

УДК 621.3.049.77:621.382.8

д-р філософії Романенко М. М. ORCID: 0000-0002-0646-2797 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

д-р філософії Погребняк С. В. ORCID: 0000-0002-7902-9847 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

Кокошинський В. В. ORCID: 0000-0001-6364-6261 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ НА НАДІЙНІСТЬ ЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ

Мікročип – головний елемент мікропроцесорної техніки, що складається з мільярдів транзисторів, які є одиницями і нулями в сучасних цифрових системах. І ось уже 50 років ведеться нескінченна технологічна гонитва за зменшенням розмірів цих елементів. Сучасні тенденції еволюції технологій у сфері комунікаційних систем окреслили перспективи та напрямки багатьох аспектів глобального розвитку людства в осяжному майбутньому.

Зменшення масогабаритних розмірів мікročипів відбувалось постійно, а кількість шарів транзисторів та їхня потужність подвоювалось що два-три роки.

Застосування способів літографії досить довгий час дозволяло отримувати бажані результати, а покращення технології її використання сприяло постійному розвитку цифрових систем. Проте ефективність існуючих методів створення мікропроцесорної техніки почала знижуватись з початком двадцять першого століття. Це стало відомим як “закон Мура” (Moore’s law). Тож провідні науковці в цій галузі почали пошук нових способів виготовлення мікročипів. Виходячи з широкого спектра галузей, де використовуються мікропроцесори, питання створення нових методів компонування мікročипів, яке б сприяло їх зменшенню, є актуальним.

У статті розглянуто варіанти існуючих методів створення мікročипів та проведено аналіз їхніх недоліків. Вивчено питання розвитку інноваційних методів та способи їх практичної реалізації. Обґрунтовано перспективи подальшого розвитку цієї галузі. Отримані числові показники масогабаритних розмірів мікročипів, створених за допомогою інноваційних методів, та запропоновано теоретичні основи подальшого розвитку напрямку літографії напівпровідникових мікроелементів. Визначено критичні параметри, які впливають на надійність мікропроцесорної техніки, в тому числі військового призначення.

Ключові слова: мікročип, мікроелектроніка, довжина хвилі, літографія, наноструктури, математична модель, надійність.

M. Romanenko, S. Pohrebniak, V. Kokoshynskyi. Impact of microelectronics manufacturing technologies on the reliability of electronic devices

A microchip is the main element of microprocessor technology, consisting of billions of transistors that are ones and zeros in modern digital systems. And for 50 years now, there has been an endless technological pursuit of reducing the size of these elements. Modern trends in the evolution of technologies in the field of communication systems have outlined the prospects and directions of many aspects of global development of mankind in the foreseeable future.

The reduction in the mass and overall dimensions of microchips occurred constantly, and the number of transistor layers and their power doubled every two to three years.

The use of lithography methods for a long time allowed to obtain the desired results, and the improvement of the technology of its use contributed to the constant development of digital systems. However, the efficiency of existing methods of creating microprocessor technology began to decline with the beginning of the twenty-first century. This became known as “Moore’s law”. Therefore, leading scientists in this field began to search for new methods of manufacturing microchips. Based on the wide range of industries where microprocessors are used, the issue of creating new methods of arranging microchips, which would contribute to their reduction, is relevant.

The article considers options for existing methods for creating microchips and analyzes their shortcomings. The issue of developing innovative methods and methods for their practical implementation is studied. The prospects for further development of this industry are substantiated. Critical parameters that affect the reliability of microprocessor technology, including military ones, are determined. Numerical indicators of the mass and overall dimensions of microchips created using innovative methods are obtained and theoretical foundations for further development of the direction of lithography of semiconductor microelements are proposed.

Keywords: microchip, microprocessor, wavelength, lithography, numerical aperture, laser, nanostructures, mathematical model.

Проте на початку 2000-х років інженери зіткнулись з проблемою: зменшення розмірів стало неможливим через фізичну межу технологій, які використовувались для створення мікрочипів.

Звичайні методи літографії, такі як фотолітографія (Ultraviolet, UV; Deep Ultraviolet, DUV; Extreme Ultraviolet, EUV) здатні забезпечити розмірність елементів до 13,5 нм, проте такі розміри більше не задовольняють вимоги виробників. Критерієм, який уповільнив і зупинив цей напрям, стала довжина хвилі і неможливість зменшення числової апертури, який описується рівнянням Релея.

$$CD = k_1 \frac{\lambda}{NA}$$

Мінімальний розмір елемента або критичний вимір (Critical Dimension, CD) можливо зменшити, виключно працюючи з меншою довжиною хвилі, так як розмір числової апертури неможливо збільшувати нескінченно. Порівняння двох різних довжин хвиль при однаковому розмірі “трафаретних” технологічних отворів в масках (рис. 2) згенеровано за допомогою Scientific Image Generator (2026) для наочної візуалізації процесів, що відбуваються. Саме зменшення довжини хвилі і відбувалось, поки індустрія не зупинилась на глибокому ультрафіолеті із довжиною хвилі 193 нм.

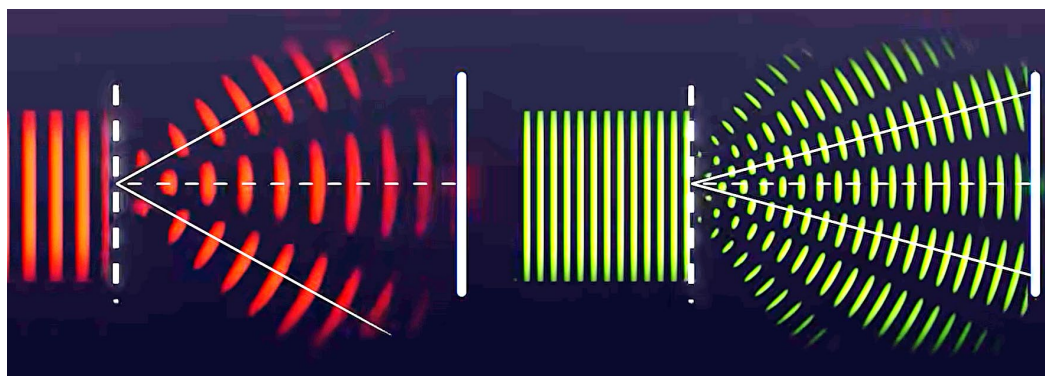


Рис. 2. Використання світла з коротшою довжиною хвилі для літографії при однакових значення числової апертури (згенеровано за допомогою Scientific Image Generator, 2026)

Аналіз останніх публікацій

Сучасний стан розробки мікропроцесорної бази ґрунтується здебільшого на широкому застосуванні сполук кремнію. Головні подібності та відмінності процесів розробки та створення кремнієвих мікрочипів (мікропроцесорів) та мікроелектронних систем і виробів мікроелектроніки представлені на рисунку 3.

Визначальним чинником, який впливає на вибір концепції виготовлення мікрочипів, є його розміри. Етап проектування мікрочипа супроводжується тривимірним об'ємним моделюванням пошарової структури чипів. Необхідність моделювання електричних, механічних, кінематичних та інших процесів суттєво відрізняється при проектуванні мікрокомпонентів [1].



Рис. 3. Подібність і відмінність процесів розробки й виготовлення кремнієвих мікросипів і виробів мікроелектроніки

Однак не дивлячись на існування принципових відмінностей між різними концепціями, існують головні принципи літографії, які можна умовно спростити до чотирьох основних процесів: покриття, експонування, травлення, осадження. І такі процеси повторюються сотні циклів залежно від чипа [2].

У роботах [3–5] вивчалось питання можливості створення процесів літографії на основі теорії про нерівномірні щільності (Assumption of Uniform Pattern Density, AUPD), однак ця теорія не знайшла широкого розповсюдження через складність реалізації. В теорії стверджувалось, що розрахунок маски можливо здійснити через визначення оптимальної кількості таких щільностей:

$$I(r) = \sum_m \Gamma_m |h^m(r) \otimes M(r)| n^2,$$

де $M(r)$ представляє шаблон маски; r – просторова координата; \otimes представляє операцію згортки; $h^m(r)$ – функція розсіювання точок літографічної системи, пов'язана з точкою джерела m ; Γ_m представляє інтенсивність точки джерела; n – кількість таких джерел.

Враховуючи ефект фоторезисту, зображення друку на пластині визначається як модель для вузлів передової літографії, модель візуалізації в рівнянні можна легко модифікувати, щоб включити тривимірні (3D) ефекти маски, замінивши M у рівнянні:

$$Z = sig\{I, t_r\} = 1 / \{1 + \exp[-a_r(I - t_r)]\},$$

де t_r – поріг фоторезисту;

a_r – визначає крутизну сигмоподібної функції.

У роботах [6–8] розглянуті теоретичні аспекти удосконалення літографії способом екстремального ультрафіолету (Extreme Ultraviolet, EUV). Однак обмежена яскравість джерела світла EUV та обмежена відбивна здатність багат шарових дзеркал висувають нові вимоги до чутливості фоторезистів. Крім того, характеристики формування структури EUV з високою роздільною здатністю вимагають резистивних матеріалів з меншими розмірами компонентів та вищою стійкістю до травлення. Таким чином, розробка фоторезистів з новими характеристиками EUV залишається проблемою.

У роботах [9; 10] розглянуто еволюцію EUV фоторезистів, включаючи хімічно посилені резисти, нехімічно посилені полімерні резисти, молекулярні скляні резисти та металовмісні резисти, а також майбутні тенденції розвитку EUV-чутливих матеріалів. Роботи синтезують результати існуючих досліджень, щоб висвітлити фундаментальні принципи, характеристики продуктивності та практичні проблеми кожного методу. Порівняння зосереджено на ключових метриках, включаючи роздільну здатність, глибину фокусування, дозу опромінення, шорсткість краю лінії, точність накладання та пропускну здатність, показуючи, як різні підходи балансують ці конкуруючі фактори. Висунута гіпотеза про можливість використання випромінювання з меншою довжиною хвилі, а саме рентгенівського випромінювання.

У статті [11] досліджується розвиток, концепції та напрямки вдосконалення основних методів літографії, включаючи літографію в екстремальному ультрафіолетовому діапазоні (EUV), електронно-променеву літографію (EBL), рентгенівську літографію (XRL), іонно-променеву літографію (IBL) та наноімпринтну літографію (NIL). Проводиться аналіз, включаючи визначення принципів, роздільної здатності та резистивних матеріалів. EUV-літографія з роздільною здатністю менше 10 нм є життєво важливою для розширення закону Мура. Така технологія застосовує оптичні системи з високою числовою апертурою (NA) та хімічно посилені резисти. EBL та IBL дають можливість створювати безмаскові шаблони для створення прототипів, проте недоліком є низька продуктивність. Технологія XRL, застосовуючи принцип синхротронного випромінювання, здатна забезпечити високу роздільну здатність, тоді як NIL забезпечує економічно ефективний метод високої продуктивності для реплікації наноструктур.

Мета статті полягає в аналізі розвитку технології фотолітографії для компонування наноструктур мікропроцесорної техніки з використанням довжин хвиль рентгенівського випромінювання та її вплив на надійність цих елементів.

Виклад основного матеріалу. На початку 80-х років була висунута ідея про можливість використання для фотолітографії хвиль рентгенівського випромінювання із довжиною близько 10 нм. Що в теорії давало б змогу друкувати елементи в рази менші за розмірами, ніж це можливо при використанні видимого спектра частот. Однак одразу було виявлено проблему: рентгенівські промені мають достатню енергію, щоб вибивати електрони з атомів, тож більшість матеріалів його просто поглинають. Але одночасно з цим вони поглинаються і повітрям. Тож це означає, що таке устаткування має працювати у вакуумі. Але ще однією проблемою стало неможливість використання фокуруючих лінз, адже лінзи теж поглинали таке світло.

Однак були розроблені дзеркала, які могли фокусувати рентгенівське світло. Такі дзеркала являли собою багатократне чергування надтонких (близько 1 нм) шарів вольфраму та вуглецю, що давало можливість створити сферичне дзеркало. Для кожної довжини хвилі необхідне чітко визначена кількість таких шарів. Для довжини хвилі 4,48 нм, яка досліджувалась, кількість таких шарів склала 76.

На початкових етапах проводились експерименти з довжинами хвиль від 4 нм до 13 нм. Проте практичні досліди виявили, що після проходження всіх дзеркал до кінцевої точки доходило лише 0,00128 % від початкової потужності, що стало критично малою величиною [11].

Для подолання зазначеної проблеми застосовують процес, який базується на нагріванні лазером, потужністю 1700 Вт, цільового матеріалу – олова до температури 220 000 °С. При цьому електрони отримують настільки велику енергію, що ядро їх більше не може утримувати, і до половини кількості електронів залишають свої орбіти. Після припинення впливу лазера електрони рекомбінують і створюють плазму, при цьому вивільняється енергія з потрібною довжиною хвилі близько 13,4 нм. Для кращої візуалізації фізичних процесів рекомбінації, що відбуваються, використано штучний інтелект (згенеровано за допомогою Scientific Image Generator, 2026) (рис. 4).

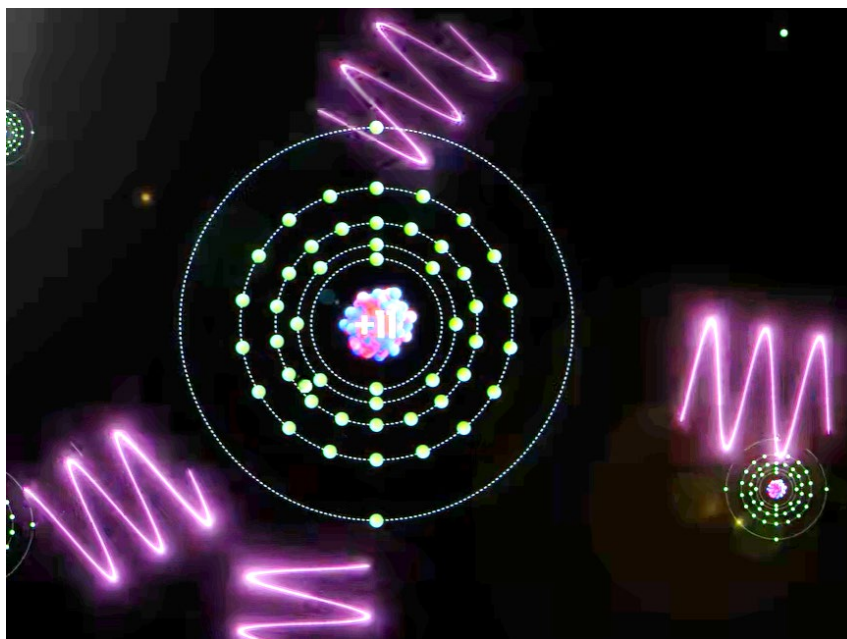


Рис. 4. Процес створення плазми за допомогою лазера (згенеровано за допомогою Scientific Image Generator, 2026)

Для отримання ще стабільнішого процесу застосовуються подача олова в рідкому стані під великим тиском для створення безперервного потоку надтонкого променю, на який здійснюється вплив лазерного потоку з частотою 50 000 спалахів на секунду.

Щоб зменшити вплив сусідніх крапель олова, запропоновано кожну краплю піддавати впливу лазера три рази поспіль. Перший вплив змінює форму краплі з “кулі” на “диск”, що збільшує площу для наступного “пострілу”. Третій вплив створює безпосередньо плазму, яка вивільняє потрібну довжину хвилі. Для розрахунку такого процесу застосовують формулу Тейлора-фон Неймана-Седова (1):

$$R(t) = \left(\frac{Et^2}{\rho_0} \right)^{1/5}. \quad (1)$$

Ця формула описує автомодельне вирішення для потужного точкового вибуху. Визначає радіус $R(t)$ ударної хвилі та через енергію E вибуху щільність середовища ρ_0 та час t .

Застосувавши (1) для визначення енергії, отримаємо:

$$E = \frac{R^5 \rho_0}{\beta^5 t^2}, \quad (2)$$

де R (радіус) – на яку відстань відійшла ударна хвиля (можна виміряти по фото);

t (час) – скільки мілісекунд минуло з моменту спалаху до цього моменту;

ρ_0 (густина) – густина газової суміші, в якій відбувається вибух;

β (коефіцієнт) – безрозмірна константа, яка для повітря становить приблизно 1,033. Враховуємо, що енергія електромагнітної хвилі визначається як (3):

$$E = \frac{hc}{\lambda}, \quad (3)$$

де E – енергія фотона (кванту електромагнітного випромінювання);
 h – стала Планка $6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж/с;
 c – швидкість світла.

Об'єднавши (2) і (3), отримаємо, що довжина хвилі λ обернено пропорційна густині середовища ρ_0 , в якій вона розповсюджується, прийнявши решту змінних за *const*.

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{R^5 \rho_0}{\beta^5 t^2} \rightarrow \lambda = \frac{hc \beta^5 t^2}{R^5 \rho_0} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 1,033^5 \cdot 10^{-10}}{10^{-26} \cdot 0,7} = 3,273 \cdot 10^{-9}.$$

Отже, можливо отримати необхідну довжину хвилі шляхом збільшення густини газів в літографічній камері. Нині інженери використовують водень під високим тиском, проте густина водню складає лише $0,09$ кг/м³. Якщо ж в літографічну камеру додати кисень з густиною $1,43$ кг/м³ (у необхідній пропорції), теоретично можливо збільшити густину до $0,5-0,7$ кг/м³, що в свою чергу може зменшити довжину хвилі з $13,5$ нм до $7-7,5$ нм. Таким чином, перехід на довжину хвилі 7 нм дозволив би друкувати транзистори з критичним розміром (найменшим елементом) приблизно $3,27-3,5$ нм за один прохід експонування.

Додавання кисню в камеру літографічного апарату також дозволить покращити стан самих дзеркал (збільшить час їх роботи без необхідності очищення), так як кисень, рекомбінуючи з іонами водню, створюватиме захисне покриття.

Проте окрім проблематики зі зменшення наноструктур виникає питання їхньої надійності через зменшення їхніх розмірів. Теорія надійності мікропроцесорної техніки обумовлює теоретичні допуски межі та критичні розміри для наноструктур, оскільки процес фізичної деградації мікропроцесорної техніки відбувається в процесі експлуатації [12].

$$I_{MC}^{0,1} = -\frac{2dD_n}{\mu n L_n (R_{дн3}^0 + R_{днн2}^0)} \operatorname{csch} \frac{W}{L_n} n_1 + \frac{2dD_n}{\mu n L_n (R_{дн3}^0 + R_{днн2}^0)} \operatorname{cth} \frac{W}{L_n} n_2,$$

де W – ширина бази (елемента);

L_n – довжина дифузії (зменшується при накопиченні деградації);

D_n – коефіцієнт дифузії дефектів;

$R_{дн3}^0$ – значення опорів донорського шару.

При мінімізації $W \rightarrow$ аргумент $\operatorname{csch}/\operatorname{cth}$ зростає.

Зазначену модель використовують для різних типів мікрочипів з метою отримання діагностичного параметра базового логічного елемента транслятора напівпровідникової інтегральної схеми у вигляді величини струму залежно від фізико-хімічних властивостей напівпровідника і залежно від часу напрацювання.

Існуюча діагностична модель інтегральних мікросхем описує колекторні струми в структурах транзисторів вихідного транслятора, що дає можливість розрахувати час напрацювання таких елементів при зменшенні структур аж до нанорівнів.

Для підтвердження цієї теорії було проведено математичне моделювання в середовищі Python з використання бібліотеки Matplotlib з репрезентативною вибіркою 126 ітерацій.

У процесі моделювання отримані показники (рис. 5), що підтверджують істотне збільшення процесу деградації наноструктур. Основні показники зведено в таблицю 1.

Таблиця 1

| № | D_n ($\text{см}^2/\text{с}$) | μ_n ($\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$) | L_n (мкм) | W (нм) | $R_{\text{днЗ}}^0$ (Ом) | n_1 (см^{-3}) | n_2 (см^{-3}) | Орієнтовний час напрацювання $\cdot 10^3$ (год) |
|---|-------------------------------------|--|----------------|----------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---|
| 1 | 25 | 1500 | 10 | 180 | 50 | $1\text{e}15$ | $5\text{e}15$ | $\sim 100\ 000$ |
| 2 | 30 | 1200 | 15 | 90 | 80 | $2\text{e}15$ | $6\text{e}15$ | $\sim 9\ 500$ |
| 3 | 20 | 1000 | 8 | 14 | 40 | $1\text{e}14$ | $3\text{e}15$ | $\sim 8\ 000$ |
| 4 | 35 | 1800 | 20 | 7 | 100 | $5\text{e}15$ | $1\text{e}16$ | ~ 700 |

Основні показники розрахункової математичної моделі часу напрацювання наноструктур.

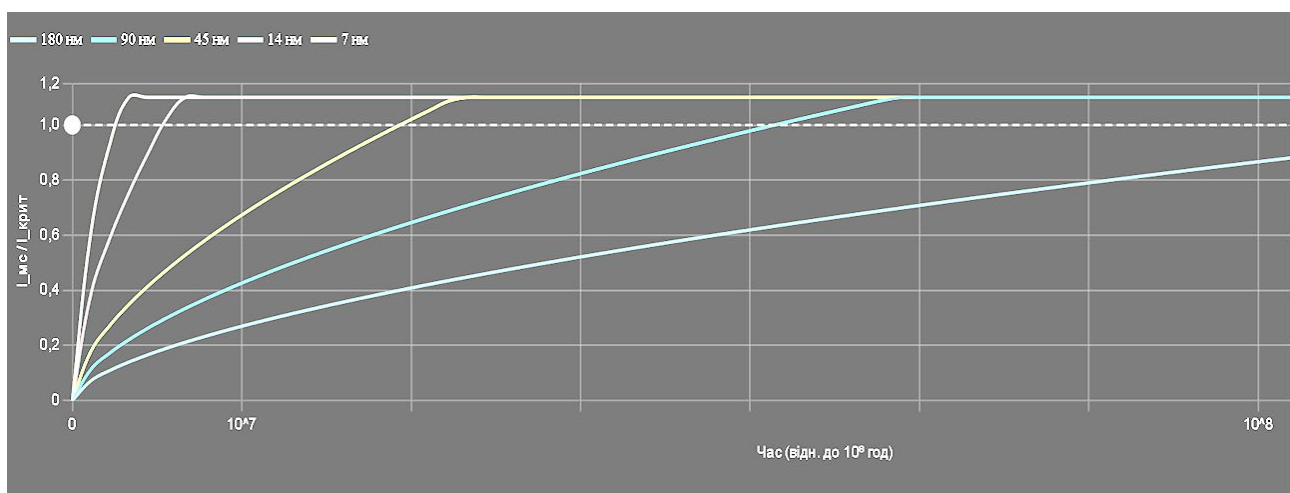


Рис. 5. Моделювання процесів фізичної деградації наноструктур залежно від розмірів (180 нм, 90 нм, 14 нм, 7 нм) та розрахунковий час напрацювання

У процесі моделювання отримано значення, що чітко відображають зменшення часу напрацювання з 10^8 годин при структурі у 180 нм до 10^6 годин при структурі у 7 нм.

Подальше кратне зменшення розмірів наноструктур до 3,5 нм теоретично призведе до зменшення часу напрацювання таких елементів до 10^4 годин. Що в свою чергу негативно вплине на загальний час експлуатації електронних засобів. Ця теорія потребує перевірки в лабораторних умовах та поки що не може бути підтверджена чи спростована шляхом натурних експериментів.

Таким чином, питання зменшення розмірів мікрочипів обмежується не лише “законом Мура”, а й вимогами до надійності та довговічності зазначених зразків, що особливо актуально для наноструктур, які використовуватимуться в системах військового або подвійного призначення.

Висновки і перспективи подальших досліджень

У роботі розглянуто існуючі технології літографії. Здійснено порівняння їхніх основних особливостей. Визначено головні відмінності та параметри, які забезпечують економічну доцільність їх використання в майбутньому. Проаналізовано перспективні напрямки розвитку технології літографії в екстремальному ультрафіолеті. Запропоновано спосіб удосконалення існуючої технології для зменшення довжини хвилі. Проведено математичні розрахунки для підтвердження запропонованої теорії. Одночасно з цим вирішена наукова задача визначення залежності надійності мікропроцесорної техніки від величини напівпровідникових структур.

Дані підтверджені математичним моделюванням процесів фізико-хімічної деградації структур напівпровідникових елементів. Подальшим напрямком роботи вбачається розробка оптимізації процесу літографії в екстремальному ультрафіолеті для отримання довжин хвиль рентгенівського випромінювання з урахуванням вимог до надійності та довговічності електронних засобів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Zafar F. Indium phosphide nanowires and their applications in optoelectronic devices / Fateen Zafar and Azhar Iqbal // Proc. Math. Phys. Eng. Sci. 2016. No. 472 (2187). P. 20150804.
2. Pumarol-Crestar M. E. Gold nanodot and nanowire fabrication by Atomic Force Microscopy / Manuel E. Pumarol-Crestar. Centre for the Physics of Materials Department of Physics, McGill University, Montreal, Canada, 2008. 137 p.
3. Ван С. Ма, Г. Р. Арсе та ін. Інформаційно-теоретичні підходи в обчислювальній літографії // Opt. Express. 2018. No. 26 (13). P. 16736–16751.
4. X. Ma, Z. Wang, L. Yanqiu et al. Fast optical proximity correction method based on nonlinear compressivesensing // Opt. Express. 2018. No. 26 (11). P. 14479–14498.
5. Scaling EUV and holistic lithography to support Moore's Law through the AI era Event: SPIE Advanced Lithography + Patterning, 2025, San Jose, California, United States Proceedings Volume PC13424, Optical and EUV Nanolithography XXXVIII, PC1342401. 2025. URL: <https://doi.org/10.1117/12.3059296>.
6. Jinhui Lai. A Review of Extreme Ultraviolet Lithography and Its Future Development Trends Advances in Engineering Technology Research Maynooth International Engineering College, Fuzhou University, Fuzhou, China Volume-14-2025. DOI: 10.56028/aetr.14.1.1608.2025.
7. Harry J. Levinson. Extreme Ultraviolet Lithography, 2nd Edition // SPIE Press. 2025. DOI: 10.1117/3.100387, ISBN: 9781510692541.
8. Xiaolin Wang, Peipei Tao, Qiangian Wang, Rongbo Zhao, Tiangi Liu, Yang Hu, Ziyu Hu, Yimeng Wang, Jianlong Wang, Yaping Tang, Hong Xu. Trends in photoresist materials for extreme ultraviolet lithography: A review // Materials Today. Volume 67. July–August 2023. P. 299–319. DOI: 10.1016/j.mattod.2023.05.027.
9. Dimitrios Kazazis, Jara Garcia Santaclara, Jan Schoot, Iacopo Mochi, Yasin Ekinci. Extreme ultraviolet lithography // Nature Reviews Methods Primers. 2024. DOI: 10.1038/s43586-024-00361-z.
10. Sunyu Jiang. Research on Fundamental Principles and Performance Optimization Strategies in Lithography Technology University of Michigan-Shanghai Jiao Tong University Joint Institute, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China Proceedings of CONF-MCEE 2026 Symposium: Advances in Sustainable Aviation and Aerospace Vehicle Automation. DOI: 10.54254/2755-2721/2026.KA26665.
11. Prithvi Basu, Jyoti Verma, Vishnuram Abhinav. Advancements in Lithography Techniques and Emerging Molecular Strategies for Nanostructure Fabrication // International Journal of Molecular Sciences (IJMS). March 2025. DOI: 10.3390/ijms26073027.
12. Жердев М. К., Кузавков В. В. Діагностична модель базового логічного елементу транслятора напівпровідникової інтегральної схеми для безконтактного індукційного методу діагностування // Collection of Scientific Papers of Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv. 2014. № 46. С. 13–18.

Надійшла до редколегії 12.02.2026.

Схвалена до друку 22.05.2026.

Дата публікації 29.05.2026.