УДК 621.363.6

І.С. Литвин
Тернопільський національний економічний університет
кафедра автоматизованих систем і програмування

ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ТА МЕТОДИ ВИКОРИСТАННЯ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПРИСТРОЇВ З ПІДВИЩЕНОЮ ІНФОРМАЦІЙНОЮ ЕФЕКТИВНІСТЮ НА ОСНОВІ ІНТЕГРАЛЬНИХ МНОП-N-P СТРУКТУР

© Литвин І.С., 2008

Обґрунтовано принципи побудови і методи використання оптоелектронних інформаційних пристроїв, які можуть виконувати, окрім перетворення оптичного випромінювання на цифрові електричні сигнали, ще і функції додавання, віднімання, перемноження та порогового сприйняття зображень.

Principles of optoelectronics sensor construction and methods using are proved, which can made: transformation of light in digital electric signals and functions of addition, deduction, multiplying and threshold perception of images.

1. Вступ. Оптоелектронні інформаційні пристрої (надалі буде вживатися термін ОЕІП) призначені для перетворення аналогових двомірних оптичних сигналів на цифрові електричні і для їхнього опрацювання [1]. ОЕІП розглядаються як багатофункціональні програмовані системні перетворювачі інформації, які залежно від призначення та використання дають змогу застосовувати для розв'язання кожної задачі як загальні, так і індивідуальні засоби при оптимізації розподілу фрагментів алгоритмів перетворення та опрацювання інформації між оптичними, оптоелектронними, аналоговими електронними, аналого-цифровими і цифровими обчислювальними блоками залежно від галузі використання і складності інформаційно-вимірювальних систем, комп'ютерних систем діагностування та контролю параметрів процесів і середовищ, систем автоматичного контролю технологічних процесів, до складу яких входять ОЕІП [2]. Функції окремих блоків можуть збігатися, наприклад, підсилення та опрацювання сигналу для виділення його із шуму можна здійснювати не тільки в електричних блоках ОЕІП, але і в його оптичних блоках (надалі буде вживатися термін ОБ).

Особливості перетворення та опрацювання даних, поданих у вигляді оптичних зображень, залежать від типу ОЕІП та від їхнього призначення тому виникає необхідність удосконалення принципів побудови і методів використання ОЕІП, визначення оптимальних параметрів і характеристик їхніх блоків і елементів для кожного конкретного завдання (галузі використання). Але використовують алгоритми, які мають такі·основні етапи:

– формування зображення в ОБ з використанням перетворення амплітуди і фази оптичного випромінювання у просторі і в часі;

– перетворення інформації, яка міститься в зміні інформативних параметрів оптичних сигналів в часі, а також в їхньому розподілі по чутливій поверхні первинного оптоелектронного перетворювача оптичного випромінювання (надалі буде вживатися термін ПОЕПОВ), на вихідний електричний сигнал за допомогою ПОЕПОВ;

– підготовка масивів цифрових даних, які містять результати аналого-цифрового перетворення електричних сигналів та їхнє попереднє опрацювання;

– введення цифрових даних по інтерфейсних каналах в засоби обчислювальної техніки для виконання кінцевого завдання опрацювання зображень.

Вказані етапи алгоритмів перетворення та опрацювання зображень виконують в різних функціональних блоках ОЕІП, але, як правило, в ОЕІП розв'язують задачу найповнішого збирання,

опрацювання і подання інформації про структуру поля оптичного випромінювання, тому для підвищення їхньої ефективності і конкурентоспроможності необхідно вирішити проблеми, пов'язані з покращанням метрологічної, програмної, експлуатаційної, конструктивної та інформаційної сумісності оптичних, опоелектронних та електронних блоків ОЕІП. Найактуальнішою є проблема узгодження потоків інформації ОЕІП, що зумовлено неузгодженістю високої інформаційної ефективності ОБ з обмеженою інформаційною ефективністю електронних блоків перетворення і первинного опрацювання даних (час виконання складних інтегральних перетворень в ОБ визначається часом введення зображення в ОЕІП (~10^{-10} с), а час виконання таких перетворень в електронних блоках становить ~10^{-7} -10^{-8} с. У разі відсутності такого узгодження знижується ефективність використання ОЕІП, не виключається можливість неправильного приймання і перетворення сигналів, або структурна схема ОЕІП ускладнюється і невиправдано дорожчає [3, 4, 5]. Підвищення інформаційної ефективності опоелектронних та електронних блоків ОЕІП забезпечує зростання рівня якості і конкурентоспроможності їх розробок і тому є важливим напрямком досліджень у галузі первинних і вторинних системних методів і засобів сприйняття, перетворення й опрацювання двовимірних оптичних сигналів і дає змогу раціональніше вибрати структурну схему ОЕІП і технічні засоби для її реалізації під конкретне завдання. Вирішення цієї проблеми пов'язано з розробленням і впровадженням нових наукових, фізико-технологічних принципів побудови блоків та логічних (алгоритмічних) основ організації зв'язків, способів перетворення, обміну і розподілу інформації в ОЕІП.

Опрацювання зображень у цифрових обчислювальних блоках ОЕІП можна здійснювати в режимі реального масштабу часу або в режимі накопичення (запам'ятовування) інформації в процесі вимірювання чи контролю і подальшого її опрацювання. Складність апаратурної або програмної реалізації алгоритмів опрацювання зображень в цих блоках в прийнятному реальному масштабі часу зумовлена необхідністю обробляти великі обсяги вхідних даних, що є однією із найважливіших особливостей цифрового опрацювання двовимірних оптичних сигналів [6]. Тому у Вінницькому національному технічному університеті під керівництвом професора В.П. Кожем'яко виконуються дослідження формального математичного апарата логіко-часових функцій і побудова на їхній основі елементів технології око-процесорного опрацювання інформації для реалізації основної переваги ОЕІП – їхньої високої швидкодії, зумовленої реалізацією принципу паралелізму опрацювання інформації в ОБ ОЕІП [7, 8, 9, 10, 11]. За один такт роботи в ОБ ОЕІП можна виконати двовимірне перетворення Фур'є, Френеля, взаємну кореляцію, згортку, операції перемноження, ділення, додавання, віднімання, інтегрування, диференціювання зображень. В ОБ ОЕІП можна також легко реалізувати різні алгоритми фільтрації зображень, зокрема узгодженої, інверсної та оптимальної. Час виконання таких складних інтегральних перетворень в ОБ визначається лише часом введення зображення в ОБ (~ 10^{-10} с). Основним недоліком ОБ для опрацювання зображень є обмежений клас завдань, що розв'язуються, і відсутність серійної елементної бази, необхідної для зміни алгоритмів опрацювання зображень у реальному масштабі часу. Це викликає необхідність зміни одного чи декількох вузлів ОБ, а часто – перебудови усієї структури ОЕІП у ході його роботи. За відсутності перебудови структури ОЕІП корисний сигнал може бути помітно спотвореним, а інколи (наприклад, при автосупроводі об'єкта випромінювання) ОЕІП чи слідкуюча система взагалі може перестати правильно функціонувати. ОЕІП із змінною структурою можуть містити декілька (два і більше) каналів, що працюють в різних діапазонах оптичного випромінювання і в різних режимах (пасивний, напівактивний, активний). Це викликає необхідність застосування в таких ОЕІП блока логіки (обчислювального блока), що виконує вибір та ввімкнення ОБ, який забезпечує найоптимальніше розв'язання задачі у конкретних умовах. Очевидно, що чим більше ОБ використовується в ОЕІП, тим він стає дорожчим і складнішим стає алгоритм його роботи [12].

У багатьох випадках ефективне опрацювання зображень в ОБ є ускладненим через зниження їхньої якості, викликане "зашумленістю зображень" завадами, які формуються зовнішнім

середовищем та освітленістю, а також неправильним налаштуванням ОБ і методичними похибками. Крім того, в ОБ ОЕІП існують просторові, градаційні і часові втрати інформації, які викликають недостатню чіткість, яскравість або контрастність зображень. Просторові втрати інформації пов'язані зі зменшенням амплітуди окремих гармонічних складових, з яких складається початкове зображення. Градаційні втрати визначаються зменшенням кількості рівнів енергії сигналів, що передаються в ОБ, а часові втрати пов'язані з максимальною допустимою частотою знімання інформації (перетворення сигналів) в первинних оптоелектронних перетворювачах оптичного випромінювання (надалі буде вживатися термін ПОЕПОВ). Тому в Одеському національному технічному університеті під керівництвом професорів С. Г. Антощук і В.Н. Крилова ведуться роботи, спрямовані на створення нових методів попереднього опрацювання зображень, які забезпечують підвищення їхньої якості та ефективності опрацювання [13, 14]. Перспективні і результативні роботи із створення інформаційних технологій опрацювання візуальної інформації на основі теорії контрастності, які виконуються у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка під керівництвом професора Р.А. Воробля [15, 16].

Вітчизняний та зарубіжний досвід розробок та експлуатації ОЕІП для опрацювання зображень показує, що для ефективного введення оптичних зображень є актуальним розроблення і дослідження нових фізичних і структурних підходів у напрямку поєднання досягнень мікроелектронної технології з перевагами оптичних методів опрацювання інформації шляхом створення ПОЕПОВ нових типів, які можуть виконувати, окрім зчитування просторового розподілу інтенсивності випромінювання, ще і функції, що застосовуються при попередньому обробленні оптичних зображень. Успіхи в цьому напрямку нерозривно пов'язані з розв’язанням задачі підвищення ефективної пропускної здатності ПОЕПОВ. Велика пропускна здатність (~ 10^{17} -:– 10^{22} біт/с) ОБ зумовлює перевантаження ПОЕПОВ (пропускна здатність ~ 10^{4} -:– 10^{9} біт/с) і каналів введення інформації (пропускна здатність ~ 10^{6} -:-10^{8} біт/с), надмірно високі вимоги до параметрів і до характеристик обчислювальних блоків, які входять до складу ОЕІП, що, як наслідок, проявляється у високій вартості і складності ОЕІП, що обмежує їхнє широке впровадження у народне господарство. Однак аналіз [17] показує, що при сприйнятті і передачі зображень в ПОЕПОВ тільки частина елементів зображення містить потрібну (корисну) інформацію і тому немає потреби перевантажувати аналогові електронні та аналого-цифрові блоки ОЕІП завідомо непотрібною інформацією. Тому велике значення має апаратна реалізація основних функцій попереднього опрацювання зображень спеціалізованими ПОЕПОВ, оскільки універсальні ПОЕПОВ введення зображень на основі ПЗЗ і КМОП матриць та універсальні комп’ютери не забезпечують попереднього опрацювання зображень, а також потрібної швидкодії ОЕІП, які працюють в реальному часі [18]. Істотно розширити функціональні можливості ОЕІП дає змогу налаштування і виконання функцій із перетворення та оброблення зображень в ПОЕПОВ під конкретне завдання. У зв’язку з цим актуальним є вирішення питань, зв’язаних з розроблення і дослідженням ПОЕПОВ, в яких розширення набору виконуваних функцій для попереднього опрацювання зображень забезпечується за рахунок управління режимами їхнього функціонування, як оптичними, так і електричними впливами. Це викликає необхідність розробк і дослідження фоточутливих елементів ПОЕПОВ, які суміщують функції фотоприймачів і пристроїв попереднього опрацювання оптичної інформації.

Великий внесок у формування наукових основ створення ПОЕПОВ для опрацювання зображень зробили дослідження, виконані у Вінницькому національному технічному університеті під керівництвом професора В.П.Кожем’яко [7]. Відомі методи використання МДП-структур у ПОЕПОВ, які дають змогу здійснити управління режимом запису інформації за допомогою оптичних впливів при високій пороговій чутливості до випромінювання і при високій швидкодії за рахунок втілення принципу паралелізму при обробленні зображень [19]. Існує також підхід до створення первинних перетворювачів на основі розподілених структур метал-діелектрик-напів-провідник-окисид (МДПО-структур) із шарами фотопровідників або широкозонних

напівпровідників [20], в яких можна виконувати функції оптичного управління записом і оптичного зчитування інформації при довгочасному зберіганні записаної інформації. Вони дають змогу порівняно просто реалізувати обчислювальні операції додавання, віднімання і перемноження зображень. Однак такі ПОЕПОВ дають змогу виводити результати опрацювання зображень в електричних сигналах в інтегральному вигляді з усієї структури відразу або за допомогою оптичної адресації, що вимагає застосування оптичних скануючих вузлів і є в багатьох випадках обмежуючим фактором.

Для вирішення питань, пов'язаних з розробленням і дослідженням інтегральних МДП-структур з розширеними функціональними можливостями для попереднього опрацювання зображень необхідно було виконати аналіз відомих методів використання МДП-структур в ПОЕПОВ для опрацювання зображень і визначити фізичні обмеження на основі конструктивно-технологічних параметрів, які впливають на їхні функціональні можливості. У результаті виконаних досліджень було встановлено, що попереднє опрацювання оптичних зображень в розроблених ПОЕПОВ можна здійснювати за рахунок створення умов для ефективного управління режимами запису, стирання і зчитування інформації як оптичним, так і електричними впливами шляхом попереднього створення в фоточутливих МДП елементах ПОЕПОВ термодинамічно неврівноваженої області просторового заряду (надалі буде вживатися термін ОПЗ) та управління за допомогою оптичних або електричних впливів часом її релаксації, а також за рахунок накопичення і довготривалого зберігання електричних зарядів в діалектрику [21]. З огляду на необхідність поєднання досягнень мікроелектронної технології з перевагами оптичних методів опрацювання інформації фоточутливі елементи ОЕІП доцільно виконати на основі інтегральних структур метал – нітрид кремнію – оксид кремнію – напівпровідникова підкладка, що містить n-p–перехід (надалі буде вживатися термін МНОП-n-p–структури). Встановлено, що ПОЕПОВ на основі МНОП-n-p структур дають змогу досягти розширення набору функціональних перетворень над зображеннями, реалізуючи в момент сприйняття операції додавання, віднімання, множення і порогового сприйняття зображень, за рахунок керування режимами запису, витирання і зчитування інформації як оптичними, так і електричними впливами [22].

Мета роботи: метою подальших досліджень є обґрунтування принципів побудови та методів використання ОЕІП на основі фоточутливих інтегральних МНОП-n-p структур з розширеними можливостями для виконання, окрім перетворення оптичного випромінювання, ще і функції додавання, віднімання, перемноження зображень у момент їхнього сприйняття в самому ОЕІП.

2. Методи і засоби для забезпечення проектування ОЕІП з підвищеною інформаційною ефективністю. Коли на вході ОЕІП є вхідний оптичний сигнал E (X_1, Y_1, t), в якому тільки частина елементів зображення містить корисну інформацію, тоді виникає необхідність попереднього опрацювання такого сигналу з метою виділення корисної інформації та узгодження інформаційної ефективності блоків ОЕІП [2, 3]. Тому у цій роботі, на деяких прикладах, показана можливість виконання операцій, котрі використовуються в алгоритмах опрацювання зображень, за допомогою розроблених і досліджених ПОЕПОВ на основі інтегральних МНОП-n-p структур і здійснена оцінка їхніх інформаційних параметрів – пропускної здатності та ефективної продуктивності.

Основна перевага використання ПОЕПОВ на основі інтегральних МНОП-n-p структур для опрацювання оптичних зображень порівняно із ПОЕПОВ на основі ПЗЗ і МДП-фотодіодів полягає у можливості опрацьовувати зображення в момент його сприйняття в самому ПОЕПОВ. А за рахунок електричного управління при нагромадженні заряду в діелектрику інтегральні МНОП-n-p структури, доповнені електрично керованими ключами, дають змогу розв'язувати деякі задачі, пов'язані з опрацюванням аналогових сигналів при динамічному діапазоні 40 дБ оптичних і електричних сигналів, що опрацьовуються [22]. Це дає змогу істотно скоротити ємність оперативних запам'ятовуючих пристроїв (надалі буде вживатися термін – ОЗП) і розвантажити

канали введення зображення в КСК, і отже, істотно зменшити вимоги до швидкодії усіх основних блоків сполучення КСК з об'єктами управління, а також реалізовувати нові апаратно-програмні методи для попереднього опрацювання зображень.

В ОБ зображення звичайно перемножуються модуляцією світлового потоку за допомогою оптичних елементів (екранів, лінз, решіток), функція пропускання яких пропорційна до сигналу, на який множиться другий сигнал, записаний у вигляді розподілу амплітуд і фаз світлового потоку [23, с. 140]. Якщо здійснювати операцію перемноження двох зображень $E_1(X_1,Y_1,t)$ і $E_2(X_1,Y_1,t)$ за допомогою інтегральних МНОП-n-р структур, тоді зникає необхідність використання додаткових технічних засобів. Для цього необхідно виконати на першому такті оптично керований запис (чи витирання) зображення формування розподілу зарядів на пастках в нітриді кремнію $Q_N(X_{1n},Y_{1m})$, який відповідає розподілу інтенсивності випромінювання у зображенні $I_1(X_{1n},Y_{1m},t_1)$, так, що

$$Q_N(x_{1n},\ y_{1m}) \propto E_1(x_{1n},\ y_{1m},\ t_1) \tag{1}$$

за умови

$$\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M} I_1(x_{1n},\ y_{1m},\ t_1) \approx E_1(x_1,\ y_1,\ t_1) \tag{2}$$

$$\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M} Q_N(x_{1n},\ y_{1m}) \approx Q_{N\Sigma} \tag{3}$$

$$\Delta V_{n,m} \propto I_2(x_{1n},\ y_{1m},\ t_2)\times Q_N(x_{1n},\ y_{1m}) \tag{4}$$

де $Q_{N\Sigma}$ – сумарний заряд, інжектований у нітрид кремнію ($Q_{N\Sigma} \sim \Phi$) [21]). Під час подальшого проектування на ПОЕПОВ (на другому такті) другого зображення $E_2(X_1,Y_1,t_2)$ і здійсненні оптичного зчитування, вихідний електричний сигнал у кожному елементі $\Delta V_{n,m}$ буде пропорційним до добутку інтенсивності падаючого потоку випромінювання $E_2(X_{1n},Y_{1m},t_2)$ і величини нагромадженого раніше заряду $Q_N(X_{1n},Y_{1m})$.

Яке буде відповідати перемноженню елементів зображень

$$\Delta V_{n,m} \propto E_2(x_{1n},\ y_{1m},\ t_2)\times E_1(x_{1n},\ y_{1m},\ t_1)\cdot \tag{5}$$

За допомогою послідовно-поелементного чи паралельного оптичного зчитування електричних сигналів $\Delta V_{n,m}$ із усіх МНОП-n-р структур отримаємо результат перемноження зображень $E_1(X_1,Y_1,t_1)$ і $E_2(X_{1n},Y_{1m},t_2)$

$$\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M} \Delta V_{n,m} \propto \sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M} E_2(x_{1n},\ y_{1m},\ t_2)\times E_1(x_{1n},\ y_{1m},\ t_1) \approx \tag{6}$$

$$\approx E_2(x_1,\ y_1,\ t_2)\times E_2(x_1,\ y_1,\ t_1)$$

При послідовно-поелементному оптичному зчитуванні еквівалентна продуктивність ПОЕПОВ, оцінена відповідно до [21], становить:

$$W_{\text{ПОР}}^{(X)} \approx 1{,}7\cdot 10^{8} \div 1{,}7\cdot 10^{10} \quad [\text{операцій/с}]$$

При паралельному оптичному зчитуванні інформації із усіх фоточутливих елементів одночасно еквівалентна продуктивність досягне величини:

$$W_{\text{П.Е}}^{(X)} \approx 10^{5} \div 10^{6} \quad [\text{операцій/с}]$$

Найбільша кількість енергії випромінювання при виконанні розглядуваної операції необхідна для здійснення функції оптичного управління записом інформації в інтегральній МНОП-n-р структурі. Тому за розрахунковий поріг чутливості при виконанні операції перемноження

зображень необхідно прийняти величину ~ 10^{-6} Дж/см^2, а за експериментально підтверджений ~10^{-5}÷10^{-4} Дж/см^2 [23].

Виконання операцій додавання чи віднімання оптичних зображень в ОБ вимагає точно визначеного співвідношення фаз окремих зображень при їхньому додаванні, що призводить до складного завдання контролю зсуву фаз сигналів [23]. При другому підході послідовно проектують декілька зображень на первинний перетворювач, здійснюючи їхній синхронний запис в ОЗП. Послідовно-поелементне додавання чи віднімання здійснюється вибіркою відповідних елементів зображень із ОЗП і виконанням над даними відповідних операцій. Очевидно, що виконання операцій додавання чи віднімання зображень у реальному масштабі часу у такий спосіб вимагає використання ОЗП великої ємності із високою швидкодією [6].

Для виконання операцій додавання зображень $E_1(X_{1n},Y_{1m},t_1)$ та $E_2(X_{1n},Y_{1m},t_2)$ за допомогою ПОЕПОВ на основі інтегральних МНОП-n-p структур достатньо здійснити на першому такті оптично керований запис зображення, за якого в елементах зформується розподіл зарядів $Q_{N1}(X_{1n},Y_{1m})$, що відповідає просторовому розподілу інтенсивності у зображенні $E_1(X_{1n},Y_{1m}t_1)$:

$$Q_{N1}(x_{1n},\ y_{1m}) \propto E_1(x_{1n},\ y_{1m},\ t_1) \tag{7}$$

при умові

$$\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M} E_1(x_{1n},\ y_{1m},\ t_1) \approx E_1(x_1,\ y_1,\ t_1) \tag{8}$$

$$\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M} Q_{N1}(x_{1n},\ y_{1m},\ t_1) \approx Q_{N1\Sigma} \tag{9}$$

Після здійснення функції оптичного керування записом другого зображення $E_2(X_{1n},Y_{1m},t_2)$, на другому такті, в елементах додатково накопичиться заряд $Q_{N2}(X_{1n},Y_{1m})$ відповідно до просторового розподілу інтенсивності у зображенні $E_2(X_{1n},Y_{1m},t_2)$:

$$Q_{N2}(x_{1n},\ y_{1m}) \propto E_2(x_{1n},\ y_{1m},\ t_2) \tag{10}$$

$$\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M} Q_{N2}(x_{1n},\ y_{1m}) \approx Q_{N2\Sigma} \tag{11}$$

за умови:

$$\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M} E_2(x_{1n},\ y_{1m},\ t_2) \approx E_2(x_1,\ y_1,\ t_2) \tag{12}$$

В результаті у всіх елементах накопичиться заряд величиною:

$$Q_{N\Sigma} = Q_{N1\Sigma} + Q_{N2\Sigma} \tag{13}$$

Так, що під час подальшого оптичного або електричного зчитування вихідний електричний сигнал в кожному елементі n, m буде пропорційним до величини накопичених зарядів, а, отже, суми елементів зображень n, m:

$$\Delta V_{n,m} \propto E_1(x_{1n},\ y_{1m},\ t_1) + E_2(x_{1n},\ y_{1m},\ t_2) \tag{14}$$

За допомогою послідовно-поелементного або паралельного зчитування електричних сигналів $\Delta V_{n,m}$ із всіх функціональних елементів ПОЕПОВ на основі інтегральних МНОП-n-p структур отримаємо результат підсумовування зображень $E_1(X_1,Y_1,t_1)$ та $E_2(X_1,Y_1,t_2)$:

$$\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M} \Delta V_{n,m} \propto \sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M} \left(E_1(x_{1n},\ y_{1m},\ t_1) + E_2(x_{1n},\ y_{1m},\ t_2)\right) \approx E_1(x_1,\ y_1,\ t_1) + E_2(x_1,\ y_1,\ t_2) \tag{15}$$

При послідовно-поелементному оптичному чи електричному зчитуванні еквівалентна продуктивність ПОЕПОВ буде становити

$$W_{\text{ПОР}}^{(+)} \approx 9\cdot10^{7} \div 9\cdot10^{9} \quad [\text{операцій/с}]$$

При паралельному оптичному чи електричному зчитуванні інформації із всіх фоточутливих елементів пам'яті одночасно еквівалентна продуктивність досягне величини:

$$W_{\text{П.Е}}^{(+)} \approx 10^{5} \div 10^{6} \quad [\text{операцій/с}]$$

Для виконання операції віднімання зображень $E_1(X_1,Y_1,t_1)$ та $E_2(X_1,Y_1,t_2)$ за допомогою ПОЕПОВ на основі інтегральних МНОП-n-p структур достатньо здійснити на першому такті оптичне керування записом інформації, а на другому – оптичне керування витиранням. Сумарний накопичений заряд буде дорівнювати:

$$\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M} Q_N(x_{1n},\ y_{1m}) \approx \sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}\left(Q_{N1}(x_{1n},\ y_{1m}) - Q_{N2}(x_{1n},\ y_{1m})\right) \tag{16}$$

При здійсненні послідовно-поелементного оптичного чи електричного зчитування еквівалентна продуктивність ПОЕПОВ буде становити

$$W_{\text{П.Е}}^{(-)} \approx 10^{5} \div 10^{6} \quad [\text{операцій/с}]$$

При паралельному оптичному чи електричному зчитуванні інформації із всіх функціональних елементів ПОЕПОВ одночасно еквівалентна продуктивність досягне величини:

$$W_{\text{ПОР}}^{(-)} \approx 9\cdot10^{7} \div 9\cdot10^{9} \quad [\text{операцій/с}]$$

Найбільша кількість енергії випромінювання, при виконанні розглянутих операцій додавання і віднімання зображень, необхідна для здійснення функцій оптичного керування записом і витиранням інформації в інтегральній МНОП-n-p структурі. Тому за розрахункову порогову чутливість при виконанні операцій додавання і віднімання зображень необхідно прийняти величину ~ 10^{-6} Дж/см^2 [21], а за експериментально підтверджену ~ $10^{-5} \div 10^{-4}$ Дж/см^2 [23].

Окрім розглянутих обчислювальних операцій множення, додавання і віднімання зображень розроблений ПОЕПОВ на основі інтегральних МНОП-n-p структур може виконувати порогове сприйняття зображень з керованим порогом чутливості, а також традиційні для всіх первинних перетворювачів перетворення вхідного зображення $I(X_1,Y_1,t)$ на вихідний електричний сигнал $\Delta V(X_{1n},Y_{1m},t)$ або $\Delta V(t)$ [21].

Для порогового сприйняття зображення у первинному перетворювачі необхідно зберігати масив нормувальних коефіцієнтів $\{K(X_n,Y_m)\}$. Такий масив може бути зформований безпосередньо в інтегральній МНОП-n-p структурі за рахунок нормування ефективності перетворення інтенсивності випромінювання на нерівноважні носії зарядів, накопиченням на пастках нітриду кремнію величини заряду $Q_N(X_{1n},Y_{1m})$, що відповідає потрібному нормувальному коефіцієнту $K(X_{1n},Y_{1m})$. Нормувальні коефіцієнти можуть бути введені в розробленому первинному перетворювачі на основі інтегральних МНОП-n-p структур, наприклад, за допомогою проектування на нього випромінювання через транспарант T(x, y), який забезпечує після здійснення функції оптичного керування записом інформації необхідний просторовий розподіл зарядів $Q_N(X_{1n},Y_{1m})$ в нітриді кремнію функціональних елементів. Оскільки в цьому разі

$$Q_N(x_{1n},\ y_{1m}) \approx K(x_{1n},\ y_{1m}) \tag{17}$$

то і чутливість функціонального елемента n, m виявляється пронормованою відповідно до транспаранту T(x, y)

$$S(x_{1n},\ y_{1m},\lambda,\ t) \propto K(x_{1n},\ y_{1m}) \tag{18}$$

Так, що при послідовно-поелементному зчитуванні сприйнятого зображення $E(X_1,Y_1,t)$ вихідний електричний сигнал в кожному елементі n, m буде пронормовано відповідно до встановленого порогу чутливості.

Динамічний діапазон змін $K(X_{1n},Y_{1m})$ – 40 дБ. Еквівалентна продуктивність при послідовно-поелементному виконанні порогового сприйняття зображень буде становити

$$\Delta V_{n,m} \propto S(x_{1n},\ y_{1m},\lambda,\ t)\times I(x_{1n},\ y_{1m}) \propto K(x_{1n},\ y_{1m})\times I(x_{1n},\ y_{1m}) \tag{19}$$

При паралельному зчитуванні сприйнятого зображення вихідний електричний сигнал ПОЕПОВ також буде визначатись пороговою чутливістю кожного функціонального елемента n, m:

$$\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}\Delta V_{n,m} \propto \sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}\left(K(x_{1n},\ y_{1m})\times E(x_{1n},\ y_{1m},\ t)\right) \tag{20}$$

Еквівалентна продуктивність досягне величини:

$$W_{\text{П.Е}}^{(\text{П})} \approx 10^5 \div 10^6 \quad [\text{операцій/с}]$$

$$W_{\text{ПОР}}^{(\text{П})} \approx 9\cdot 10^7 \div 9\cdot 10^9 \quad [\text{операцій/с}]$$

Поріг чутливості при сприйнятті зображень визначається енергією випромінювання, необхідною для здійснення функції оптичного зчитування, і за розрахунками може досягти величини ~ 10^{-7} Дж/см^2 (експериментально підтверджено ~ $10^{-5}\div 10^{-6}$ Дж/см^2 [24]).

Завданням, яке можна виконати за допомогою виконання операцій перемноження зображень у первинних перетворювачах, є виділення зон, значення параметрів яких перевищує задану величину. Для цього достатньо записати оптичне зображення з параметрами зон, які не перевищують задану величину, а далі здійснювати зчитування оптичного зображення. Під час зчитування інформативний сигнал буде утворюватись лише в зонах, значення параметрів в яких перевищують задану величину. За рахунок електричного керування при накопиченні заряду у нітриді кремнію МНОП-n-p структур за допомогою електрично керованого ключа можна у первинному перетворювачі програмно виділяти зони, значення параметрів в яких лежить в заданих границях, змінюючи величину накопиченого заряду. Подібно здійснюється виділення ізопараметричних зон зображення.

Виконання операції віднімання зображень може використовуватись, наприклад, для виділення зон, значення параметрів в яких змінюється з часом. Для цього достатньо виконати запис оптичного зображення, а через деякий час Δt на тому самому первинному перетворювачі здійснити його витирання. При подальшому зчитуванні інформативний сигнал буде утворюватись лише у тих зонах зображення, в яких за час Δt, можна виділити динамічні зони, які змінюються з тією чи іншою швидкістю.

Виконання операцій порогового сприйняття зображень дає змогу використовувати первинні перетворювачі на основі інтегральних МНОП-n-p структур для сортування і відбракування виробів за їхнім зовнішнім виглядом і геометричними розмірами, розпізнавання виробів, безконтактного вимірювання координат і виявлення виробів тощо.

3. Висновки. В умовах масового використання під час вирішення чітко визначених завдань опрацювання зображень комп'ютерні системи керування, в яких використовуються ОЕІП на основі інтегральних МНОП-n-p структур, можуть бути відповідно оптимізовані за рахунок підвищення експлуатаційних характеристик ПОЕПОВ і розроблення нових, нетрадиційних алгоритмів опрацювання зображень. Зокрема, такі перетворювачі можна застосовувати для виконання операцій перемноження, додавання і віднімання зображень у момент їхнього сприйняття. Отже, ОЕІП на основі інтегральних МНОП-n-p–структур можуть ефективно використовуватись при розв'язанні широкого класу задач промислової автоматики і систем керування, пов'язаних із опрацюванням оптичних зображень.

Розроблено моделі інформаційних процесів та дослідні зразки ОЕІП, в яких інформація про об'єкт управління або дослідження переноситься оптичним випромінюванням (міститься в оптичних сигналах), а її перетворення на електричну енергію (електричний сигнал) супроводжується попереднім опрацюванням цього випромінювання (оптичного сигналу), та які дають змогу поєднати досягнення мікроелектронної технології з перевагами оптичних методів опрацювання інформації.

1. Дудикевич В.Б., Литвин І.С. Попередня обробка інформації в ОЕІП / Вісник ДУ "Львівська політехніка" "Автоматика, вимірювання та керування" № 356 // Львів. –1998. – С. 54–61. 2. Литвин І.С. Інформаційні процеси в управлінні. Тернопіль: Економічна думка, 1998. – 303 – С. 3. Литвин І.С. Інформаційна ефективність блоків оптоелектронних пристроїв // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, № 4. Хмельницький – 2001. – С. 33–37. 4. Литвин І.С. Вплив компонентів та структури на інформаційну ефективність оптоелектронних пристроїв. Вісник інженерної академії України. Київ. – 2006.– № 2. – – С. 53 – 57. 5. Литвин І.С. Інформаційна ефективність оптичних блоків оптоелектронних інформаційних пристроїв. Вісник національного університету Поділля. № 5, Хмельницький, – 2007. – С. 168–174. 6. Гонсалес Р., Р.Вудс. Цифровая обработка зображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с. 7. Кожемяко В.П., Тимченко Л.И., Лисенко Г.Л., Кутаев Ю.Ф. Функциональные элементы и устройства оптоэлектроники. . К.: УМК ВО, 1990. – 251 с. 8. Паралельні обчислювальні методи та засоби пірамідального опрацювання інформації / В.П.Кожем'яко, Л.І.Тимченко, – С. М.Білан, А.В.Поплавський // ІСДО. Вінницький політехнічний інститут, – Вінниця, ІСДО, 1994. – 256 с. 9. Паралельно-ієрархічне перетворення як системна модель оптико-електронних засобів штучного інтелекту / В.П.Кожем'яко, Ю.Ф.Кутаєв, – С. В.Свечніков та ін. // Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2003. – 324 с. 10. Елементи око-процесорної опрацювання зображень в логіко-часовому середовищі // Вінниця, 2004. – 135 с. 11. Квантові перетворювачі на оптоелектронних логіко-часових середовищах для око-процесорного опрацювання зображень / В.П.Кожем'яко, Мартинюк Т.Б., Супригін О.І. Клімкіна Д.І. // Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2007. – 126 с. 12. Катыс Г.П. Оптические информационные системы роботов-манипуляторов. – М.: Машиностроение, 1977. – 272 с. 13. Абакумов В.Г., Крилов В.Н., Антощук – С. Г. Предварительная обработка сигналов изображений // Электроника и связь. Киев, 2004. – № 21. – С.64–67. 14. Антощук – С. Г., Крилов В.Н., Переверзнев В.А., Крушина Т.А. Статистические модели предварительной обработки зображений // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Черкаси, 2007. – С. 9–12. 15. Воробель Р.А. Методи ковзного підвищення контрасту на основі розтягу // Відбір і обробка інформації. – 1998. – Вип. 12(88). – С.94–99. 16. Воробель Р.А. Цифровий кусково-нелінійний гамма-коректор відеосигналу. Вісник НУ "Львівська політехніка". – № 420, Львів, 2006. – С. 52–57. 17. Ермаков О.Н. Прикладная оптоэлектроника. Москва: Техносфера, 2006. – 432 с. 18. Гуртов В. Твердотельная электроник. – М.: Техносфера, 2007. – 283 с. 19. Басов Н. Г., Плотников А. Ф., Селезнёв В. Н., Сагитов Р. Г. Новые реверсивные носители информации для оптоэлектронных запоминающих устройств. – Препринт ФИАН СССР, 1983, № 32. – 28 с. 20. Зотов В.Д., Беломестнов Е.М. Обработка оптических изображений полупроводниковыми информационными приемниками // Сборник трудов ИПУ "Проблемы управления, состояние и перспективы". – М.:ИПУ. 1981. – С. 43–60. 21. Плотников А.Ф., Селезнев В.Н., Сагитов Р.Г., Литвин И.С. Переходные процессы в МДП-n-p структурах. – Препринт ФИАН СССР, 1985, – № 264. – 8 с. 22. Литвин І.С. Первинні перетворювачі на основі інтегральних МНОП– n-p структур в завданнях опрацювання оптичних зображень / Технічні вісті,. – № 1(6) // Львів. – 1998. – С. 30–34. 23. Кондратенков Г.С. Обработка информации когерентными оптическими системами. – М.: Советское радио, 1972. – 206 с. 24. Литвин І.С. Фотоелектричні характеристики і параметри інтегральних МНОП-n-p структур. Збірник тез доповідей Національного університету "Львівська політехніка". – 2007. – С. 28.