

УДК 536.53

## ВИСОКОЯКІСНІ СЕНСОРИ ТЕМПЕРАТУРИ НА ОСНОВІ КРЕМНІЄВОГО p-n-ПЕРЕХОДУ

(За матеріалами доповіді на конференції СЕМСТ-2)

*В. М. Василюк<sup>1</sup>, А. М. Леновенко<sup>2</sup>, Н. О. Ковальчук<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> ВАТ “Укртранснафта”, вул. Артема, 60, м. Київ, 04050,

тел.: 38 044 201 57 05, факс: 38 044 201 57 78, e-mail: office@ukrtransnafta.com

<sup>2</sup> Львівський національний університет ім. Ів. Франка, вул. Університетська, 1, Львів, 79000

тел.: 38 032 239 92 85, факс: 38 032 239 92 85, e-mail: zlet@lviv.farlep.net

### Анотація

#### ВИСОКОЯКІСНІ СЕНСОРИ ТЕМПЕРАТУРИ НА ОСНОВІ КРЕМНІЄВОГО p-n-ПЕРЕХОДУ

*В. М. Василюк, А. М. Леновенко, Н. О. Ковальчук*

На основі аналізу процесів в p-n-переходах серійного виробництва, доведено, що найбільше придатними для побудови сенсорів температури, здатних конкурувати з платиновими термоперетворювачами, є кремнієві p-n-переходи, технологія виробництва яких є самою досконалою в порівнянні з іншими електронними компонентами. Сформульовано критерії, яким повинні відповідати p-n-переходи для побудови високостабільних термосенсорів. Синтезована фізико-математична модель дозволяє за двома реперними точками відтворювати температурну характеристику сенсора в широкому діапазоні температур з точністю порядку 0,5°C.

**Ключові слова:** сенсор, p-n-перехід, модель, температура.

### Abstract

#### HIGH-QUALITY TEMPERATURE SENSORS ON THE SILICON p-n-JUNCTION BASIS

*V. M. Vassuliuk, A. M. Lenovenko, N. O. Koval'chuk*

The analysis of processes in the p-n-junction mass production has proved that the silicon p-n-junctions are the most suitable ones for constructing temperature sensors, which are able to compete with platinum thermal converters. The technology of their production is the most accurate one in comparison with other electronic components. Criteria, which the p-n-junctions must correspond to during the construction of high-stable thermal sensors, have been formulated. A synthesized physic and mathematical model makes possible to reproduce temperature characteristic of the sensor with-in a wide temperature range at the 0,5°C sequence exactitude following two reference points.

**Keywords:** sensor, p-n-junction, model, temperature.

## Аннотация

ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫЕ СЕНСОРЫ ТЕМПЕРАТУРЫ  
НА ОСНОВАНИИ КРЕМНИЕВОГО p-n-ПЕРЕХОДА

В. М. Василюк, А. М. Леновенко, Н. О. Ковальчук

На основании анализа процессов в p-n-переходах серийного производства, доказано, что наиболее пригодными для построения сенсоров температуры, способных конкурировать с платиновыми термопреобразователями, являются кремниевые p-n-переходы, технология производства которых наиболее совершенна по сравнению с другими электронными компонентами. Сформулированы критерии, которым должны соответствовать p-n-переходы для создания высокостабильных термосенсоров. Синтезированная физико-математическая модель позволяет за двумя реперными точками воспроизводить температурную характеристику сенсора в широком диапазоне температур с точностью порядка 0,5°C.

**Ключевые слова:** сенсор, p-n-переход, модель, температура.

Найбільш перспективним шляхом при створенні вискоефективних сенсорів для вимірювальних засобів фізичних величин є використання явищ і фундаментальних констант на квантовому рівні. Одним із них є використання p-n-переходу для вимірювання температури. Цьому питанню присвячено багато публікацій в межах України і за кордоном. Але із-за бажання швидше реалізувати цю ідею на практиці, не приділялось достатньої уваги глибокому аналізу процесів і створенню досконалої фізико-математичної моделі p-n-переходу в його нетрадиційному застосуванні в якості термосенсора. Сенсори на основі кремнієвих p-n-переходів мають високу чутливість, малоінерційні, мініатюрні, вібростійкі, робочий діапазон від 1К до 470К, відзначаються високою часовою стабільністю термометричних характеристик, широкодоступні і дешеві.

В представленій роботі на основі аналізу процесів в p-n-переходах серийного виробництва, доведено, що при умові правильного вибору типу переходу, його технологічних і електричних параметрів та встановлення оптимального робочого режиму зміщення, найбільше придатними для побудови сенсорів температури, здатних конкурувати з платиновими термоперетворювачами є кремнієві p-n-переходи, технологія виробництва яких є самою досконалою в порівнянні з іншими електронними компонентами. Сформульовано критерії, яким вони повинні задовольняти для побудови вискоефективних термосенсорів в режимі прямого зміщення постійним струмом стабільної величини. Величина струму зміщення вибирається з міркувань

мінімізації саморозігріву сенсора та можливості утримання його вискоефективним під час експлуатації сенсорів. Було встановлено, що компромісним рішенням може бути величина  $I_{np} \approx 0,05 \div 0,1 \text{ mA}$ .

При такій малій величині прямого зміщення в результаті зростання концентрації носіїв в p-n-переході відбувається рекомбінація нерівноважних носіїв, що приводить до появи струму рекомбінації, який може бути суттєвим в порівнянні із складовою дифузійного струму. В зв'язку з цим, при аналізі процесів в p-n-переході необхідно враховувати крім дифузійного струму рекомбінації.

Розглянемо фактори, що визначають стабільність температурних характеристик сенсорів на основі p-n-переходів. Основний внесок дає нестабільність струмів насичення  $I_S$  і рекомбінації  $I_R$ . Повний струм для ступінчатого несиметричного p-n-переходу описується рівнянням Шоклі

$$I_{np} = I_S \left( e^{\frac{U_{np}}{\phi_T}} - 1 \right) + I_R \left( e^{\frac{U_{np}}{2\phi_T}} - 1 \right), \quad (1)$$

де  $I_S$  — струм насичення (тепловий струм);

$I_R$  — струм рекомбінації;

$U_{np}$  — напруга на прямозміщеному p-n-переході;

$I_{np}$  — струм прямого зміщення p-n-переходу;

$\phi_T = \frac{k T}{q}$  — тепловий потенціал;

$k$  — const Больцмана;

$T$  — абсолютна температура в К;

$q$  — заряд електрона.

Струми  $I_S$  та  $I_R$  залежать від фізико-хімічних властивостей матеріалу та геометричних параметрів р-п-переходу і впливають на стабільність характеристик при  $T=const$ . При подальшому аналізі прийнято за базову температуру  $T = T_o = 300K$  і всі параметри при цій температурі позначаються нульовим індексом.

Запишемо струми при температурі  $T_o$

$$I_{So} = \frac{|q|P_{no}SD_o}{Lth\left(\frac{W}{L}\right)}; \quad (2)$$

$$I_{Ro} = \frac{|q|\varphi_T P_{no}WD_o}{(\Delta\varphi_o - U_{np})L^2}; \quad (3)$$

де  $D_o = D|_{T=T_o} = D\sqrt{\frac{T}{T_o}}$  або  $D = D_o\sqrt{\frac{T_o}{T}}$ ;  $(4)$

$D$  — коефіцієнт дифузії;

$S$  — площа р-п-переходу;

$P_{no}$  — рівноважна концентрація неосновних носіїв в базі;

$\Delta\varphi_o$  — потенціальний бар'єр р-п-переходу;

$L$  — дифузійна довжина;

$W$  — геометрична ширина бази р-п-переходу;

Із аналізу виразів (2) і (3) одержимо, що основним дестабілізуючим параметром є дифузійна довжина  $L$ , яка залежить від багатьох факторів

$$L = \sqrt{D \tau_{ef}}, \quad (5)$$

де  $\tau_{ef} = \frac{\tau_v \tau_s}{\tau_v + \tau_s}$  — ефективний час життя неосновних носіїв в базі;

$\tau_v$  — постійна часу об'ємної рекомбінації;

$\tau_s$  — постійна часу поверхневої рекомбінації.

Коефіцієнт дифузії згідно (4) залежить від температури,  $\tau_v$  — залежить від дефектів кристалічної ґратки, чистоти кристала та інше,  $\tau_s$  — відображає вплив поверхні, де найчастіше присутні дефекти ґратки, наявні різного типу плівки (адсорбовані гази, окиси тощо). Для усунення впливу вказаних факторів і досягнення стабільності характеристик необхідно, щоб у використаному р-п-переході виконувалась умова

$$W \ll L, \quad (6)$$

тобто повинна бути тонка низьколегована база.

Тоді, врахувавши, що  $th\left(\frac{W}{L}\right) \approx \frac{W}{L}$ , можна записати

$$I_{So} = \frac{|q|SD_oP_{no}}{W};$$

$$I_{Ro} = \frac{|q|\varphi_T SD_oP_{no}}{\Delta\varphi W}. \quad (7)$$

В цих виразах не фігурує дифузійна довжина і струми  $I_{So}$  та  $I_{Ro}$  не залежать від перерахованих вище дестабілізуючих факторів, що відкриває шлях до побудови високостабільних термосенсорів.

Такі умови найкраще задовольняє емітерний перехід надвисокочастотного транзистора з великим коефіцієнтом передачі струму бази, в якого колектор замкнений на базу. Знайдемо залежність  $U_{np} = f(T)|_{I_{np}=const}$  врахувавши умови (6) і (7).

Температурна залежність струмів насичення і рекомбінації описується відомими формулами

$$I_S(T) = I_{So} \exp\left[\frac{\theta|q|(T-T_o)}{kTT_o}\right]; \quad (8)$$

$$I_R(T) = I_{Ro} \exp\left[\frac{\theta|q|(T-T_o)}{2kTT_o}\right]. \quad (9)$$

де  $\theta = m\vartheta_T\varphi_s$ ;  $\vartheta_T = 1 \div 0,5$ ;

$m$  — коефіцієнт, що враховує дрейфову складову струму;

$\varphi_s$  — ширина забороненої зони напівпровідника вибраного р-п-переходу (для кремнію  $\varphi_s = \varphi_{s|T=300K} = 1,12$  В).

Ширина забороненої зони при зростанні температури зменшується з температурним коефіцієнтом  $G = (3 \div 4) \cdot 10^{-4}$  В/град.

В умовах експлуатації сенсор працює, як правило, при температурі нижчій від критичної, тому для запропонованої моделі  $\vartheta_T = 1$ . Експериментально встановлено, що для кремнієвого р-п-переходу з тонкою низьколегованою базою в діапазоні 213K÷473K коефіцієнт  $m$  змінюється в межах  $m = 1,08 \div 1,22$ .

При виконанні умови (6), вже при малому струмі і низьколегованій базі спостерігається високий рівень інжекції.

Це приводить до додаткових ефектів у базі:

— через порушення рівноваги об'ємних зарядів в базі утворюється електричне поле поблизу границі переходу і, як наслідок, з'являється дрейфова складова струму, яка зростає при збільшенні температури. Цей ефект враховується коефіцієнтом  $m$ ;

— збільшення концентрації носіїв побли-

зу границі переходу приводить до зменшення опору бази при зростанні температури.

Вважаючи, що рівень інжекції лінійно зростає з підвищенням температури, зміну опору приблизно можна описати за формулою:

$$r_{\delta}(T) = \frac{r_{\delta 0}}{\delta} \ln(1 + \delta). \quad (10)$$

Експериментально встановлено, що в діапазоні 213Кч473К  $\delta(T)$  описується залежністю

$$\delta(T) = 0,3846 \cdot 10^{-3} T + 1,118019. \quad (11)$$

Тоді

$$r_{\delta}(T) = \frac{230,248 \ln(1 + \delta)}{\delta}, \quad (12)$$

де  $r_{\delta 0} = 230,248$  Ом — нормуючий коефіцієнт.

Звідси одержимо:

$$U_{np}(T) = I_{np} r_{\delta}(T). \quad (13)$$

Розв'язавши трансцендентне рівняння (1) відносно  $U_{np}$  і підставляючи (8) та (9), а також беручи до уваги (13), після перетворень одержимо рівняння, що описує температурну залежність напруги на прямозміщеному р-п-переході при  $I_{np} = const$ . У виразі враховано всі фізичні величини і зміни параметрів від температури в кремнієвому р-п-переході, який задовольняє умові (6) і використовується в якості сенсора.

$$U_{np} = r_{\delta}(T) I_{np} - \frac{\theta(T)(T - T_0)}{T_0} + \frac{2kT}{|q|} \ln \left[ \frac{\sqrt{I_{Ro}^2 + 4I_{So} I_{np}} - I_{Ro}}{2I_{So}} \right]. \quad (14)$$

Залежність (14) представляє собою фізико-математичну модель температурного сенсора на базі кремнієвого р-п-переходу, яка дозволяє відтворити температурну характеристику за двома реперними точками, а також аналізувати всі процеси і параметри сенсора.

На рис.1 приведені теоретично розрахована за допомогою синтезованої фізико-математичної моделі (14) і експериментальна температурні характеристики для кремнієвого сенсора на базі р-п-переходу.

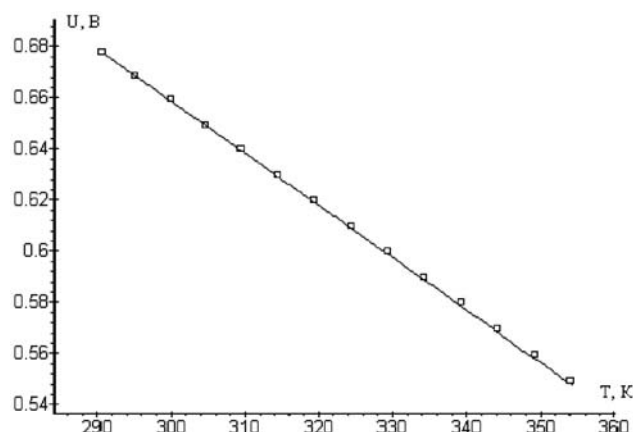


Рис. 1. Залежність напруги на прямозміщеному кремнієвому р-п-переході від температури при  $I_{np} = 0,1$  мА: а) суцільна лінія — теоретична залежність, б) кубики — значення експериментально знятої характеристики.

## Висновки

В результаті виконаних досліджень одержані наступні результати:

— температурні сенсори на основі кремнієвих р-п-переходів, які задовольняють критеріям сформульованим в роботі, є перспективними і за стабільністю не поступаються платиновим термоперетворювачам та переважають їх по ряду інших параметрів;

— синтезована фізико-математична модель, яка може використовуватись для моделювання і теоретичного аналізу сенсорів;

— модель дозволяє за двома реперними точками відтворювати практичну температурну характеристику сенсора з точністю  $\pm 0,5^\circ\text{K}$  в діапазоні від мінус  $60^\circ\text{C}$  до  $200^\circ\text{C}$ .

## Література

1. Пэт О'Нил, Карл Деррингтон. Транзисторы в качестве датчиков температуры // Электроника, 1979. — N21.
2. Леновенко А.М., Василюк В.М., Капіган В.І. Електронний цифровий термометр. — Патент №23648А. — 1998.
3. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. — М.: Энергия, 1977(1963).
4. Akira Ohte and Michiaki Yamagata. A Precision Silicon Transistor Thermometer // IEEE, Trans. of Instrum. and Measur. — 1977. — Vol. IM. — 26 Dec.