представлена у вигляді апроксимаційного поліному.

Висновки. Представлено альтернативну модель термометричної характеристики діодних сенсорів температури рівнянням регресії другого степеня. Аргументами функції є струм і напруга діода у режимі прямого зміщення. Стабільність струму у колі $p-n$ переходу не передбачається. Точність визначення температури в діапазоні температур (248 ... 393) К знаходиться в межах $\pm (0,2 \dots 0,256)$ К.

Ключові слова: діодні сенсори температури; вольт-амперна характеристика; фактор неідеальності; регресія; модель термометричної характеристики.

Вступ

Сенсори фізичних величин є невід'ємною складовою сучасних систем збору та обробки даних. Саме їх сигнал, який формується під впливом зовнішніх полів різної природи, є основою інформації про стан об'єкта вимірювання. Розвиток мікроелектронних технологій сприяв появі різноманітних структур з високою чутливістю до зовнішніх впливів. Оскільки переважним електричним відгуком сенсорного сигналу є струм і напруга, а технології мікроелектроніки зорієнтовані на зменшення розмірів електронних приладів, виникає деяка суперечливість між рівнем сигналу і габаритними розмірами мікросенсора. Величина електричного струму залежить від кіль-

кості носіїв заряду, які сформовані в об'ємі речовини. Чим більший об'єм, тим більший струм і вищий рівень сигналу первинного вимірювального перетворювача. Низький рівень знижує завадостійкість, ускладнює захист інформації, обмежує можливості вторинного перетворення.

Для мікроелектронних сенсорів важливим є використання такого ефекту перетворення фізичної величини в електричний сигнал, який зберігає чутливість і рівень електричного сигналу в разі зменшення габаритів і маси сенсора. До таких ефектів належать явища в неоднорідностях типу потенціального бар'єра. Величина потенційного бар'єру залежить від питомих і фундаментальних параметрів. У твердотільній напівпровідниковій електроніці це ширина

Пропозиція для цитування цієї статті: Л.М. Павлов, П.О. Яганов, «Модель термометричної характеристики діодного сенсора температури», *Наукові вісті КПІ*, № 1–2, с. 42–50, 2022. doi: 10.20535/kpiscn.2022.1-2.251016

Offer a citation for this article: Pavlov L.M., Yahanov P.O. "Model of the thermometric characteristics of the diode temperature sensor", *KPI Science News*, no. 1–2, pp. 42–50, 2022 doi: 10.20535/kpiscn.2022.1-2.251016

забороненої зони, рівень Фермі, рухливість і концентрація носіїв заряду, контактна різниця потенціалів тощо. Зміна висоти потенційного бар'єру у нерівноважному стані є мірою фізичної величини, яка спричинила цю зміну.

У напівпровідниковій мікроелектроніці найпоширенішим потенціальним бар'єром є $p-n$ -перехід. Явища і процеси у нерівноважному стані $p-n$ -переходу є основою функціонування багатьох мікросенсорів, серед яких важливе місце належить кремнієвим діодним сенсорам температури (ДСТ). Їх перевага полягає у доведеній до довершеності промисловій технології виготовлення кремнієвих мікроструктур, розвиненому матеріалознавстві, прогнозованості електрофізичних характеристик. Електричним сигналом ДСТ є падіння напруги на прямо зміщеному $p-n$ -переході, яке не залежить від площі чи об'єму $p-n$ -переходу, а визначається контактною різницею потенціалу та її температурними властивостями у нерівноважному стані. Термочутливість кремнієвих ДСТ різних конструкцій оцінюють в межах близьких до $2\text{ мВ}/\text{К}$ у діапазоні температур $T = (50-450)\text{ К}$ [1, 2].

Основою фізичної моделі функціонування ДСТ є модель тонкого переходу В. Шоклі, яка була розроблена у 1949 р. для германію [3]. Для кремнію вона лише якісно узгоджує реальну залежність струму від напруги [4]. З метою адаптації теоретичної вольт-амперної характеристики (ВАХ) $p-n$ -переходу до експериментальної наступне її використання супроводжувалось внесенням поправок, включення додаткових складових у формулу моделі, ускладненням еквівалентної схеми $p-n$ -переходу [5–7].

Це стосується і метрологічних характеристик ДСТ, переважна більшість яких використовує температурну залежність падіння напруги прямого зміщення на $p-n$ -переході за постійного струму [2]. Для зменшення похибки вимірювання температури, викликаної саморозігрівом сенсора, струм підтримують на низькому рівні порядку $I = (10^{-1}-10^{-2})\text{ мкА}$ з відхиленнями від номінального значення не більше 0,1–0,05 % [1, 2, 8, 9]. Такі жорсткі вимоги до апаратної частини вимірювального перетворювача інколи суттєво ускладнюють калібрування, а для користувача обмежують можливості його використання.

Автори методів [10–12] моделювання метрологічних характеристик ДСТ на основі аналізу формули В. Шоклі прийшли до висновку, що стабільність струму крізь $p-n$ -перехід не є

обов'язковим фактором для визначення температури. Також було обґрунтовано, що параметри, залежні від конструкторсько-технологічних особливостей виготовлення ДСТ, можна виключити з формули термометричної характеристики. Представлено моделі термометричних характеристик, які використовують для розрахунку температури тільки струм і напругу у колі $p-n$ -переходу у двох точках ВАХ зі встановленням числового значення фактора неідеальності. За вимірюваннями струму і напруги у трьох точках однієї гілки ВАХ з'являється можливість врахувати у термометричній характеристиці, крім фактора не ідеальності також послідовний опір ДСТ. Надалі ці параметри розглядають як константи.

Проте похибка вимірювання температури за цими методами виявилась неприйнятною для контролю багатьох технологічних процесів. Щоб підвищити точність згаданих вище методів модель термометричної характеристики ДСТ, яка включає формулу В. Шоклі для $p-n$ -переходу, доповнили поліноміальною складовою з використанням емпіричних коефіцієнтів. Обґрунтовано, що обмежитись тільки вимірюванням струму і напруги без врахування температури, за якої ці вимірювання відбулись, неможливо [13–16].

У [8] математичну модель кремнієвого давача температури розглянуто з точки зору врахування усіх фізичних процесів перенесення заряду у $p-n$ -переході на основі певних теоретичних припущень, які перевірено експериментально. Крім фізичних моделей термометричних характеристик ДСТ відомі також формальні математичні моделі, які є поліноміальними залежностями падіння напруги від температури на основі методів сплайн-інтерполяції, апроксимації, технологій нейронних мереж, де головним критерієм є обчислювальна точність [17–19].

Усе вищенаведене свідчить про те, що пошук оптимального методу моделювання термометричних характеристик діодних сенсорів температури триває. Намагання забезпечити бажану точність термометрії та поєднати фізичну і формальну математичну модель у термометричній характеристиці призводить до збільшення кількості емпіричних параметрів та ускладнює процедуру їх визначення. Отже, актуальним є проведення досліджень температурних властивостей $p-n$ -переходу у режимі прямого зміщення для оптимального використання методів і засобів градування термометричної характеристики ДСТ.

Постановка задачі

Метою роботи є модель термометричної характеристики кремнієвих діодних сенсорів за результатами вимірювань ВАХ у діапазоні температур.

Для досягнення мети треба проаналізувати методи моделювання термометричної характеристики ДСТ за ВАХ, виявити чинники, що впливають на точність вимірювання температури, обґрунтувати метод формування поліноміальної моделі термометричної характеристики ДСТ.

Об'єктом дослідження є температурні властивості нерівноважного стану $p-n$ -переходу. Предмет дослідження – методи і моделі термометричної характеристики кремнієвих діодних сенсорів у режимі прямого зміщення.

Методи моделювання термометричної характеристики діодних сенсорів температури без калібрування

Розглянемо математичні моделі [10–12] методів вимірювання температури без калібрування, які стали основою розвитку модельних уявлень про термометричні характеристики ДСТ, з метою обґрунтування прагматичних пропозицій щодо визначення температури діодними термосенсорами за вимірними струмом і напругою.

У моделі $p-n$ -переходу В. Шоклі зв'язок між струмом $p-n$ -переходу I та напругою U_D на ньому подано формулою вигляду: $I = I_S \left(e^{\frac{U_D}{\phi_T}} - 1 \right)$, де I_S – тепловий (дифузійний) струм $p-n$ -переходу; $\phi_T = \frac{kT}{e}$ – тепловий потенціал; k – стала Больцмана; T – температура; e – заряд електрона. Звідси $U_D = \phi_T \cdot \ln \left(\frac{I}{I_S} + 1 \right)$. Якщо $\frac{I}{I_S} \gg 1$, що спостерігається у переважній більшості випадків експлуатації ДСТ, остаточна формула, яка зв'яже напругу і струм, що протікає у колі $p-n$ -переходу, має вигляд $U_D = \phi_T \cdot \ln \left(\frac{I}{I_S} \right)$.

Для кремнієвих діодів ця формула дає лише якісне узгодження з реальними ВАХ, тому експериментальні результати представляють виглядом: $U_D = A\phi_T \cdot \ln \left(\frac{I}{I_S} \right)$, де A – фактор неіде-

альності $p-n$ -переходу, константа, значення якої встановлюють з експерименту.

Згідно [10], вимірявши на прямій гілці ВАХ $p-n$ переходу у двох точках струм і напругу $I_1(U_1)$ та $I_2(U_2)$, можна встановити температуру T , за якої струм і напруга були виміряні. Сутність методу викладено у формулах (1):

$$U_1 = A \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_1}{I_S} \right), \quad U_2 = A \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_2}{I_S} \right),$$

$$U_1 - U_2 = A \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_1}{I_2} \right), \quad T = \frac{U_1 - U_2}{A \frac{k}{e} \ln \left(\frac{I_1}{I_2} \right)}. \quad (1)$$

Значення фактора неідеальності A визначають за деякої температури T і надалі вважають його незмінним.

За [11] модель термометричної характеристики враховує послідовний опір діодного сенсора R_S і падіння напруги на ньому:

$U_D = A \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I}{I_S} \right) + IR_S$. Для визначення температури за струмом і напругою автори пропонують здійснити вимірювання у трьох точках прямої гілки ВАХ $I_1(U_1)$, $I_2(U_2)$ та $I_3(U_3)$. Сутність методу подано у формулах (2):

$$I_1 = I_0 + \Delta I, \quad I_2 = I_0 - \Delta I,$$

$$\Delta U_{10} = U_1 - U_0 = A \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_1}{I_0} \right) + (I_1 - I_0) \cdot R_S$$

$$\Delta U_{02} = U_0 - U_2 = A \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_0}{I_2} \right) + (I_0 - I_2) \cdot R_S$$

$$\Delta U = \Delta U_{02} - \Delta U_{01} = A \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_0^2}{I_1 \cdot I_2} \right). \quad (2)$$

З виразу (2) визначають параметр A , а з ΔU_{10} (або з ΔU_{02}) – послідовний опір R_S . Температуру T розраховують за будь-якою формулою з наведених вище, наприклад, :

$$T = \frac{\Delta U}{A \frac{k}{e} \ln \left(\frac{I_0^2}{I_1 \cdot I_2} \right)} \quad (3)$$

На рис. 1 зображено типову ВАХ кремнієвого діода, яка ілюструє використання методів [10, 11].

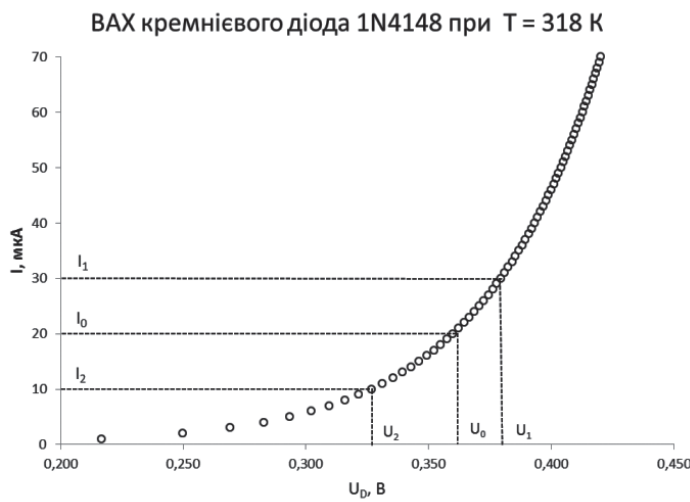


Рис. 1. Вольт-амперна характеристика кремнієвого діода 1N4148 за температури 318 К

Перевага обох розглянутих методів у тому, що в них не обчислюють тепловий (дифузійного) струму $p-n$ -переходу. З наведених міркувань випливає, що для калібрування термометричної характеристики діодних сенсорів температури визначальними є струм і напруга, які дозволяють встановити не тільки температуру, за якої ці електричні величини були виміряні, але й фактор неідеальності A та послідовний опір R_S (1), (2).

Аналіз точності моделювання термометричної характеристики діодних сенсорів температури

Для перевірки точності метрологічних характеристик ДСТ за методами [10, 11] зробимо розрахунки параметрів A та R_S кремнієвих діодів у широкому діапазоні температур. Для цього скористаємось можливостями системи *OrCAD* та її програмного модуля *PSpice*, в якому нелінійна модель $p-n$ -переходу враховує усі складові, потрібні для моделювання як діодів, так і біполярних транзисторів та аналогових схем на їх основі. Автоматизоване проектування електронних приладів сигналів різного рівня підтвердило високу точність розрахунків, які верифіковані і пройшли апробацію часом у галузі електроніки. Модифікація моделей Еберса-Молла та Гуммеля-Пуна, які використовують моделі $p-n$ -переходів у моделях біполярних транзисторів, у *PSpice* досягли довершеності, а параметри цих моделей та еквівалентні схеми на їх основі з максимальною точністю відтворюють ВАХ

декількох тисяч електронних приладів різних конструкцій і максимально наближені до реальних [20–22].

Загалом досліджено температурні ВАХ таких кремнієвих діодів: 1N4007, 1N4009, 1N4148, 1N4154, 1N5371B, 1N5814, 1N6514, 1N914, DIN4003., DIN4151, DIN3909, КД105В, КД106А, КД102А, КД203В. Результати моделювання термометричної характеристики продемонструємо на прикладі сімейства ВАХ малопотужного височастотного діода 1N4148 у корпусі DO-35, який презентує типові характеристики кремнієвих діодних термосенсорів у діапазоні середніх температур і який будемо розглядати як діодний сенсор температури.

У табл. 1 наведені значення напруг і струмів ВАХ діода 1N4148 у діапазоні температур $T = (248–393)\text{K}$. Ці дані повністю узгоджуються з усталеними уявленнями про зміну падіння напруги від температури на прямо зміщеному $p-n$ -переході. Вони дають змогу розрахувати як параметр неідеальності A , так і послідовний опір R_S за різних температур.

Таблиця 1. Температурна залежність напруги прямого зміщення кремнієвого діода 1N4148

$T, \text{ K}$	Напруга, В		
	$I_1 = 36 \text{ мкА}$	$I_0 = 21 \text{ мкА}$	$I_2 = 6 \text{ мкА}$
248	0,563	0,543	0,496
263	0,526	0,504	0,455
268	0,513	0,492	0,441
273	0,501	0,479	0,427
288	0,464	0,440	0,386
303	0,426	0,401	0,344
318	0,388	0,362	0,302
333i	0,350	0,323	0,260
348	0,312	0,284	0,219
363	0,274	0,245	0,178
378	0,236	0,206	0,138
393	0,199	0,168	0,102

На рис. 2 відтворені ці температурні залежності $A(T)$ та $R_S(T)$. Вони свідчать, що гіпотеза про температурну незалежність цих параметрів не підтверджується. Параметр A можна вважати умовно постійним до температур діапазону $T = (310–320)\text{K}$. Для визначення температури у широкому діапазоні треба мати апроксимаційну залежність $A(T)$, за допомогою якої мінімізується похибка термометричної характеристики як відхилення (розсіювання) розрахункової за-

лежності, яку беруть як калібрувальну, від істинного значення параметру в точці вимірювання. Отже формулу (1) слід записати так:

$$T = \frac{U_1 - U_2}{A^n(T) \frac{k}{e} \ln \left(\frac{I_1}{I_2} \right)}; \quad (4)$$

де $A^n(T) = b_0 + b_1T + b_2T^2 + b_3T^3 + b_4T^4$ (5)

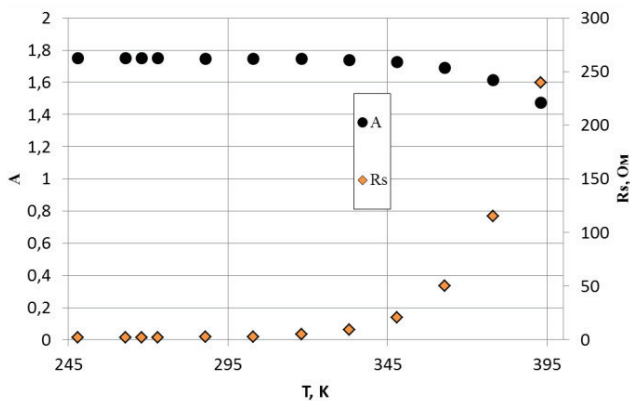


Рис. 2. Температурні залежності фактора неідеальності $A(T)$ та послідовного опору $R_s(T)$ кремнієвого діода $IN4148$

У табл. 2 наведені дані про похибку вимірювання температури ΔT за допомогою кремнієвого діода $IN4148$ у досліджуваному діапазоні температур $T = (248–393)K$ за формулами (4), (5), де $n = 0; 2; 3; 4$ – степінь апроксимаційного полінома параметра $A^n(T)$. У Табл. 3 наведено значення коефіцієнтів полінома $A^n(T)$ степеня $n = 0; 2; 3; 4$.

Таблиця 2. Похибка вимірювання температури кремнієвим діодом $IN4148$

T, K	Похибка вимірювання температури ΔT , K			
	$A^0(T)$	$A^2(T)$	$A^3(T)$	$A^4(T)$
248	0,173	1,146	-0,429	0,074
263	0,166	0,053	0,218	-0,099
268	0,163	-0,239	0,303	-0,079
273	0,160	-0,491	0,333	-0,038
288	0,148	-0,984	0,166	0,108
303	0,118	-1,041	-0,207	0,154
318	0,031	-0,624	-0,527	0,045
333	-0,221	0,238	-0,542	-0,131
348	-0,913	1,353	-0,107	-0,195
363	-2,658	2,183	0,654	0,003
378	-6,734	1,498	1,009	0,306
393	-15,501	-3,104	-0,876	-0,149

Таблиця 3. Коефіцієнти апроксимаційного полінома параметра неідеальності $A^n(T)$

b_i	$A^0(T)$	$A^2(T)$	$A^3(T)$	$A^4(T)$
b_0	1,75	1,19548	4,000874	-5,08601
b_1	0	0,00381	-0,02305	0,093651
b_2	0	-6,5E-06	7,83E-05	-0,00048
b_3	0	0	-8,8E-08	1,08E-06
b_4	0	0	0	-9,2E-10

На рис. 3 показано зміну похибки вимірювання температури кремнієвим діодом $IN4148$ у температурному діапазоні $T = (248–393)K$ за формулою (4) з поліномами $A^n(T)$ степеня $n = 0; 2; 3; 4$.

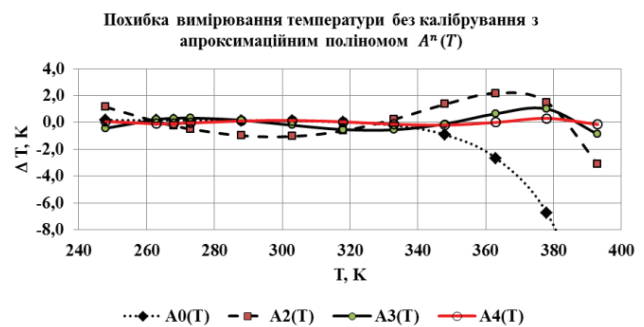


Рис. 3. Похибка вимірювання температури кремнієвим діодом $IN4148$

Якщо формулу (4) записати у вигляді $T \cdot A^n(T) = \frac{U_1 - U_2}{\frac{k}{e} \ln \left(\frac{I_1}{I_2} \right)}$, то визначення температури

полягатиме у знаходженні розв’язку рівняння степеня $(n + 1)$, а згідно з теоремою Абеля–Руффіні для поліномів п’ятого і вищих степенів неможливо знайти рішення у радикалах за коефіцієнтами цього полінома.

Таким чином, апроксимаційний поліном $A^3(T)$ третього степеня є найвищим прагматично доцільним для термометричної характеристики діодного сенсора з використанням формули В. Шоклі за (1), (2), а точність визначення температури буде в межах $\Delta T = \pm(0,5 - 0,6)K$. У широкому діапазоні температур досягти високої точності термометричної характеристики складно оскільки на різних ділянках прямої гілки ВАХ діода її кривизна не описується однією функцією [1, 4, 8, 13–16]. Врахування температурної залежності крім фактора неідеальності $A^n(T)$, а також і послідовного опору $R_s^n(T)$ не дозволяє досягти бажаного, оскільки

результуюче рівняння для розв'язку буде все одно порядку не нижче $(n + 1)$:

$$A^n(T) \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_1}{I_0}\right) + (I_1 - I_0) \cdot R_s^n(T) - (U_1 - U_0) = 0.$$

Спираючись на цей висновок, можна стверджувати, що немає потреби подавати термометричну характеристику ДСТ виключно у модифікованій формі формули В. Шоклі. Прагматичною пропозицією може бути рівняння регресії, в якому струм і напруга p - n -переходу є аргументами поліноміальної функції $T(I, U)$. У цьому полягає відмінність від відомих залежностей вигляду $U = f(T, I)$.

У цій роботі досліджено термометричну характеристику поліноміальної форми:

$$T = b_0 + b_1U + b_2I + b_3UI + b_4U^2I + b_5UI^2 + b_6U^2 + b_7I^2 \quad (6)$$

Особливістю такого способу генерації термометричної характеристики є те, що на напругу та струм не накладаються умови стабільності у досліджуваному діапазоні температур. Коефіцієнти регресії розраховують за матричною формулою: $B = (X^T X)^{-1} \cdot (X^T Y)$, де X – матриця умов експерименту; Y – матриця результатів експерименту. Матриця X формується за результатами вимірювання струму I_i та напруги U_i прямої гілки ВАХ p - n переходу за температури T_i , а матриця Y – це матриця-стовбчик температур T_i . Для калібрування метрологічної характеристики ДСТ необхідно використовувати гілки сімейства ВАХ у широкому діапазоні температур [17].

Поліноміальна модель термометричної характеристики діодних сенсорів температури

Подамо результати моделювання термометричної характеристики за цим методом на прикладі тих самих експериментальних даних, що були розглянуті вище. Дванадцять гілок сімейства ВАХ отримані у діапазоні температур $T = (248-393)K$. На кожній гілці ВАХ фіксували струм A у двадцяти точках та напругу на p - n -переході B , яка відповідає цьому струму. Таким чином, матриця X мала 240 рядків, а кількість стовпців дорівнювала кількості коефіцієнтів регресії, які належить визначити. Залежності від конкретних вимог до точності визначення температури та прагматичних міркувань користувач обирає вид полінома та набір даних для його актуалізації.

У табл. 4 наведено значення коефіцієнтів b_i регресійних поліномів T_1, T_2, T_3 за формулою (6) та її статистичні характеристики: дисперсію моделі σ_{mod}^2 термометричної характеристики $T(I, U)$, коефіцієнт детермінації R^2 та стандартну похибку вимірювання температури σ . Для розрахунку використано можливості пакета аналізу даних «Регресія» у складі Microsoft Excel.

Таблиця 4. Коефіцієнти апроксимаційного полінома термометричної характеристики кремнієвого діода IN4148

b_i	T_1	T_2	T_3
b_0	421,2634	419,90878	419,967
b_1	-360,045	-362,4862	-362,955
b_2	1964275	2283323,6	2284591
b_3	-1951246	-1053010	-1056972
b_4	-1290362	-0,776901	0
b_5	$4,34 \cdot 10^{10}$	0	0
b_6	22,29813	0	0
b_7	-0,03567	$-2,37 \cdot 10^{10}$	$-2,37 \cdot 10^{10}$
σ_{mod}^2	0,04	0,0656	0,0654
R^2	0,9999	0,9999	0,9999
σ	$\pm 0,203$ K	$\pm 0,256$ K	$\pm 0,256$ K

На рис. 4 відображено значення похибки градування термометричної характеристики ДСТ, обчисленої як різниця між модельним значенням температури за формулою (6) і температурою вимірювання ВАХ. Точність вимірювання температури за цією метрологічною характеристикою удвічі вища, ніж за формулами (4) та (5).

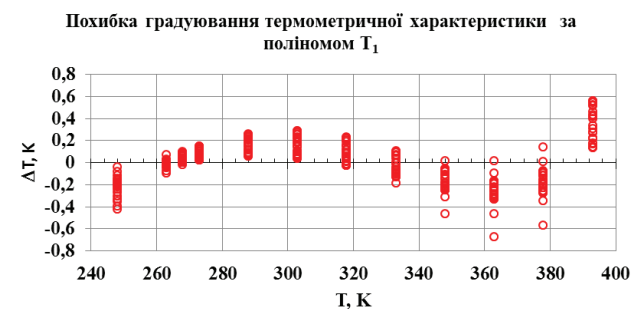


Рис. 4. Похибка градування термометричної характеристики кремнієвого діодного сенсора температури IN4148 поліномом T_1

На рис. 5 показано поверхню станів кремнієвого діода IN4148 в діапазоні струмів $I = (10-30) \text{ мкА}$. Вона ілюструє звичайний характер змін електричних сигналів у колі ДСТ.

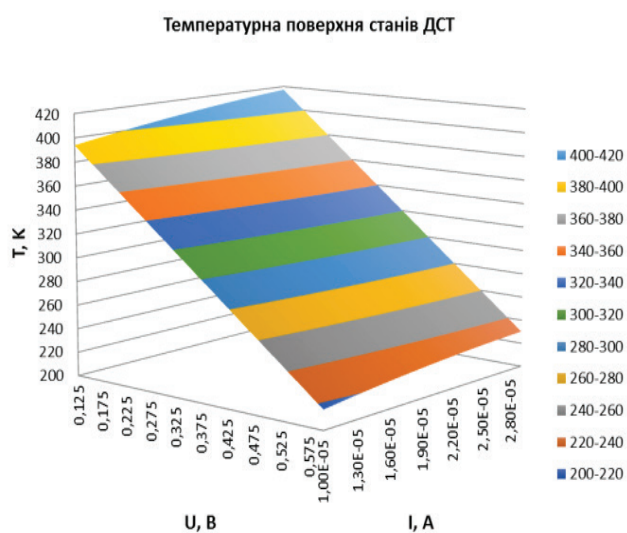


Рис. 5 Температурна поверхня станів кремнієвого діодного сенсора температури IN4148

Отримані результати обґрунтовано підтверджують прагматичну доцільність формальних математичних методів для моделювання метрологічних характеристик діодних термосенсорів з достатньою для практичного використання точністю. Вони не є засобами протиставлення моделям, створених на основі фізичних процесів перенесення заряду, а лише доповнюють і розширюють можливості адекватного опису метрологічної характеристики фізичної величини. Вибір методів і засобів моделювання залишається за користувачем.

Список літератури

- [1] Yu.M. Shwarts, V.L. Borblik, N.R. Kulish, E.F. Venger, and V.N. Sokolov, "Limiting characteristics of diode temperature sensors", *Sensors and Actuators.*, A. 86. pp. 197–205, 2000. doi:10.1016/S0924-4247(00)00445-3
- [2] Lake Shore Cryotronics. URL: <https://www.lakeshore.com/>
- [3] Шокли, Вильям, *Теория электронных полупроводников: Приложения к теории транзисторов. Пер. с англ. Под ред. и с предисл. В. П. Жузе.* – Москва : Изд-во иностр. л-ры, 1953.
[Shokli, Vil'yam, *Teoriya elektronnykh poluprovodnikov: Prilozheniya k teorii tranzistorov Per. s angl. Pod red. i s predisl. V. P. Zhuze.* – Moskva : Izd-vo inostr. lit., 1953.]
- [4] С. Зи, *Физика полупроводниковых приборов: В 2-х кн. Кн.1.* – М.: Мир, 1984. [S. Sze . *Fizika poluprovodnikovyyh priborov: V 2-h knigah. Kn.1.* – М.: Mir, 1984.]
- [5] A. Barna, and D. Horelick, "A simple diode model including conductivity modulation", *IEEE Transactions on Circuit Theory*, vol. 18, part 2, pp. 233 – 240. Mar. 1971. doi:10.1109/TCT.1971.1083246
- [6] I. E. Getreu, "Modeling the Bipolar Transistor", Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 1978, vol.1. URL: <https://picture.iczhiku.com/resource/eetop/WyKtDIrFQPigHMVB.pdf>
- [7] M. Popadic, G. Lorito, and L. K. Nanver, "Analytical Model of I–V Characteristics of Arbitrarily Shallow p–n Junctions", *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 56, no. 1, pp. 116–125, Jan. 2009, doi:10.1109/TED.2008.2009028.
- [8] V. O. Yatsuk, O. Y. Basalkevych, Y. V. Yatsuk, and A. O. Sachenko, "New Method of Dispersion Minimization of Si p–n Junction Temperature Sensors", *IEEE Sensors Applications Symposium*, 2007, pp. 1–4. doi: 10.1109/SAS.2007.374408

Висновки

У результаті досліджень ВАХ кремнієвих діодів у діапазоні температур $T = (248–393)K$ встановлено, що похибка вимірювання температури діодними сенсорами пов'язана з залежністю фактора неідеальності p – n -переходу від температури. Проведено оцінювання точності термометричної характеристики ДСТ, де цю функціональну залежність подано у вигляді апроксимаційного полінома.

Обґрунтовано, що точність визначення температури залежить від степеня полінома, а прагматично доцільною є поліноміальна апроксимація не вище третього степеня, яка забезпечує точність визначення температури в діапазоні температур $T = (248–393)K$ у межах $\Delta T = \pm(0,5–0,6)K$.

Подано альтернативну модель термометричної характеристики діодних сенсорів температури рівнянням регресії другого степеня. Аргументами функції є струм і напруга діода у режимі прямого зміщення. Стабільність струму в колі p – n -переходу не передбачається. Точність визначення температури в діапазоні температур $T = (248–393)K$ перебуває в межах $\Delta T = \pm(0,2–0,256)K$.

Надалі дослідження методів і засобів моделювання термометричних характеристик діодних сенсорів температури будуть спрямовані на підвищення точності моделі у широкому діапазоні температур, струмів і напруг, визначення меж достовірності цих характеристик, пошук нових оптимальних форм моделей метрологічних характеристик вимірювальних перетворювачів.

- [9] E.F. Venger et al., “Miniature Silicon Diode and Germanium Resistive Thermometers for Measurement of Low Temperature”, *Physics and Chemistry of Solid State*, vol. 11, no. 2, pp. 499–505, 2010. URL: http://www.microsensor.com.ua/art/FXTT_2010.pdf
- [10] T. C. Verster, “p–n Junction as an ultra linear calculable thermometer”, *Electron. Lett.*, vol. 4, no. 9, pp. 175–176, May 1968. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45803>
- [11] T. C. Verster, “Dual Transistor as Thermometer Probe”, *Review of Scientific Instruments*, no. 40, pp. 174, 1969. doi:10.1063/1.1683724
- [12] O. Kanoun, “Modeling the P–N Junction I–U Characteristic for an Accurate Calibration-Free Temperature Measurement”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 49, no. 4, pp. 901–904, 2000. doi: 10.1109/19.863946
- [13] O. Kanoun, and H.-R. Tränkler, «Kalibrationsfreie Temperaturmessung durch Parameterextraktion aus der Strom-Spannungs-Kennlinie von pn-Übergängen (Calibration-Free Temperature Measurement using Parameter Extraction from the P-N Junction Current-Voltage Characteristic)», *Technisches Messen*, vol. 67, no. 4, pp. 171–171, 2000. doi:10.1524/teme.2000.67.4.171
- [14] O. Kanoun, and H.-R. Tränkler, “Model Performance improvement for a Calibration-free Temperature Measurement Based on p-n Junctions”, *Sensors and Actuators*, vol. 101, no.3, pp. 275–282, 2002. URL: <https://www.academia.edu/10085810>
- [15] O. Kanoun, and H.-R. Tränkler, «Übersicht kalibrationsfreier Verfahren der Temperaturmessung (Survey of Calibration-Free Methods for Temperature Measurement)», *Technisches Messen*, vol. 70, no. 9, pp. 442–448, 2003. doi: 10.1524/teme.70.9.442.20247
- [16] O. Kanoun, “Kalibrationsfreie Temperaturmessung auf Basis von bipolaren Transistoren, neue Perspektiven für die Messtechnik” (“Calibration-Free Temperature Measurement Based on Bipolar Transistors, New Perspectives for Measurement Technology”), *Technique Measurement*, vol. 69, no. 4, pp. 187–187, 2002. doi:10.1524/teme.2002.69.4.187
- [17] П.О. Яганов, та Ю.М. Шварц “Апроксимация термометричної характеристики діодних сенсорів методом багатofакторного аналізу”, *Вісник НТУУ „КПІ”. Серія приладобудування*, № 30, с. 5–11, 2005. URL: <http://ela.kpi.ua:8080/bitstream/123456789/11536/1/1.pdf>
[P.O. Yaganov, ta Yu.M. Shvarcz “Aproksy`maciya termometry`chnoyi kharktery`sty`ky` diodny`x sensoriv metodom bahatofaktornoho analizu”, *Visnyk NTUU „KPI”. Seriya pry`ladobuduvannya*, # 30, с. 5–11, 2005.]
- [18] Ю.М. Шварц, П.А. Яганов, В.Г. Дзюба, “Нейросетевая аппроксимация термометрической характеристики діодного сенсора”, *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, № 5, с. 18–23, 2005. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45804>
[Yu.M. Shvarcz, P.A. Yaganov P.A., V.G. Dzyuba, “Nejrosetevaya approksimacziya termometrisheskoj kharakteristiki di`odnogo sensora”, *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, # 5, с. 18–23, 2005]
- [19] Б. Коман, “Програмна апроксимация термометричних характеристик діодного сенсора температури в ОС Android”, *Вісник Національного університета «Львівська політехніка»*, т. 843, № 1, с. 28–34, 2016. URL: <https://science.lpnu.ua/scsit/all-volumes-and-issues/volume-843-number-1-2016/programna-aproksimaciya-termometrichnih>
[B. Koman, “Programna aproksy`maciya termometry`chny`x kharktery`sty`k diodnogo sensora temperatury` v OS Android”, *Visnyk Nacional`nogo universyteta «Lvivs`ka politexnika»*, т. 843, № 1, с. 28–34, 2016.]
- [20] PCB Software Ltd. URL: <https://www.orcad.com/>
- [21] Z.R. Mohammad, and I.K. Shahidul, “Modeling Electrical Characteristics of a pn-Junction Silicon Solar Cell Using PSpice”, *Smart Grid and Renewable Energy*, vol. 3, no. 2, pp. 133–138, 2012. doi: 10.4236/sgre.2012.32019
- [22] Кеон Джон. *OrCAD Pspice. Анализ электрических цепей (+DVD)*. – М.: ДМК Пресс, СПб.: Питер, 2008. ISBN: 978-5-388-00023-1.
[Keoun Dzhon. *OrCAD Pspice. Analiz elektricheskikh cepej (+DVD)*. – М.: ДМК Press, SPb.: Piter, 2008. ISBN: 978-5-388-00023-1.]

Pavlov L.M., Yahanov P.O.

THERMOMETRIC MODEL OF DIODE TEMPERATURE SENSOR

Background. Microelectronic technologies make it possible to create structures with high sensitivity to external influences. In semiconductor microelectronics, these are structures of the type of potential barrier at the $p - n$ Junction. Silicon diode sensors have high temperature sensitivity in a wide temperature range. Both physical and formal mathematical models of the thermometric characteristic of the diode sensor have been developed. The temperature measurement error of some of these methods was not acceptable for the control of many processes. It is relevant to conduct studies of the temperature properties of the $p - n$ Junction in a non-equilibrium state to formalize the new thermometric characteristic of the diode sensor.

Objective. The purpose of the work is a model of thermometric characteristics of silicon diode sensors based on the results of measurements of volt-ampere characteristics in the temperature range.

Methods. Analysis of methods of calibration of thermometric characteristic of diode sensors by volt-ampere characteristics was carried out, factors affecting temperature measurement accuracy were revealed, regression analysis method for formation of polynomial model of thermometric characteristic was substantiated.

Results. As a result of studies of the volt-ampere characteristics of silicon diodes in the temperature range (248... 393) K, it was found that the error in measuring temperature by diode sensors is associated with the dependence of the non-ideality factor of the $p - n$ Junction on temperature. The accuracy of the thermometric characteristic is estimated, where this functional dependence is represented as an approximation polynomial.

Conclusions. An alternative model of thermometric characterization of diode temperature sensors by the second degree regression equation is presented. The arguments of the function are the current and voltage of the diode in the direct displacement mode. Current stability in the $p - n$ Junction circuit is not assumed. The temperature determination accuracy in the temperature range (248... 393) K is within $\pm (0.2... 0,256)$ K.

Keywords: diode temperature sensors; volt-ampere characteristic; non-ideality factor; regression; thermometric characteristic model.

Рекомендована Радою
факультету електроніки
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
20 грудня 2021 року

Прийнята до публікації
27 червня 2022 року