

УДК 621.315.596

## ВИЗНАЧЕННЯ ПОЗИЦІЙНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ КООРДИНАТНОГО ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧА В УМОВАХ ТЕПЛОВОГО ДРЕЙФУ

*П. О. Яганов, О. В. Борисов*

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, 03056,  
м.Київ, просп.Перемоги, 37. Тел. (044) 241-86-07, E-mail: Yaganov@ee.ntu-kpi.kiev.ua

### Анотація

#### ВИЗНАЧЕННЯ ПОЗИЦІЙНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ КООРДИНАТНОГО ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧА В УМОВАХ ТЕПЛОВОГО ДРЕЙФУ

*П. О. Яганов, О. В. Борисов*

Досліджено функціонування оптоелектронного перетворювача мікропереміщень, виготовленого за інтегральною технологією кремнієвих структур з діелектричною ізоляцією (КСДІ), в умовах дії теплових збурень. Запропоновано спосіб ідентифікації позиційної характеристики в умовах температурного дрейфу і визначення координати, що вимірюється. Для цього використовують термометричні характеристики фотоперетворювача, за допомогою яких встановлюють температуру координаточутливого елемента. Це дає змогу ідентифікувати позиційну характеристику в умовах температурного дрейфу і підвищити точність вимірювання координати. Для апроксимації позиційної характеристики використано метод регресійного аналізу.

**Ключові слова:** оптоелектронний перетворювач мікропереміщень, температурний дрейф, позиційна характеристика

### Аннотация

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЗИЦИОННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ КООРДИНАТНОГО ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ТЕПЛОВОГО ДРЕЙФА

*П. А. Яганов, А. В. Борисов*

Исследовано функционирование оптоэлектронного преобразователя микроперемещений, изготовленного по интегральной технологии кремниевых структур с диэлектрической изоляцией (КСДИ), в условиях действия тепловых возмущений. Предложен способ идентификации позиционной характеристики и определение измеряемой координаты при температурном дрейфе. Для этого используют термометрические характеристики фотопреобразователя, с помощью которых устанавливают температуру координаточувствительного элемента. Это позволяет идентифицировать позиционную характеристику в условиях температурного дрейфа и повысить точность измерения координаты. Для аппроксимации позиционной характеристики использован метод регрессионного анализа.

**Ключевые слова:** оптоэлектронный преобразователь микроперемещений, температурный дрейф, позиционная характеристика

**Abstract****DETERMINATION OF POSITIONAL CHARACTERISTIC OF A COORDINATE PHOTOTRANSUDCER UNDER THERMAL DRIFT CONDITIONS***P. A. Yaganov, A. V. Borysov*

The paper is devoted to investigation of an optoelectronic transducer of micro-displacements, fabricated by integrated technology of silicon structures with dielectric insulation (SSDI), under temperature variation conditions. A new technique is suggested for identification of the positional characteristic and for determining the measured coordinate during temperature drifts. To do this, we use the thermometric characteristics of a phototransducer, making it possible to set the coordinate-sensitive element temperature. All this permits to identify the positional characteristic at temperature drift and to improve the coordinate measurement accuracy. The method of regressive analysis is applied for approximation of the positional characteristic.

**Key words:** optoelectronic transducer of micro-displacements, temperature drifts, positional characteristic.

**Вступ**

Розвиток мікроелектронних технологій сприяв появі високочутливих інтегральних структур, на основі яких створено різноманітні вимірювальні перетворювачі сигналів. Один з багаточисельних класів складають напівпровідникові фотоперетворювачі. Це, насамперед, фоторезисторні, фотодіодні та фототранзисторні структури, вихідний сигнал яких визначається освітленістю світлочувливої області. Якщо освітленість залежить, наприклад, від координати світлової плями на поверхні цієї області, то така структура є координаточувливою. Забезпечивши зв'язок між елементом, переміщення якого необхідно вимірювати, і положенням світлової плями на поверхні, отримують координатний фотоперетворювач. Такі пристрої складають основу різноманітних датчиків точного позиціонування, а на їх базі створюють інші вимірювальні перетворювачі неелектричних величин: прискорення, тиску тощо.

Високу координатну чутливість мікроелектронних фотоперетворювачів забезпечують, зокрема, схемотехнічно, інтегруючи в одній підкладці разом з мікроелектронним первинним перетворювачем підсилюючий пристрій. Наприклад, датчик лінійних переміщень К849ПП1 має в своєму складі фотодіодну позиційно чутливу оптичну та попередній підсилювач струму. Позиційно чутлива інтегральна мікросхема КБ1130ПП1-3 з широтно-імпульсною модуляцією вихідного сигналу крім власне координатного фотоприймача має у своєму складі підсилювач постійного струму,

схему зміщення рівня, тригер Шмітта, формувач прямокутних імпульсів. Деякі типи координатних перетворювачів інтегрують сигнальний процесор, в якому "прошивають" нормування сигналу, формули для проміжних обчислень вимірюваних координат, порівняння з еталонами (позиційний датчик GD2D12 фірми Sharp, Японія) [1]. Для підвищення точності вимірювання координати у фотоперетворювачах використовують прецизійні чутливі елементи (фоторезистори з точністю 0,01%), а підсилювачі повинні мати малі дрейф нуля, струми витоку та напругу зміщення.

Очевидно, що реалізація вищезазначених пристроїв, які є складними мікроелектронними структурами, вимагає високої технологічної культури виготовлення, ретельного настроювання та регулювання, забезпечення постійності визначальних параметрів самого попереднього підсилювача. Використання схемотехнічно складних пристроїв вимагає забезпечення температурної стабільності визначальних параметрів не тільки первинного вимірювального перетворювача, але і пристрою перетворення сигналу, інтегрованого з ним в одній підкладці. У вимірювальній системі завжди актуальною є задача точного визначення кількісних оцінок фактора, що вимірюється, в умовах зовнішніх неконтрольованих впливів, а температурний дрейф інтегральних мікросхем завжди створював проблему, вирішення якої розглядали як одну з найважливіших.

Для покращення метрологічних характеристик координатних сенсорів обирають різні шляхи, які є найбільш ефективними в конкрет-

них умовах експлуатації. Серед них розглядають як технологічні, що передбачають внесення змін в конструкцію перетворювача, так і схемотехнічні. Останні не передбачають конструктивних змін, але пов'язані з уведенням у вторинні каскади обробки сигналу додаткових елементів компенсації дрейфу [2], що часто тягне за собою значне ускладнення апаратної частини датчика, яке в кінцевому варіанті може не відповідати ні технічному завданню, ні економічній доцільності.

Загалом, можна виділити два принципово різних методологічних підходи до вирішення проблеми точності вимірювання фізичної величини в умовах зовнішнього збурюючого впливу. Згідно з першим дрейф інформаційного сигналу під дією зовнішньої завади намагаються компенсувати, наприклад, диференціальним увімкненням або уведенням зворотнього зв'язку. Інший підхід передбачає точне врахування у вихідному сигналі складової, сформованою під дією зовнішньої завади, з метою подальшої корекції.

В сенсорній мікроелектроніці є можливість використати переваги обох методів. Для цього топологію вимірювального перетворювача проектують так, щоб забезпечити інтеграцію в одній підкладці і мікроелектронного сенсора, і елементи схеми компенсації. Прилад в такому виконанні є технологічним, має мінімальну кількість вузлів і довжину міжз'єднань, знаходиться під дією тих самих впливів, що і чутливий елемент. Додаткові переваги створює вдаль алгоритм обробки вихідної інформації або представлення її у формі, вільній від впливів різноманітних завад, врахування механізмів переносу зарядів та особливостей функціонування пристрою, вибір робочої точки вольт-амперної характеристики тощо. Крім того, чим простіше схемо-технологічне рішення координатного фотоперетворювача, тим ефективніше вирішується проблема визначення координати в умовах температурного дрейфу.

В даній роботі розглядається схемотехнічна та технологічна реалізація малогабаритного високочутливого оптоелектронного координатного перетворювача на основі кремнієвої структури з діелектричною ізоляцією (КСДІ), який завдяки використанню особливостей функціонування пристрою має потенційно вищу точність визначення координати в умовах температурного дрейфу.

### Схемотехнічне обґрунтування

Сучасні мікроелектронні технології зорієнтовані, перш за все, на мініатюризацію напівпровідникових структур. Поєднати високу чутливість координатного фотоперетворювача і його мікромініатюрне виконання за інтегральною технологією можна, якщо в якості фототодуку на зміну освітлення використовувати не фотострум, а фото-ЕРС розімкненого кола, яка виникає на освітленому  $p-n$  переході. В [3] теоретично обґрунтовано і практично підтверджено, що в цьому режимі фото-ЕРС не залежить від площі  $p-n$  переходу, а визначається фундаментальними параметрами напівпровідника: шириною забороненої зони, власною концентрацією носіїв заряду, концентрацією основних та неосновних носіїв заряду, часу їх життя тощо. Якщо в напівпровідниковій фоточутливій структурі забезпечити послідовне з'єднання заданого числа  $p-n$  переходів у фотобатарей, то результуюча фото-ЕРС, рівна сумі фото-ЕРС на кожному  $p-n$  переході, досягне значень, достатніх для управління пристроєм з потенціалокерованим входом, наприклад, МОН-транзистором. Розміри ж  $p-n$  переходів і фотобатарей можуть бути мінімальними і обмежуватись практично тільки роздільною здатністю фотолітографічного і технологічного процесів мікроелектронного виробництва.

Функціонування координатного фотоперетворювача пояснює схема на рисунку 1. Координаточутливою структурою є фотобатарея, що утворена послідовно з'єднаними  $p-n$  переходами, увімкненими в коло затвору МОН-транзистора. При освітленні поверхні фотобатарей випромінюванням від джерела  $D$  виникає фото-ЕРС, достатня для ефективного керування роботою МОН-транзистора.

Оскільки вхідний опір МОН-транзистора великий ( $10^{12}$  Ом і більше), то режим роботи фотобатарей практично є режимом розімкненого кола. Фото-ЕРС визначається як освітленістю, так і кількістю  $N$   $p-n$  переходів у фотобатарей, а модулюється переміщенням світлового екрана з оптичною щільною паралельно поверхні фотобатарей вздовж координати  $X$ . Мірою координати, що вимірюється, є напруга стік-витік МОН-транзистора  $U_{вих}(X)$ . Опори  $R_{3M}^1$  та  $R_{3M}^2$  використовують для вибору робочої точки МОН-транзистора.

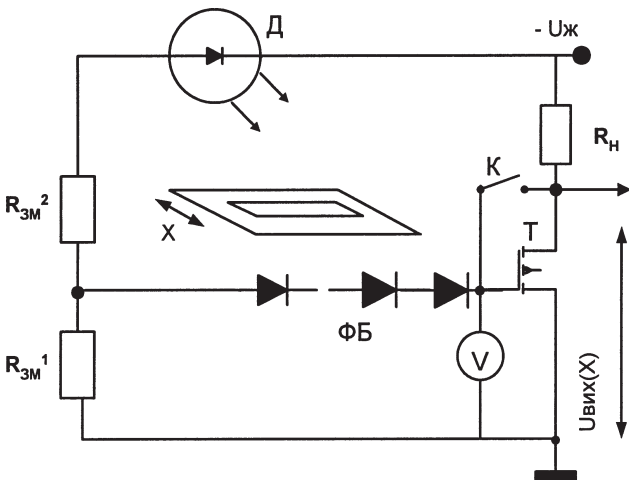


Рисунок 1. Схема електрична принципова координатного фотоперетворювача

Фото-ЕРС розімкненого кола освітленого *p-n* переходу

$$U^{\phi}_{pn} = \frac{mkT}{q} \ln\left(\frac{I^{\phi}}{I_0} + 1\right) \approx \frac{mkT}{q} \ln\left(\frac{I^{\phi}}{I_0}\right), \quad (1)$$

де  $I_0 = qN_c N_v \left( \frac{1}{N_A \sqrt{\tau_n}} + \frac{1}{N_D \sqrt{\tau_p}} \right) \cdot \exp\left(-E_g/kT\right)$  — струм насичення *p-n* переходу,

$$I^{\phi} = \eta q \frac{P_{опт}}{h\nu} \text{ — струм фотогенерації, прямо}$$

пропорційний числу фотонів  $n = \frac{P_{опт}}{h\nu}$ , що падають на *p-n* перехід;

*m* — коефіцієнт ідеальності *p-n* переходу.

В напівпровідниковому координатночут-

ливому фотоелементі кількість фотонів  $\frac{P_{опт}}{h\nu}$  прямо пропорційна площі відкритої для опромінювання поверхні *p-n* переходу. Модуляція кількості фотонів здійснюється переміщенням прямокутної світлової плями в напрямку *X* паралельно поверхні фотоелементу. Площа опромінювання  $S = XY$ , де *Y* — розмір фоточутливої області в напрямку координати *Y*. Довжина плями в напрямку координати *Y* обирається більшою, ніж довжина світлочутливої області координатночутливого фотоелемента, залишаючись стабільною. В такому

разі  $\frac{P_{опт}}{h\nu} = kX$ , де *k* — коефіцієнт пропорцій-

ності. Тому  $U^{\phi}_{pn} = \frac{mkT}{q} \ln(KX)$ . На фотобата-

реї з *N* послідовно увімкнених *p-n* переходів

$$U^{\phi Б} = N \cdot \frac{mkT}{q} \ln(KX).$$

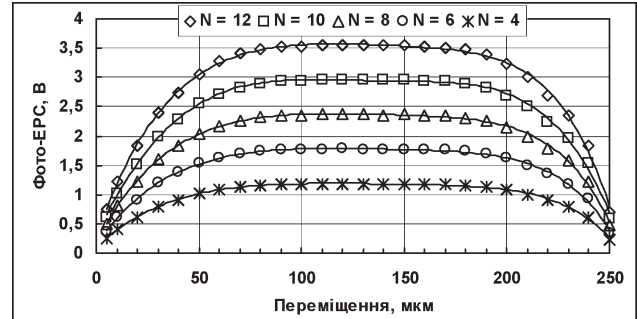


Рисунок 2. Координатна характеристика фотобатареї для різного числа *N* послідовно увімкнених *p-n* переходів (*T* = 300 К)

На рисунку 2 подані координатні характеристики фотобатареї з різною кількістю *N* *p-n* переходів. Розмір фоточутливої поверхні одного *p-n* переходу 100 x 100 мкм<sup>2</sup>. В світловому режимі напруга на затворі МОН-транзистора визначається напругою зміщення  $U_{3M}^1$ , що падає на опорі  $R_{3M}^1$ , та фото-ЕРС фотобатареї  $U^{\phi}_{pn}$ :  $U_3 = U_{3M}^1 + U^{\phi}_{pn}$ . Найбільший вплив на вихідний сигнал МОН-транзистора має фото-ЕРС фотобатареї.

На рисунку 3 подана вихідна позиційна характеристика координатного фотоперетворювача з фотобатареями, що налічують різну кількість *N* послідовно увімкнених *p-n* переходів. Висока координатна чутливість фотоперетворювача (950 мВ/мкм для *N* = 10) звужує діапазон координатної характеристики до 7 мкм. В широкому діапазоні вимірювань від 3 мкм до 73 мкм позиційна чутливість значно менша (32 мВ/мкм для *N* = 2). Тому в залежності від задачі слід використовувати фотобатареї з різною кількістю *p-n* переходів або керувати коефіцієнтом передачі по напрузі МОН-транзистора. Позиційні характеристики, що зображені на рисунку 3, отримані при наступних параметрах схеми перетворення: опір навантаження  $R_H = 10$  КОм, напруга живлення  $U_{ж} = -10$  В, напруга зміщення  $U_{3M} = 4$  В, порогова напруга МОН-транзистора  $U_{пор} = 4$  В.

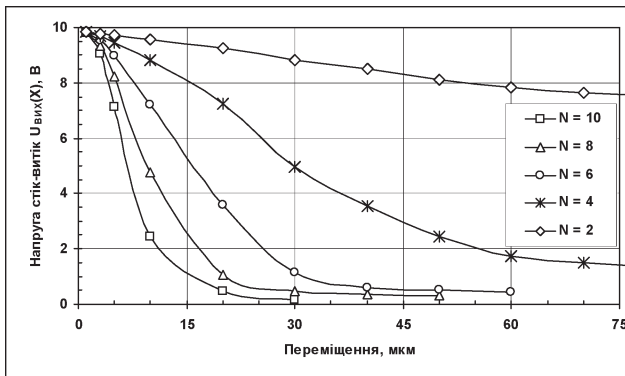


Рисунок 3. Позиційна характеристика координатного перетворювача з різною кількістю  $N$   $p$ - $n$  переходів фотобатареї ( $T = 300$  К)

### Метод калібрування координатного фотоперетворювача

Позиційна характеристика (ПХ) координатного фотоперетворювача визначається фото-ЕРС фотобатареї, включеної у затворне коло МОН-транзистора. Її значення є не тільки функцією координати  $X$  світлової плями на поверхні перетворювача, якою модулюється світловий потік, але і температури  $T$  фотобатареї:  $U_{вих} = \varphi(U^\Phi) = f(X, T)$ . Як відомо, фото-ЕРС розімкненого кола фотобатареї  $U^\Phi = U(\Phi(X), T_0) - \alpha(\Phi) \cdot (T - T_0)$ , де  $U(\Phi(X), T_0)$  — фото-ЕРС в координаті  $X$  і при температурі  $T_0$ ,  $\alpha(\Phi)$  — температурний коефіцієнт спадання фото-ЕРС, залежний від світлового потоку  $\Phi(X)$  [4].

На рисунку 4 подано експериментальну залежність фото-ЕРС  $U^{\Phi_{pn}}(X, T)$  позиційночутливої фотобатареї ( $N = 12$ ) від переміщення світлової плями  $X$ , яка формується як функція координати чутливого елемента, при різних температурах підкладки. Розмір фоточутливої області фотобатареї  $100 \times 1900$  мкм<sup>2</sup>, розмір світлової плями  $2,537 \times 0,195$  мм<sup>2</sup>. Отже, фото-ЕРС фотобатареї не визначає однозначно координату  $X$  чутливого елемента, оскільки містить інформацію як про неї, так і про температуру  $T$  фотобатареї. Тому у вихідному сигналі датчика мікропереміщень необхідно виділити складову, пов'язану тільки з вимірюваним параметром  $X$ .

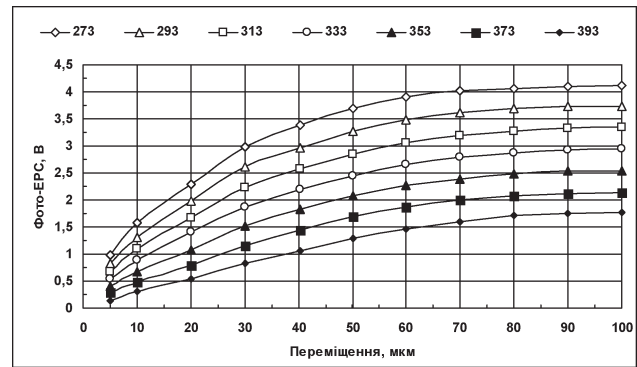


Рисунок 4. Позиційна характеристика фотобатареї при різних температурах

Встановлення температури  $T$  мікроелектронної фотобатареї пов'язане з проблемами, які обумовлені її малими розмірами. Припущення, що її температура рівна температурі навколишнього середовища, є наближеним через динамічні умови функціонування пристрою і складність врахування теплового опору між областю локалізації фотобатареї і навколишнім середовищем. Вимірювання координати в таких умовах супроводжується систематичною випадковою похибкою. Проте врахувати ці обставини з метою встановлення достовірних параметрів можна, використовуючи термометричні властивості даної координаточутливої структури.

На етапі калібрування координатного фотоперетворювача необхідно контролювати температуру фотобатареї. Для цього встановлюють залежність падіння напруги прямозміщених  $p$ - $n$  переходів, які входять до складу фотобатареї, від температури  $U_{pn}(T)$ , а також фото-ЕРС розімкненого кола фотобатареї  $U^{\Phi_{pn}}(X, T)$  від координати  $X$  та температури  $T$ . Вимірювання термометричної характеристики  $U_{pn}(T)$  проводять одночасно з вимірюванням залежності  $U^{\Phi_{pn}}(X, T)$  шляхом короткочасної комутації ключем  $K$  (рис. 1) електричного кола, в якому  $p$ - $n$  переходи фотобатареї будуть функціонувати в режимі температурних сенсорів [5].

При проведенні цього експерименту температуру  $T$  та координату  $X$  не фіксують на певних рівнях, а змінюють в довільному порядку в області допустимих значень, заносючи кожного разу результати вимірювання у таблицю даних. При цьому передбачається,

що за час комутації і фіксації напруг  $U_{pn}(T)$ ,  $U^{\Phi}_{pn}(X, T)$ , температури  $T$  та координати  $X$  умови проведення експерименту не змінюються. В результаті експерименту визначають поверхню станів фотобатарей в умовах температурного дрейфу (рис.5).

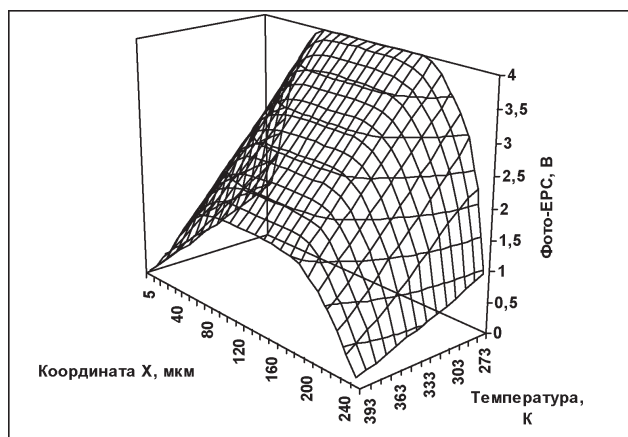


Рисунок 5. Координатно-температурна поверхня станів фотобатарей

Для отримання однозначної відповідності координати і вихідної напруги на етапі вимірювання необхідно встановити вихідну ПХ з сімейства функцій, відградуйовану в тих умовах, в яких відбувається вимірювання параметру  $X$ . Це нескладно зробити, вимірюючи координату та температуру так само, як це відбувалось на етапі калібрування з тією лише різницею, що в якості аргументів будуть виступати фото-ЕРС фотобатарей  $U^{\Phi}_{pn}$  та напруга на прямозміщених  $p-n$  переходах  $U_{pn}$ :  $X = \Psi(U^{\Phi}_{pn}, T)$ ,  $T = \Phi(U_{pn})$ . Розгортаючи ланцюжок отримання інформації в зворотньому порядку, встановлюють залежність функції

$X = F(U^{\Phi}_{pn}, U_{pn})$ , в якій фото-ЕРС фотобатарей  $U^{\Phi}_{pn}$  та напруга на прямозміщених  $p-n$  переходах  $U_{pn}$  входять як аргументи.

Залежність координати світлової плями на поверхні фотобатарей від фото-ЕРС розіркненого кола та напруги на прямозміщених  $p-n$  переходах фотобатарей моделюють одним з чисельних методів. На рисунку 6 подана поверхнева діаграма функції

$$X(U^{\Phi}_{pn}, U_{pn}) = b_0 + b_1 U^{\Phi}_{pn} + b_2 U_{pn} + b_3 \cdot (U^{\Phi}_{pn})^a \cdot (U_{pn})^b + b_4 (U^{\Phi}_{pn})^c + b_5 (U_{pn})^d + b_6 (U^{\Phi}_{pn})^e + b_7 (U_{pn})^f,$$

коефіцієнти якої визначено методом регресійного аналізу з подальшою параметричною оптимізацією. В таблиці 1 наведено числові значення параметрів функції  $X(U^{\Phi}_{pn}, U_{pn})$ , дисперсію  $\sigma^2$  та середньоквадратичне відхилення апроксимації  $\sigma$  з середньоквадратичною похибкою  $\sigma = \pm 1,52$  мкм.

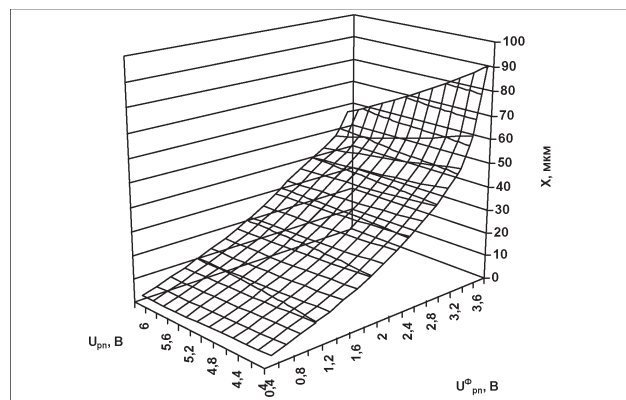


Рисунок 6. Поверхнева діаграма поліноміальної апроксимуючої функції  $X(U^{\Phi}_{pn}, U_{pn})$

Таблиця 1

Коефіцієнти  $b_i$  та показники степеня поліному, дисперсія  $\sigma^2$  і абсолютна похибка  $s$  поліноміальної апроксимації позиційної характеристики

Коефіцієнти $b_i$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$
	-9,877	9,816	0,7886	$-5,4 \cdot 10^{-6}$	0,1775	112,847	$1,42 \cdot 10^{-6}$	$-6,27 \cdot 10^6$
Показники степеня	a	b	c	d	e	f	$\sigma^2$	2,31
	13,273	0,3326	4,24	-2	14,726	-12	$\sigma$	1,52

### Технологічна реалізація

Технологія виготовлення координаточувливої структури визначає як її електричні характеристики, так і потенційні можливості то-

чного врахування похибок вимірювання в умовах температурного дрейфу. Вирішальним фактором є здатність забезпечити послідовне з'єднання  $p-n$  переходів у фотобатарей. Традиційна інтегральна технологія з ізоляцією

елементів розділовою дифузиею створює паразитні  $p-n$  переходи, на яких при опроміненні буде виникати фото-ЕРС протилежного знаку до тієї, що формується на фотобатарей. Внаслідок цього результуюча фото-ЕРС може бути взагалі зведена до нуля. Тому потрібно використати таке технологічне рішення, яке дасть змогу забезпечити сумування фото-ЕРС окремих  $p-n$  переходів фотобатарей.

Таким рішенням є промислово освоєна технологія КСДІ, що дозволяє реалізувати інтегральний координаточутливий фотоприймач. Прилади на основі КСДІ відрізняють підвищена стійкість до жорсткого іонізуючого випромінювання, високі пробивні напруги, висока щільність елементів, мала міжкомпонентна паразитна ємність, можливість поєднувати в одній мікросхемі низьковольтні компоненти та високовольтні потужні транзистори. Сукупність цих властивостей сприяє схемотехнічній гнучкості інтегральних мікросхем на КСДІ і розширює її функціональні можливості [6].

В даній роботі досліджено координатний фотоперетворювач на багатофункціональній КСДІ, яка використовується для утворення цілісних функціонально завершених вимірювальних перетворювачів [7]. Модуль структури має розмір  $0,4 \times 2,35 \times 3,3$  мм<sup>3</sup>, а кількість модулів на кремнієвій пластині діаметром 76 мм складає 582. У складі структури 6 фотобатарей різної геометрії по 12  $p-n$  переходів в кожній, 4  $p$ -каналних МОН-транзистора з алюмінієвим затвором і 6 дифузійних резисторів. Всі елементи структури електрично ізольовані між собою тонким шаром двоокису кремнію і мають незалежну комутацію. Число  $p-n$  переходів, що з'єднуються послідовно, можна при необхідності змінювати від 12 до 1 шляхом шунтування частини  $p-n$  переходів. Для цього передбачені додаткові контактні площинки, до яких підведено струмомоведучі доріжки від  $p-n$  переходів.

$P$ -каналні МОН-транзистори виготовлені по двоє в одній ізольованій прямокутній області розміром  $2,0 \times 0,2$  мм<sup>2</sup> і мають спільний витік. Це дозволяє вмикати їх паралельно з метою збільшення крутизни прохідної ВАХ або використовувати у диференційному ввімкненні. Так, наприклад, здвоєний МОН-транзистор з пороговою напругою  $U_{\text{пор}} = 3,7 \text{ В} \dots 4,1 \text{ В}$  має середню крутизну  $9,6 \text{ мА/В}$  у робочому діапазоні входних напруг від 4 до 7 В та напрузі живлення 15 В.

## Висновки

В роботі розглянуто задачу вимірювання координати фоточутливими структурами в умовах дії теплового поля. Показано, що оптоелектронний сенсор мікропереміщень на основі КСДІ поєднує високу координатну чутливість в мікроелектронному виконанні за рахунок використання в якості інформативного сигналу фото-ЕРС розімкненого кола. Але в умовах впливу теплового поля в подібних пристроях спостерігається значний температурний дрейф вихідного сигналу. Ідентифікацію позиційної характеристики і вимірювання координати при зміні температури проводять, використовуючи термометричні властивості даного координатного фотоперетворювача. Показано, що позиційну характеристику координатного фотоперетворювача можна представити багатофакторним поліномом, коефіцієнти якого визначають методом регресійного аналізу. Аргументами функції виступають фото-ЕРС фотобатарей  $U^{\phi}_{pn}$  та напруга на прямозміщених  $p-n$  переходах  $U_{pn}$  фотобатарей, які використовуються в якості температурних сенсорів.

## Список літератури

1. Самарин А.А. Позиционно-чувствительные фотодатчики // Электронные компоненты. — 2003. — № 7. — С. 103 — 108.
2. Аксененко М.Д., Бараночников, Смолин О.В. Микроэлектронные фотоприемные устройства. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 208 с.
3. Яганов П.А., Клетченков И.И. Связь фото-ЭДС холостого хода фотоэлемента с уровнем легирования  $p$ - и  $n$ -бластей // Диэлектрики и полупроводники. — 1987. — Вып.31. — С.89-95.
4. Singh R.V., Singal С.М. Temperature dependence of a pressure of idling of the silicon solar battery // Solar Cells. — 1983. — V.10. — p.155-175.
5. Яганов П.А.. Термометричні характеристики інтегральної мікроелектронного сенсора // Електроніка і зв'язь. — 2005. № 26. — С.21 — 26.
6. Брюхно Н.А., Жарковский Е.М., Концевой Ю.А., Сахаров Ю.Г. Кремниевые структуры с диэлектрической изоляцией для изделий микроэлектроники. Обзоры по электронной технике. Серия 3. Микроэлектроника. Вып. № 4 (1304). — М.:ЦНИИ “Электроника”, 1987. — 41 с.
7. Яганов П.А. Координатный фотопреобразователь с температурной стабилизацией // Электроника и связь. — 2003. № 20. — С.208 — 210.