

Корисна модель належить до галузі оптоелектроніки та комп'ютерного зору, зокрема до методів автоматизованого контролю якості формування субмікронних структур на поверхні підкладок у фотолітографічних процесах. Спосіб може бути використаний для контролю елементів оптоелектронних приладів, зокрема кодових дисків, лімбів, модуляційних та дифракційних структур, виготовлених методом фотолітографії. У процесі фотолітографічного формування субмікронних структур можливе виникнення дефектів, зумовлених неоднорідністю фоторезисту, порушеннями режимів експонування, дефектами підкладки або технологічними похибками на етапах травлення та металізації. Наявність таких дефектів негативно впливає на функціональні характеристики готових оптоелектронних елементів і потребує своєчасного виявлення на етапі виробництва.

Відомі способи виявлення дефектів, що ґрунтуються на візуальному контролі з використанням оптичної мікроскопії, характеризуються низькою продуктивністю та значною суб'єктивністю результатів, зумовленою людським фактором. Для підвищення ефективності контролю запропоновано автоматизовані методи аналізу зображень, у тому числі із застосуванням машинного навчання та нейромережових підходів. Однак такі рішення потребують значних обчислювальних ресурсів, великих обсягів розмічених навчальних даних і часто є малопридатними для роботи в умовах обмежених апаратних платформ або для аналізу регулярних бінарних кодових структур SriharishMuralidhar.2025.

"RecentAdvancementsinMachineVisionSystemsforIndustrialDefectDetection: A Review". JournalofEngineeringResearchandReports 27 (3):385-392. <https://doi.org/10.9734/jerr/2025/v27i31441>.

Відомі також способи контурного аналізу дефектів, що використовують генерацію еталонних контурів або їх порівняння з результатами обробки реальних зображень. Недоліками таких рішень є висока обчислювальна складність, залежність від якості навчальних даних та обмежена адаптація до висококонтрастних бінарних структур, характерних для фотолітографічно сформованих кодових послідовностей Haorong Wu, ZiqiLuo, FuchunSun, etal., "AnImprovementMethodforImprovingtheSurfaceDefectDetectionofIndustrialProduct sBasedonContourMatchingAlgorithms", Sensors, 24(12):3932 (2024). <https://doi.org/10.3390/s24123932>.

Відомі також підходи пропонують методи та системи виявлення дефектів поверхні виробів на основі машинного зору, що використовують аналіз характеристик зображення та моделювання різниць для класифікації дефектів, проте такі підходи все ще залежать від якості навчальних зразків та значних обчислювальних ресурсів (CN 112730427B,

Productsurface defectdetectionmethodandsystembasedonmachinevision, опубл. 2024. AnhuiKangnengElectricColtd. <https://patents.google.com/patent/CN112730427A/en>).

Існують також технічні рішення, що виконують порівняння еталонних та сканованих зображень для виявлення дефектів у надрукованих або оптичних зображеннях, що ілюструється, зокрема, в патенті (US20180131815A1 від 10.05.2018. Apparatusandmethodtodetect a defectin a printedimage. Автори AlexanderSpivakovsky, OdedPerry, OrenHaik, AviMalki. <https://patents.google.com/patent/US20180131815A1/en>), де порівняння проводиться між еталонним та сканованим зображенням для визначення наявності дефектів. Однак такі способи зазвичай мають обмежену адаптацію до змін у структурі послідовності та потребують додаткової обробки вхідних даних.

В основу корисної моделі поставлено задачу створення способу автоматизованого виявлення дефектів на поверхні підкладок у фотолітографічному процесі формування субмікронних структур, який забезпечує:

- високу чутливість до дрібних та структурних дефектів;
- стабільність роботи за змінних умов освітлення;
- низькі вимоги до обчислювальних ресурсів;
- можливість реалізації на вбудованих або промислових системах комп'ютерного зору без застосування методів машинного навчання.

Поставлена задача вирішується тим, що у способі виявлення дефектів здійснюють послідовну алгоритмічну обробку цифрового зображення поверхні підкладки, представленого у градаціях сірого, з подальшим формуванням бінарної маски та аналізом геометричних характеристик виявлених об'єктів. Спосіб за корисною моделлю включає такі основні етапи:

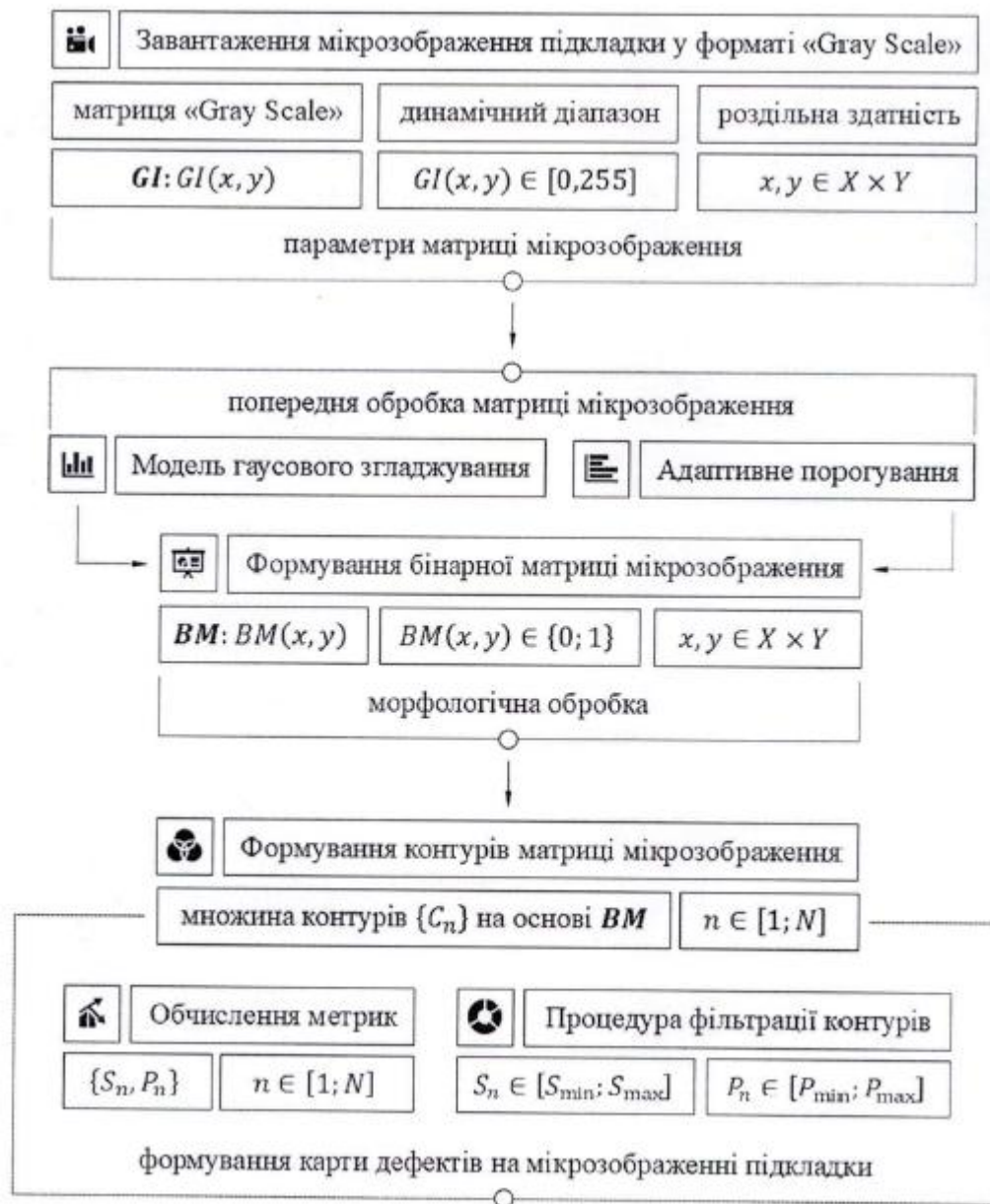
- отримання зображення поверхні підкладки у градаціях сірого з оптичної системи реєстрації;
- попереднє згладжування зображення з використанням гаусового фільтра для зменшення впливу високочастотного шуму;
- адаптивне порогоування з урахуванням локального середнього значення яскравості з інверсною логікою, в результаті чого формується бінарна маска структури;
- морфологічну фільтрацію бінарної маски шляхом послідовного виконання операцій закриття та відкриття зі структурним елементом фіксованого розміру, що забезпечує усунення дрібних шумових компонентів і стабілізацію геометрії об'єктів;
- виявлення контурів зв'язаних компонентів на очищеній бінарній масці;
- обчислення для кожного виявленого об'єкта його геометричних параметрів, зокрема площі та периметра;

- класифікацію об'єктів як дефектних у разі виходу хоча б одного з геометричних параметрів за межі попередньо заданих порогових значень;
- визначення координат центрів мас дефектних об'єктів та формування сукупності ознак для подальшого статистичного аналізу.

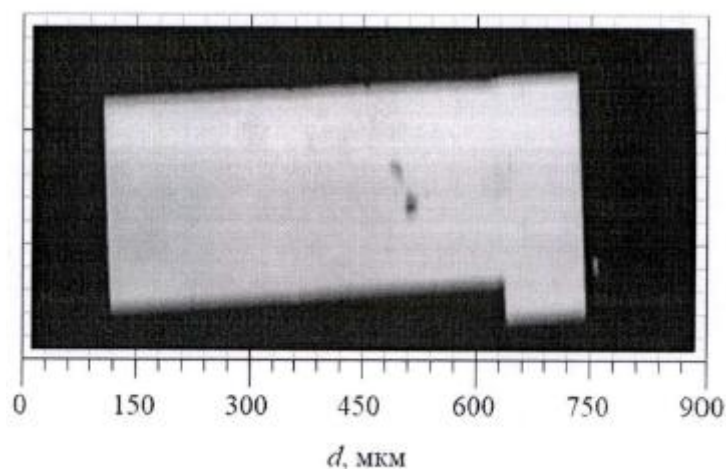
Схема реалізації способу наведена на фіг. 1. Задача виявлення дефектів формалізується як процес аналізу цифрового мікрозображення поверхні підкладки, у якому вхідний набір даних подається у вигляді матриці зображення GI у форматі "Gray Scale", що описується функцією $GI(x, y) \in [0; 255]$, де x та y - координати пікселів у двовимірному просторі зображення. На етапі попередньої обробки виконується згладжування матриці $GI(x, y)$ із застосуванням моделі гаусового фільтра та подальше адаптивне порогоування, в результаті чого формується бінарна матриця мікрозображення $BM(x, y) \in \{0; 1\}$, яка відображає структуру кодової послідовності. Подальша морфологічна обробка бінарної матриці $BM(x, y)$ спрямована на усунення шумових компонентів і стабілізацію геометрії об'єктів, після чого здійснюється формування множини контурів $\{C_n\}$, де кожен контур C_n , $n \in [1; N]$, відповідає окремій зв'язаній області бінарної структури. Для кожного з виявлених контурів C_n обчислюються геометричні характеристики, зокрема площа S_n та периметр P_n , які використовуються як інформативні ознаки для подальшого аналізу. Класифікація контуру C_n як такого, що відповідає дефектній ділянці, здійснюється шляхом порівняння значень S_n та P_n з попередньо заданими пороговими інтервалами $[S_{min}; S_{max}]$ та $[P_{min}; P_{max}]$, які визначаються емпірично або в процесі калібрування системи з урахуванням геометричних параметрів контрольованої структури. Результатом виконання алгоритму є формування карти дефектів на мікрозображенні підкладки з локалізацією та ідентифікацією областей, що потенційно не відповідають очікуваній геометрії регулярної бінарної кодової топології.

На фіг. 2 наведено зразок ділянки підкладки з фотолітографічно сформованою структурою, що містить локальні неоднорідності та мікрODEфекти, слабо виражені за рівнем контрасту. Наведене зображення ілюструє типовий вхідний матеріал для автоматизованого аналізу, при якому візуальне виявлення дефектів оператором є ускладненим через нерівномірність освітлення та незначні варіації яскравості фону. Результат застосування способу до відповідної мікрофотографії представлено на фіг. 3, де показано сформовану бінарну маску з виділеними дефектними об'єктами та їхніми контурами. На обробленому зображенні дефектні ділянки автоматично ідентифікуються, маркуються та можуть супроводжуватися унікальними ідентифікаторами, що дозволяє виконувати подальший кількісний аналіз без дублювання результатів. Виявлення об'єктів ґрунтується на аналізі їхніх геометричних характеристик, що забезпечує коректне розпізнавання як ізольованих мікрODEфектів, так і груп дефектів зі складною формою. Завдяки використанню адаптивного порогоування та морфологічної обробки спосіб є стійким до нерівномірності освітлення та локальних варіацій яскравості, характерних для мікрофотографій фотолітографічних структур. Орієнтація на аналіз геометричних характеристик бінарних структур дозволяє ефективно виявляти дефекти регулярної кодової топології без залучення методів машинного навчання, що особливо важливо для систем з обмеженими обчислювальними ресурсами.

Спосіб забезпечує високу чутливість до виявлення мікрODEфектів фотолітографічних структур, характеризується низькими вимогами до обчислювальних ресурсів, легко адаптується до різних умов реєстрації зображень та може бути інтегрований у промислові системи автоматизованого контролю якості.



Фіг. 1



Фіг. 2

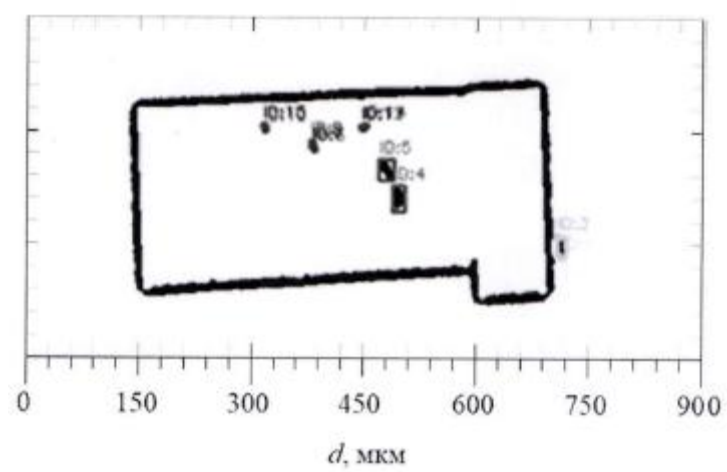


Fig. 3