

ПОЗИЦІЙНО-ЧУТЛИВА МАТРИЦЯ ФОТОДЕТЕКТОРІВ ДЛЯ ОПТИЧНОГО КООРДИНАТОРА.

Володимир Вербицький, Андрій Воронько, Дмитро Вербицький,
Національний технічний університет "Київський політехнічний інститут"
ім. Ігоря Сікорського

Анотація

В роботі представлені нові позиційно чутливі матриці фоточутливих елементів для визначення мікро-переміщень світлової плями для оптичного координатора, проведено аналіз топології та пеленгаційних характеристик.

Ключові слова

Оптичний координатор, позиційно чутлива матриця, метод для визначення координат, позиційно чутливі детектори, квадрантні фотодіоди (QPD), пеленгаційні характеристики.

1. Вступ

Прецизійні оптичні координатори широко використовуються для визначення мікро-переміщень. Основне завдання оптичного координатора полягає в точному визначенні просторового положення світлової плями, зазвичай створеною лазерним діодом або світлодіодом з системою колімації та відповідним спектром випромінювання. Зазвичай у таких системах використовуються одно- або двовимірні позиційно-чутливі фотодетектори (PSD): CCD; активні піксельні сенсори (APS), до яких належать CMOS-датчики зображення (CIS) [1-4]; фотодіоди на основі латерального ефекту [5-9]. Усі перераховані вище типи детекторів мають ряд технічних недоліків (низька швидкість, чутливість і точність, вплив засвічення), що в деяких випадках обмежує їх використання. Для точного визначення координат світлової плями краще використовувати квадрантні фотодіоди (QPD) [10-12].

2. Постановка задачі

4-квадрантний фотодетектор має хорошу роздільну здатність положення світлової плями (висока крутість пеленгаційної характеристики) у відносно невеликому діапазоні (діапазон переміщення не перевищує розміру радіуса світлової плями) відносно центру. Тому, функціональна схема оптичного координатора, основана на 4-квадрантному фотодетекторі, повинна обов'язково включати прецизійну систему відслідковування (підтримання) положення світлової плями відносно центру фотоприймача. [13]. Оптичні координатори цього типу застосовуються у багатьох вимірювальних системах, де необхідно дуже точно визначати координати світлової плями. Наприклад, оптичний координатор для визначення координат відбитого пучка від кантилеверу в атомно-силовому мікроскопі побудований за цією схемою. Для збільшення площі захоплення системи стеження необхідно сформувати світлу пляму більшого діаметру. У той же час крутість пеленгаційної характеристики (залежність амплітуди вихідних сигналів фоточутливих елементів від положення світлової плями на ньому) і, отже, точність утримання світлової плями в номінальному положенні залежить від співвідношення розмірів світлової плями і квадрантами фотодетектора. Зменшення діаметра світлової плями збільшує роздільну здатність вимірювання оптичного координатора. У цьому випадку необхідно використовувати більш точні мікроманіпулятори X-Y для системи відстеження за променем оптичного координатора. Таким чином, забезпечення більшої ширини зони захоплення й підвищення точності визначення координат світлової плями є суперечливими вимогами, які не можуть бути виконані при використанні чотириквадрантного фотоприймача в якості позиційно-чутливого елемента. З цієї ж причини використання таких оптичних координаторів завжди потребує початкового точного позиціонування положення світлового променя.

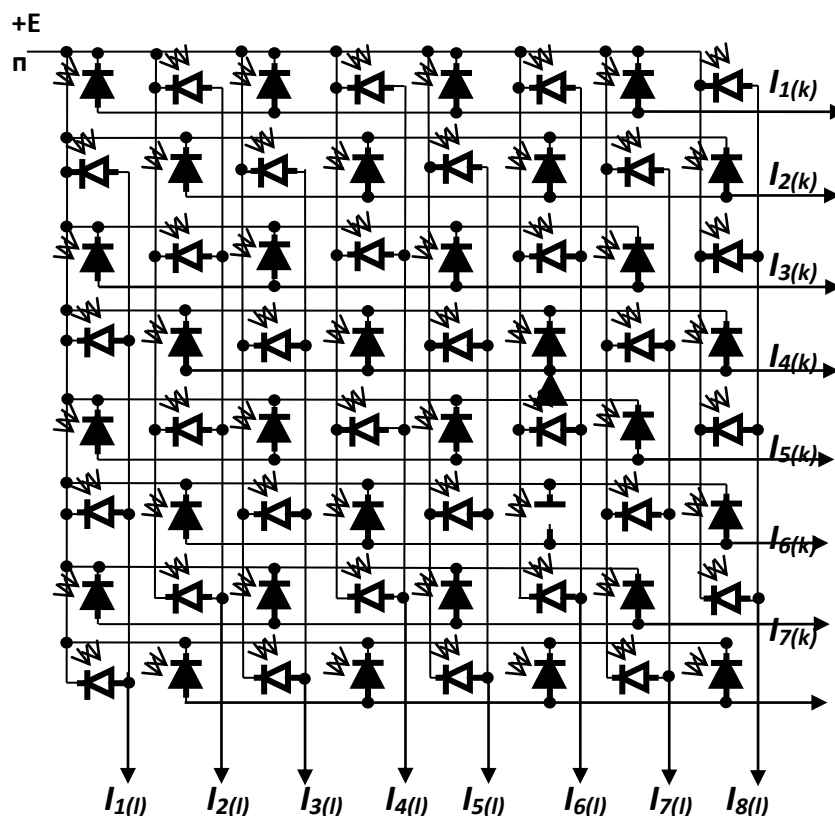
У деяких випадках надзвичайно високі вимоги пред'являються до динамічного діапазону оптичних координаторів, які практично недосяжні за відомими конструктивними схемами. У відомих схемах побудови оптичних координаторів, оптична система фокусує випромінювання на пляму, розмір якої менше одного світлочутливого елемента. При цьому виявляється, що при необхідному мінімальному рівні оптичного сигналу неможливо задовольнити вимоги щодо відношення сигнал / шум, а при заданому рівні максимального оптичного сигналу, фоточутливі елементи матриці руйнуються.

3. Мета роботи

Метою цієї роботи є розробка позиційно-чутливого фотодетектора для оптичного координатора з великою шириною захоплення та високою точністю визначення положення світлової плями, по можливості з мінімальною кількістю необхідних для обробки сигналів від фоточутливих елементів, тобто по суті створення прецизійного оптичного координатора без системи відслідковування та початкового юстування світлового променя. Також необхідно розробити фоточутливу матрицю з розширеним динамічним діапазоном для вимірювання положення джерела випромінювання з ненормованим за потужністю оптичним сигналом.

4. Топологія фоточутливої матриці

Для створення оптичного координатора без системи стеження необхідно вирішити суперечність між точністю визначення положення світлової плями та площею захоплення оптичного координатора. Для вирішення цієї проблеми пропонується новий метод визначення координат світлової плями та використання чутливої до положення матриці світлочутливих елементів зі спеціальною топологією міжз'єднань фоточутливих елементів, яка одночасно забезпечує як високу крутість пеленгаційної характеристики, так і широку зону захоплення [14]. Згідно із запропонованою топологією, світлочутливі елементи розташовані в рядки і стовпці, подібно "шахової дошці", а світлочутливі елементи, розташовані на "білих" полях, з'єднані в стовпці, а ті, що знаходяться на "чорних" полях, - у



рядки (Рис. 1).

Рис. 1. Схема позиційно-чутливої матриці фоточутливих елементів

Фототоки від елементів кожного рядка (стовпця), розташованих через один - сумуються. Таким чином, на виходах запропонованої матриці генеруються сигнали, що дорівнюють сумі фотострумів з елементів відповідних рядків (стовпців) цієї матриці:

$$I_{2k-1} = \sum_{l=1}^{\frac{n}{2}} I_{(2k-1),(2l-1)} \quad (1)$$

$$I_{2k} = \sum_{l=1}^{\frac{n}{2}} I_{2k,2l} \quad (2)$$

$$I_{2l-1} = \sum_{k=1}^{\frac{m}{2}} I_{2k,(2l-1)} \quad (3)$$

$$I_{2l} = \sum_{k=1}^{\frac{m}{2}} I_{(2k-1),2l} \quad (4)$$

де m – кількість рядків матриці ;
 n - кількість стовбців матриці ;

$$k = 1, 2, 3, \dots, \frac{m}{2} \quad l = 1, 2, 3, \dots, \frac{n}{2}$$

Треба зазначити, що для такої топології кількість рядків та стовбців не обмежено вимогою кратності 4, а може бути довільним.

5. Аналіз пеленгаційної характеристики

Під пеленгаційними характеристиками оптичного координатора будемо розуміти сукупність залежностей електричних сигналів FE_i та FE_j від виходів чутливої до положення матриці фоточутливих елементів зі спеціальною топологією міжз'єднань, на основі якої побудовано координатор від кутових координат α , β променя, що падає на матрицю:

$$\left\{ \begin{array}{ll} FE_{i_1}(\alpha, \beta); & FE_{j_1}(\alpha, \beta); \\ FE_{i_2}(\alpha, \beta); & FE_{j_2}(\alpha, \beta); \\ \dots & \dots \\ FE_{i_N}(\alpha, \beta); & FE_{j_N}(\alpha, \beta) \end{array} \right\} \quad (5)$$

де FE_i - електричний сигнал з виходу, який відповідає i -му рядку матриці; FE_j - це електричний сигнал з виходу, який відповідає j -му стовпцю матриці; N - кількість електричних сигналів з виходів матриці, яке залежить від розміру світлової плями, сформованою оптичною системою координатора в площині фоточутливих елементів матриці (нормованою до півперіоду матриці). Загальна кількість пеленгаційних залежностей становить $2N$.

Кутові координати α , β (у двох ортогональних площинах) падаючого променя пов'язані з відповідними лінійними координатами x , y центру O світлової плями, сформованої в площині матриці за допомогою передавальної функції K оптичної схеми координатора:

$$\begin{cases} x_o = K \cdot \alpha; \\ y_o = K \cdot \beta \end{cases} \quad (6)$$

Тоді пеленгаційні характеристики FE_i та FE_j оптичного координатора повністю визначаються відповідними пеленгаційними характеристиками FS_i та FS_j позиційно чутливої матриці:

$$\left\{ \begin{array}{cc} FSi_1(x_0, y_0); & FSj_1(x_0, y_0); \\ FSi_2(x_0, y_0); & FSj_2(x_0, y_0); \\ \dots & \dots \\ FSi_N(x_0, y_0); & FSj_N(x_0, y_0) \end{array} \right\}, \quad (7)$$

де FSi - загальний електричний сигнал з виходу матриці, що відповідає її i -му рядку; FSj - загальний електричний сигнал з виходу, що відповідає його j -му стовпцю; x - лінійна координата центру світлової плями O вздовж осі, перпендикулярної напрямку рядків матриці; y - лінійна координата центру світлової плями O вздовж осі, перпендикулярної напрямку стовпців матриці.

У цьому випадку достатньо визначити пеленгаційні характеристики FSi та FSj позиційно чутливої матриці на інтервалі в площині матриці, що відповідає квадрату з розміром напівперіоду d матриці для координатної площини Ox_0y_0 з початок в центрі елемента матриці:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_0 \in \left[-\frac{d}{2}; +\frac{d}{2} \right]; \\ y_0 \in \left[-\frac{d}{2}; +\frac{d}{2} \right]. \end{array} \right. \quad (8)$$

Періодичність та парність / непарність пеленгаційних характеристик FSi та FSj позиційно-чутливої матриці світлочутливих елементів зі спеціальною топологією між'єднань визначається наступними виразами:

$$\left[\begin{array}{cc} FSi_I(x_0 + d, y_0) = FSj_J(y_0, x_0); & FSj_J(x_0 + d, y_0) = FSi_{I-1}(y_0, x_0); \\ FSi_I(x_0, y_0 + d) = FSj_{J-1}(y_0, x_0); & FSj_J(x_0, y_0 + d) = FSi_I(y_0, x_0); \\ FSi_I(x_0 + d, y_0 + d) = FSi_{I-1}(x_0, y_0); & FSj_J(x_0 + d, y_0 + d) = FSj_{J-1}(x_0, y_0) \end{array} \right] \quad (9)$$

$$\left[\begin{array}{cc} FSi_I(x_0 + 2d, y_0) = FSi_{I-2}(x_0, y_0); & FSj_J(x_0 + 2d, y_0) = FSj_J(x_0, y_0); \\ FSi_I(x_0, y_0 + 2d) = FSi_I(x_0, y_0); & FSj_J(x_0, y_0 + 2d) = FSj_{J-2}(x_0, y_0); \\ FSi_I(x_0 + 2d, y_0 + 2d) = FSi_{I-2}(x_0, y_0); & FSj_J(x_0 + 2d, y_0 + 2d) = FSj_{J-2}(x_0, y_0) \end{array} \right] \quad (10)$$

де I - номер рядка матричного елемента, на якому розташований центр світлової плями з координатами x , y ; J - номер стовпця елемента матриці, на якому розташований центр світлової плями з координатами x , y . Оптичним сигналом на кожному матричному елементі є світловий потік, що падає на світлочутливу область елемента, пропорційний площі освітленої області цього елемента. Електричний сигнал-відгук від кожного світлочутливого елемента матриці пропорційний оптичному сигналу, що надходить до нього. Фотострум $I_{i, j}$ від кожного елемента матриці визначається інтегралом:

$$I_{i, j} = k \int_{y_{1i, j}}^{y_{2i, j}} \int_{x_{1i, j}}^{x_{2i, j}} E(x, y) dx dy, \quad (11)$$

де i, j - адреса елемента матриці через номер рядка та номер стовпця; k - коефіцієнт пропорційності (поточна світлочутливість); $E(x, y)$ - освітлення в місці; $x_{1i, j}, x_{2i, j}$ - координати лівої та правої меж світлочутливої області i, j елемента; $y_{1i, j}, y_{2i, j}$ - координати верхньої та нижньої меж світлочутливої області i, j елемента.

В математичній моделі ми розглядаємо матрицю світлочутливих елементів квадратної форми розміром $a \times a$ із зазорами шириною t між ними, на поверхню яких надходить оптичний сигнал у вигляді кругової світлової плями діаметром D з нормальним (за Гаусом) розподілом в ньому освітленості E . У цьому випадку освітленість у довільній точці круглої світлової плями визначається за формулою:

$$E(x, y) = E_0 \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (12)$$

де E_0 - освітленість у центрі світлової плями, σ - параметр розподілу Гауса; x, y - координати довільної точки в декартовій системі координат з початком у центрі O світлової плями. Тоді електричний сигнал-відгук від кожного світлочутливого елемента матриці згідно (11) визначається інтегралом:

$$I_{i,j} = k \int_{y_{1ij}}^{y_{2ij}} \int_{x_{1ij}}^{x_{2ij}} E_0 \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} dx dy \quad (13)$$

Якщо розглядати пеленгаційні характеристики такої матриці, як залежність вихідних електричних сигналів від координат центру світлової плями на матриці, то можна стверджувати, що ці характеристики описуються періодичними функціями з періодом що відповідає просторовому періоду матриці з шаховою структурою:

$$T = 2(a + t) \quad (14)$$

Для дослідження пеленгаційних характеристик достатньо дослідити залежність вихідних електричних сигналів від матриці від координат центру світлової плями, яка рухається в межах площі матриці з розмірами $T \times T$.

Для функціонального представлення пеленгаційних характеристик позиційно-чутливої матриці фоточутливих елементів отримані залежності апроксимуються відомим прийомом, наприклад, поліномом двох змінних ступеня 2 (n-1). Поліноми, які інтерполюють залежність пеленгаційних характеристик (3) матриці, графічно можна представити у вигляді поверхні в декартовій прямокутній системі координат $Oxyz$. У цьому випадку координата x кожної точки поверхні на тривимірному графіку відповідає координаті x центру світлової плями, координата y - координаті y центру світлової плями, а координаті z значення відповідної залежності пеленгаційних характеристик матриці (загальний електричний сигнал від відповідних виходів рядків і стовпців матриці).

Для збільшення динамічного діапазону оптичного координатора була запропонована принципово нова топологія між'єднань фоточутливих напівпровідникових елементів позиційно чутливої матриці [15]. Фоточутливі елементи запропонованої матриці можуть бути виготовлені залежно від необхідного спектрального діапазону на основі Si , твердих розчинів A_3B_5 . Збільшення динамічного діапазону досягається завдяки тому, що світлова пляма на поверхні матриці утворюється з розміром щонайменше 2×2 матричних елементів; для збільшення швидкості в якості світлочутливих елементів можуть використовуватися PIN, МНМ або МДН структури. Фоточутливі елементи організовані в рядки та стовпці відповідно до запропонованої топології (подібно до попередньої топології). Електричні сигнали від елементів кожного рядка (стовпця) підсумовуються, а електричні сигнали від елементів сусідніх парних (непарних) рядків (стовпців) віднімаються (рис. 2).

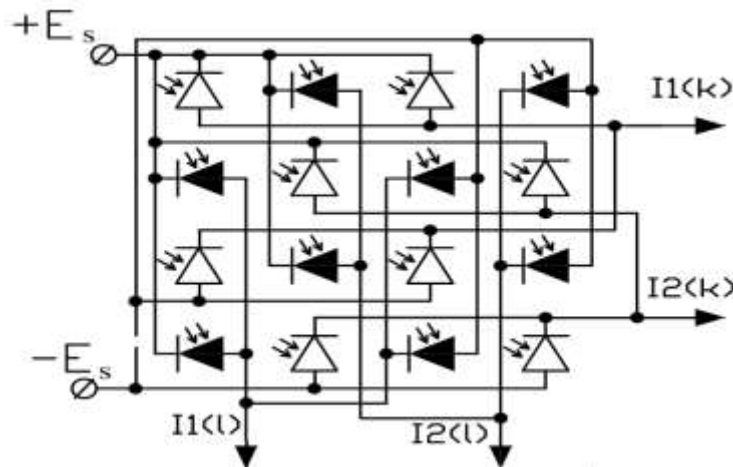


Рис.2. Схема позиційно-чутливої матриці з розширеним динамічним діапазоном.

Завдяки цьому на кожному з виходів матриці формуються електричні сигнали, пропорційні різниці освітленості всіх фоточутливих елементів сусідніх парних (непарних) рядків (стовпців) такої матриці. Використання запропонованої топології між'єднань дозволяє одночасно визначати обидві координати

світлової плями на одній матриці з точністю до одного елемента матриці. У той же час для обробки аналогових сигналів з матриці $4N \times 4M$ елементів достатньо лише $2N + 2M$ незалежних каналів. Для перетворення отриманих сигналів у цифровий код необхідно $4N \times 4M$ компараторів, два шифратора (відповідно з входами $4N$ та $4M$). Треба зауважити, що ці самі шифратори легко вирішують завдання перетворення цих координат (наприклад, від координат відносно матриці до координат щодо носія цієї матриці).

6. Висновки

Для оптичного координатора запропоновані оригінальні позиційно-чутливі матричні елементи, з пеленгаційною характеристикою, порівнянною з 4-квadrантним фотодетектором, без використання електромеханічної системи прецизійного відстеження для утримання світлової плями біля центру елемента фотоприймача. У цьому випадку також немає необхідності в початковому юстуванні оптичного координатора з променем. Топологія матриці дозволила значно зменшити кількість оброблюваних аналогових сигналів від світлочутливих елементів, що значно спрощує алгоритм обробки сигналів для визначення координат джерела оптичного випромінювання.

7. Конфлікт інтересів

Автори стверджують, що щодо твору немає можливих фінансових чи інших конфліктів.

Список літератури

- [1]. M. Huber, et al., "CCD and CMOS sensors", Observing Photons in Space ISSI Scientific Reports Series, ESA/ISSI. ISBN 978-92-9221-938-8, pp.391–408, 2010
- [2]. F. De Nisi, F. Comper, L. Gonzo, M. Gottardi, D. Stoppa, A. Simoni, J. A. Beraldin, "A CMOS sensor optimized for laser spot position detection", IEEE Journal of Sensors, vol. 5(6), pp. 1296-1304, 2005.
- [3]. Xunjun Qi, et al., "Design realization and characterization of a position sensitive detector for fast optical measurement", Optical engineering, Vol. 45(1), pp. 014402-1-5, 2006.
- [4]. F. Michael, et al., "Very large area cmos active-pixel sensor for digital radiography", IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, vol.56, no.11, pp.2623-2631, 2009.
- [5]. J. Henry, J. Livingstone, "Optimizing the wavelength response in one-dimensional p-Si Schottky barrier optical PSDs", Phys. Status Solidi A, 208, pp. 1718-1725, 2011.
- [6]. Song H. X., Wang et al., "Design and performance analysis of laser displacement sensor based on position sensitive detector (PSD)", Journal of Physics: Conference Series, 2006. vol.48. pp.217 - 222.
- [7]. W. Wang and I. J. Busch-Vishniac, "The linearity and sensitivity of lateral effect position sensitive devices-an improved geometry," Electron Devices, IEEE Transactions on, vol. 36, no.11, pp. 2475–2480, 1989.
- [8]. H. Andersson, et al., "Processing and characterization of a mos-type tetra lateral position sensitive detector with indium tin oxide gate contact," Sensors Journal, IEEE, vol. 8, no. 10, pp. 1704–1709, 2008.
- [9]. Dlugaszek A., Jabczynski J., Janucki J., Skrzeczanowski W., "Optoelectronic sensor of longitudinal and angular displacements", Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics, v.2. № 3. pp.71 – 73, 1999.
- [10]. L.P. Salles and D. W. de Lima Monteiro, "Designing the response of an optical quad-cell as position-sensitive detector," Sensors Journal, IEEE, vol. 10, no.2, pp. 286–293, 2010.
- [11]. C. F. Kuang, et al., "Analyzing characteristic of the four-quadrant detector applied to laser alignment", Optical Technique, Vol. 30, no. 4, pp. 387-389, 2004.
- [12]. T. Ng, H. Tan, and S. Foo, "Small gaussian laser beam diameter measurement using a quadrant photodiode," Optics & Laser Technology, vol. 39, no. 5, pp. 1098–1100, 2007.
- [13]. Yu.M., Astapov, D.V., Vasiliev, Yu.I Zalozhnev. , "The theory of optoelectronic tracking systems", Moscow, USSR: Nauka, 1988.
- [14]. A.Voronko, M.Moskalenko, G. Potapova " Position-sensitive matrix of photosensitive elements for atomic force microscopy of nanoscale elements", in VII International Russian-Ukrainian seminar "Nanophysics and Nanoelectronics", St. Petersburg ,2006,pp.95-96.
- [15]. A.Voronko, M.Moskalenko, G.Potapova "Position-sensitive array of photosensitive elements with a record dynamic range", in III International Conference on Optoelectronic Information Technologies "PHOTONICS-ODS 2005", Vinnytsia, 2005, pp.201-202.