

Основи та можливості безмаскової оптичної літографії

Володимир Джаган, Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України

Масове виробництво електронних та оптоелектронних пристроїв, і навіть етап їх досліджень та розробок досі значною мірою спираються на оптичну літографію, що реалізується шляхом застосування попередньо виготовлених шаблонів (масок), необхідних для вибіркового нанесення або видалення функціонального матеріалу на частини підкладки. На Рис. 1 цей підхід проілюстровано схематично на прикладі селективного видалення шару оксиду на поверхні кремнієвої пластини. Даний процес складається з таких етапів: нанесення шару спеціального фоточутливого полімеру – фоторезисту (1); селективна засвітка (експозиція) потрібних ділянок півки фоторезисту через маску, виготовлену заздалегідь (2); проявлення фоторезисту – селективне травлення засвічених (для позитивного фоторезисту) або незасвічених (для негативного фоторезисту) ділянок фоторезисту (3); травлення відкритих ділянок шару оксиду (4).

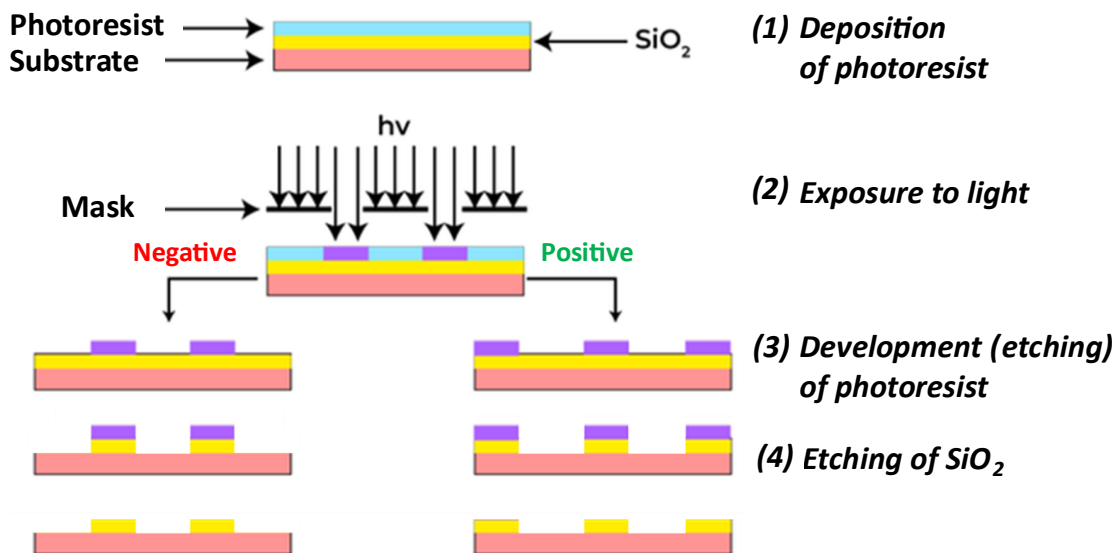


Рисунок 1. Узагальнена схема процесу традиційної (маскової) оптичної літографії
Запозичено з роботи [1].

Виготовлення навіть відносно простого мікроелектронного пристрою вимагає великої кількості повторення описаних вище етапів з різним «рисунком», та, відповідно, виготовлення численних масок, для формування необхідної 3D-архітектури приладу, що є системою взаємопов'язаних напівпровідникових, діелектричних та металевих сегментів. На Рис. 2 цей процес проілюстровано на прикладі виготовлення елементів мікроелектроніки за найбільш поширеною технологією – КМОН-структура (комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник, *англ. CMOS – complementary metal-oxide-semiconductor*).

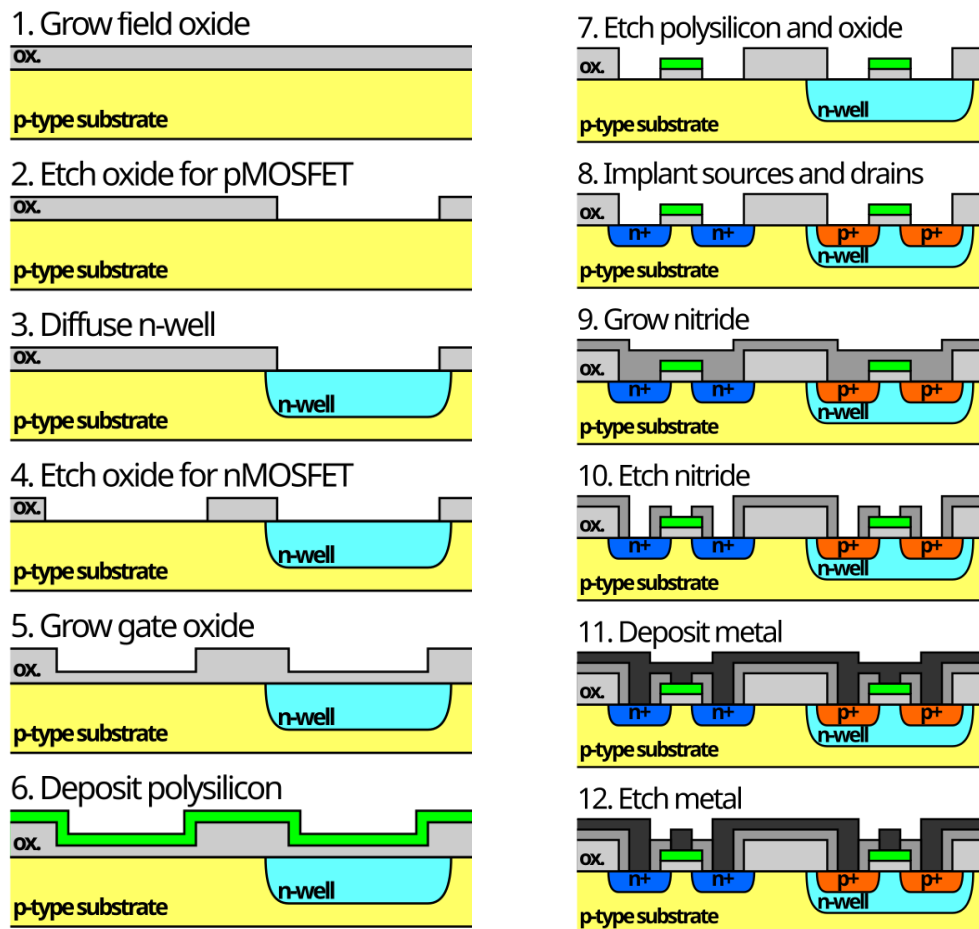


Рисунок 2. Схематичне зображення процесу виготовлення елементів мікроелектроніки за *CMOS*-технологією Запозичено з роботи [2].

Оскільки на етапі розробки пристрою необхідно протестувати багато різних архітектур та параметрів кожного з компонентів, це здорожує та сповільнює процес розробки, і дозволити собі його можуть лише найбільш технологічно оснащені і фінансово забезпечені компанії і наукові центри.

Крім того, уповільнення та очікуване близьке у часі завершення масштабування елементів мікроелектроніки, передбаченого класичним законом Мура для напівпровідникових приладів [3], ставить під загрозу подальший розвиток кремнієвих КМОП-інтегральних схем [4]. Ця ситуація викликає нагальну потребу в розробці нових матеріалів, структур пристроїв та процесів їх інтеграції, а також спеціалізованих системних архітектур для постмурівської ери. В результаті з'явилося кілька стратегій, які пропонують майбутній розвиток технології: More Moore, More than Moore та Beyond CMOS (Рис. 3).

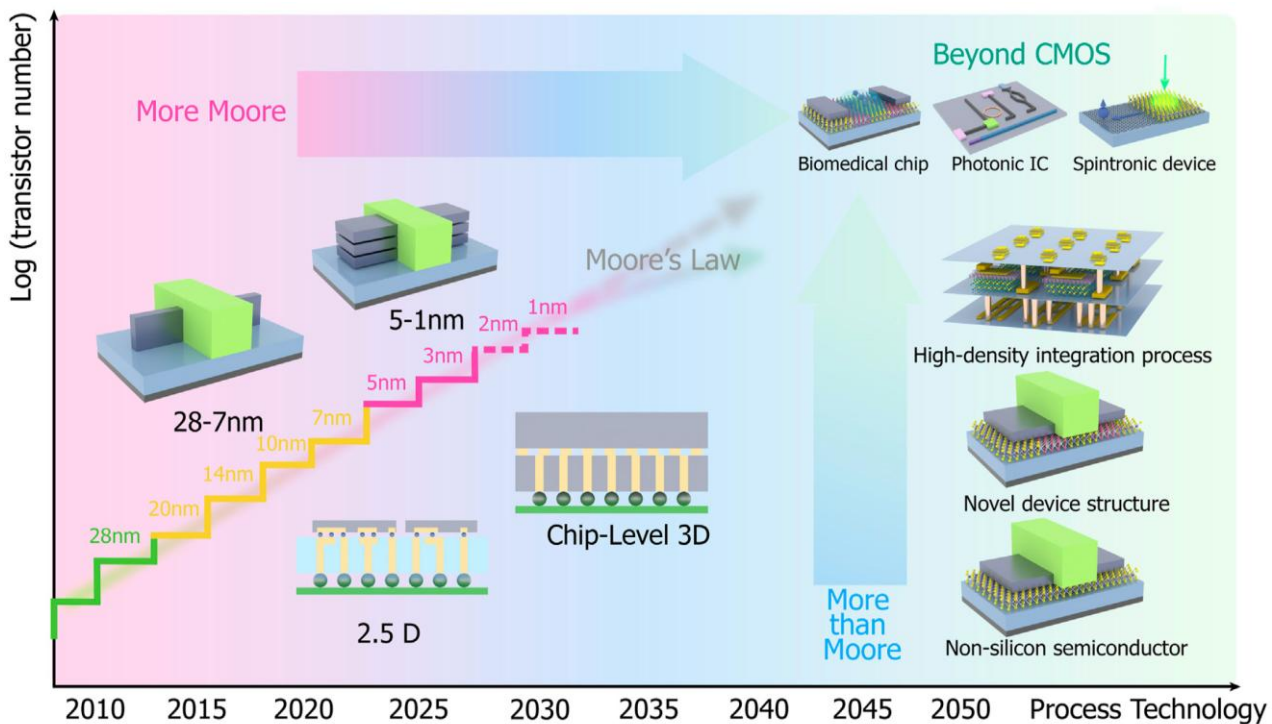


Рисунок 3. Некремнієві напівпровідники, новітні пристрої та процеси інтеграції високої щільності, що формують постмурівську еру в розвитку мікро-/нанoeлектроніки. Запозичено з роботи [4].

І зрештою – багато пристроїв і технологій, в яких є нагальна потреба сьогодні і навіть перспектива використання у майбутньому насправді не потребують технології виготовлення або інструментів обробки в нанорозмірному масштабі. Мікрометрових або субмікрометрових технологій достатньо для таких актуальних застосувань, як сенсори, світлодіоди, детектори та метаповерхні (плазмоніка) що працюють в ТГц або ІЧ діапазонах, фотоніка, мікрофлюїдика, ГГц-електроніка на основі кремнію на ізоляторі (КНІ) тощо [5,6].

З огляду на зазначені вище фактори, поряд з розвитком традиційної кремнієвої технології на межі її можливості – 2 нм [7], дедалі більшого розвитку набувають альтернативні технології оптичної безмаскової літографії або прямого лазерного запису [8,9,10]. Вони полягають у прямому формуванні структури підкладки, функціонального шару, захисного покриття або електродів шляхом безпосередньої їх локальної модифікації лазерним променем (прямий лазерний запис) або експонування необхідного рисунка на фоторезисті (безмаскова оптична літографія), але без необхідності виготовлення масок.

Переваги безмаскової фотолітографії

Ось ключові переваги MPL порівняно з традиційною оптичною, а також з деякими іншими методами (електронна променева або оптична на основі рентгенівського випромінювання):

- *Гнучкість і швидкий цикл “дизайн → реалізація”*: змінити візерунок означає змінити цифровий файл, а не виготовляти нову маску — це особливо важливо на етапах R&D, прототипування, дрібносерійного виробництва.
- *Відсутність дефектів масок і вартості довгих «ланцюжків масок»*: виготовлення фотомаски — дорогий і тривалий процес; безмаскова літографія усуває ці потреби.
- *Можливість створення складних, нерегулярних або тривимірних структур*: деякі безмаскові методи, зокрема прямий лазерний запис з multiphoton полімеризацією, дозволяють «писати» об'ємні 3D-структури в фотополімері. [11],
- *Висока швидкість і/або великі площі для регулярних структур*: наприклад, методи, які комбінують оптичну інтерференцію або зональні елементи, можуть охоплювати великі площі та/або забезпечувати паралельне записування. [12]
- *Конкурентна для багатьох задач «нано-мікро» технологій*: хоча безмаскова фотолітографія часто поступається в найвищій роздільній здатності електронно-променевій літографії [13], для багатьох застосувань роздільної здатності в сотні нанометрів — достатньо.

Разом це робить безмаскову літографію надзвичайно привабливою для дослідницьких груп, стартапів, наукових лабораторій, а також для сфер, де потрібна швидка зміна дизайну або низькі обсяги виробництва.

Існує два різних способи її реалізації, які можна назвати прямим лазерним записом та безмасковою оптичною літографією, відповідно. Ці методи охоплюють різноманітні матеріали та їхню роль у пристроях або застосуваннях.

Прямим лазерним записом здійснюється локальне видалення матеріалу, або його перекристалізація, або зміна його складу, відновлення або окислення тощо, що призводить до змін оптичних, електричних або механічних властивостей обробленого матеріалу на мікронному або субмікронному масштабі. В результаті, формується необхідний елемент мікроелектронного пристрою.

У роботі [14] запропоновано таку класифікацію прямого лазерного запису (Рис. 4): субтрактивний, для абляційного геометричного запису (а), адитивний, для одночасного синтезу та формування структури матеріалів (b) та трансформаційний, що характеризується селективним хімічним та структурним перетворенням матеріалу (c).

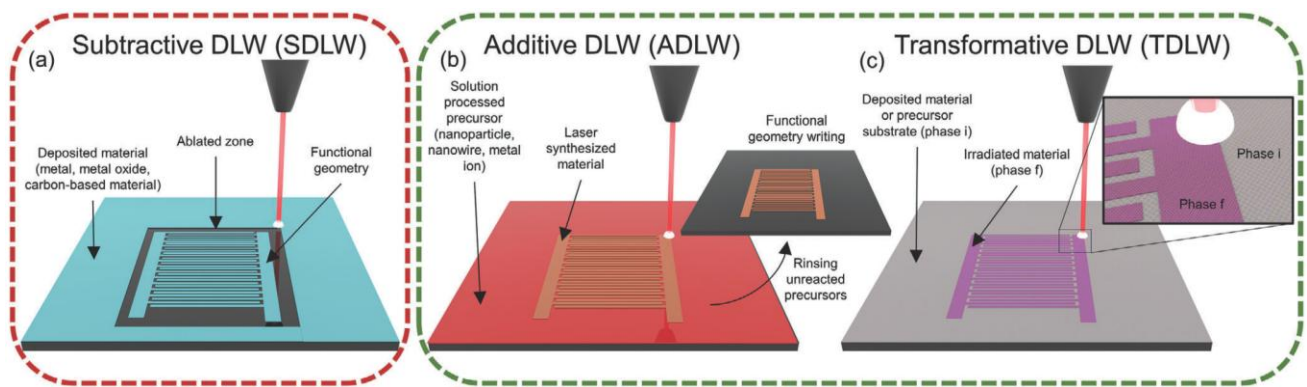


Рисунок 4. Схематична класифікація видів прямого лазерного запису, запропоновано в роботі [14].

Велика перспектива налаштування властивостей матеріалу за допомогою лазерного випромінювання зумовлена великою кількістю можливих комбінацій параметрів лазерної обробки (Рис. 5). Далі проаналізуємо головні з них: енергія кванта $h\nu$ (довжина хвилі λ) лазерного випромінювання, тривалість світлового імпульсу τ та частота імпульсів ω , просторові характеристики лазерного променя, а також швидкість та крок сканування по поверхні оброблюваного матеріалу.

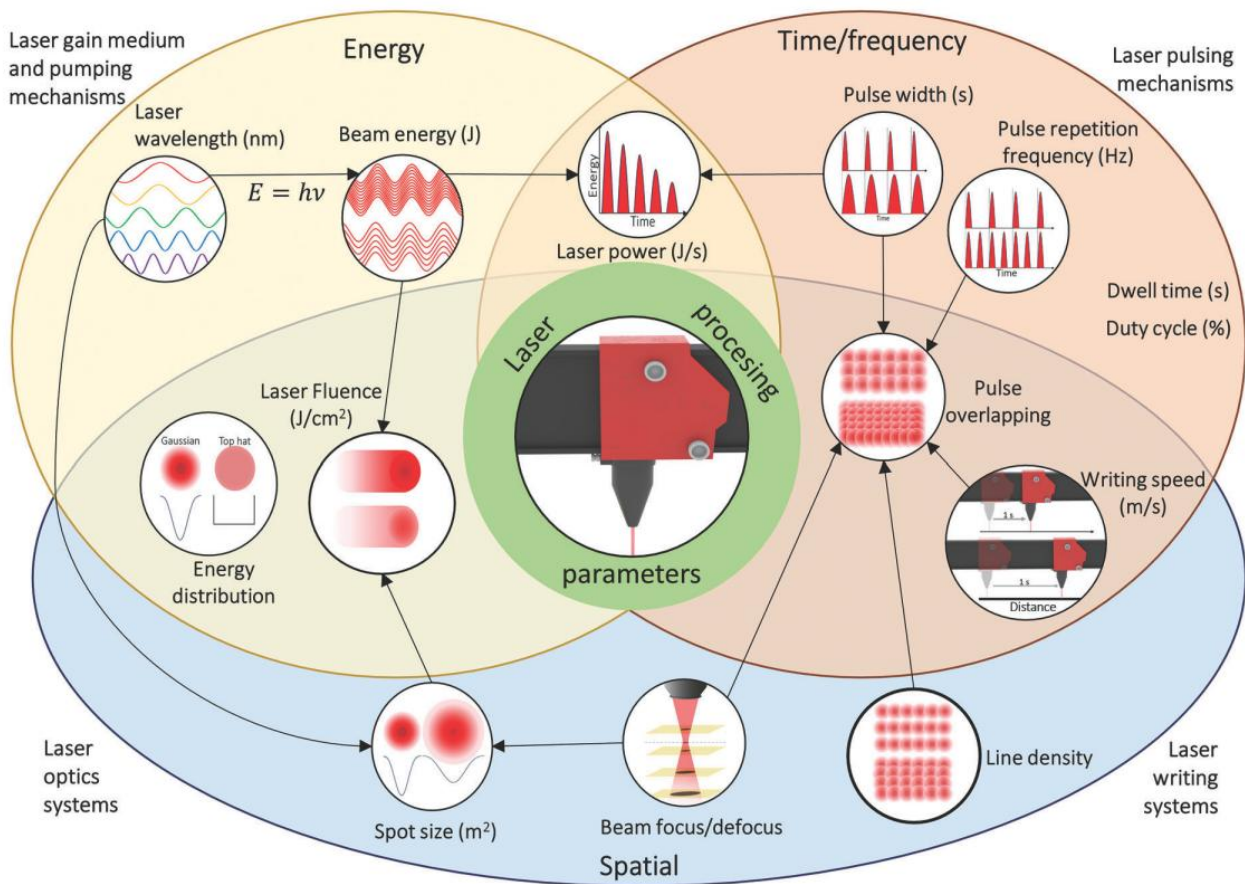


Рисунок 5. Схема параметрів прямого лазерного запису в енергетичній, часовій/частотній та просторовій областях та їх взаємозалежність. Запозичено з роботи [14].

Енергія кванта $h\nu$ (довжина хвилі λ) лазерного випромінювання – від неї дуже сильно залежить і глибина проникнення випромінювання в певний матеріал і ефективність поглинання випромінювання цим матеріалом. В багатьох випадках працює така загальна закономірність, що більш довгохвильове випромінювання проникає в матеріал глибше, бо поглинається слабше. Однак завдяки особливостям електронної структури матеріалу, його поглинальні властивості можуть різко зростати або починаючи з певної $h\nu$ (або λ) або в певному спектральному діапазоні. Перший випадок, так званого крайового поглинання, має місце в напівпровідниках та діелектриках, а другий – наприклад і молекулярних матеріалах (полімерах) та наночастинках металів.

Тривалість світлового імпульсу τ та частота імпульсів ω – ці величини дещо близькі за впливом, тому розглянемо їх разом. Передусім зазначимо, що пряма лазерна літографія і загалом лазерна обробка матеріалів може здійснюватися як неперервним так і імпульсним лазерним випромінюванням. Однак, значно ширше застосування мають імпульсні лазери, завдяки своїй основній характерній відмінності від неперервних – випромінюванню великої потужності світла в ультракороткі проміжки часу (фемпто-, піко-, або наносекунди), розділені проміжками часу в які випромінювання не здійснюється. З одного боку, такий режим роботи імпульсних лазерів є базовою необхідністю їх функціонування – часові проміжки без випромінювання необхідні щоб накопичити енергію для імпульсу високої потужності. Але з іншого боку, з т.з. застосування таких лазерів для модифікації властивостей матеріалів, він дає принципову перевагу над лазерами неперервної дії. Завдяки тому, то велика кількість енергії «вкочується» в матеріал протягом часу, що є малим порівняно з процесами переносу тепла та дифузії атомів, це дозволяє здійснювати значні структурні перетворення в матеріалі з високою локальністю (просторовою роздільною здатністю), обмеженою розміром лазерної плями, оскільки його дія не встигає поширитися на прилеглі області матеріалу (Рис.5). Схожий з тривалістю світлового імпульсу ефект має і частота імпульсів – вона теж впливатиме на те як швидко накопичуватиметься тепловий ефект в опроміненій ділянці і як швидко ця дія поширюватиметься за межі цієї ділянки.

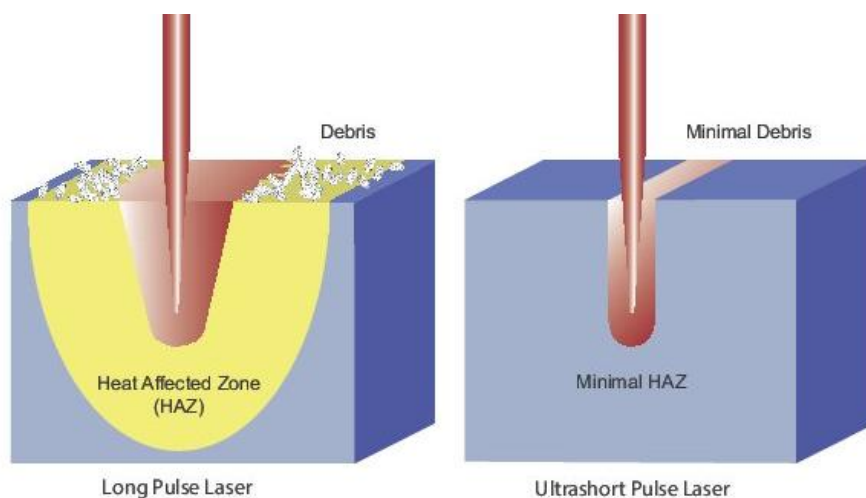


Рисунок 6. Вплив ширини лазерного імпульсу на якість обробки для довгоімпульсного лазера (ліворуч) порівняно з ультракороткими імпульсами (праворуч). [16].

Просторові характеристики лазерного променя, а також швидкість та крок сканування по поверхні оброблюваного матеріалу. Зазвичай лазерний промінь має неоднорідний розподіл інтенсивності в перерізі (або по площі плями), вона має форму так званого Гаусового розподілу – максимальна в центрі і різко спадає до країв плями. [17]. Тому однорідності обробки матеріалу по площі поверхні можна частково забезпечити підбором кроку сканування що забезпечуватиме часткове перекриття сусідніх оброблених ділянок. Однак, більш однорідної обробки можна досягнути вирівнюванням інтенсивності в перерізі світлового пучка шляхом застосування спеціально спроектованих оптичних компонент, зокрема «beam shaper top hat» (Рис. 6).

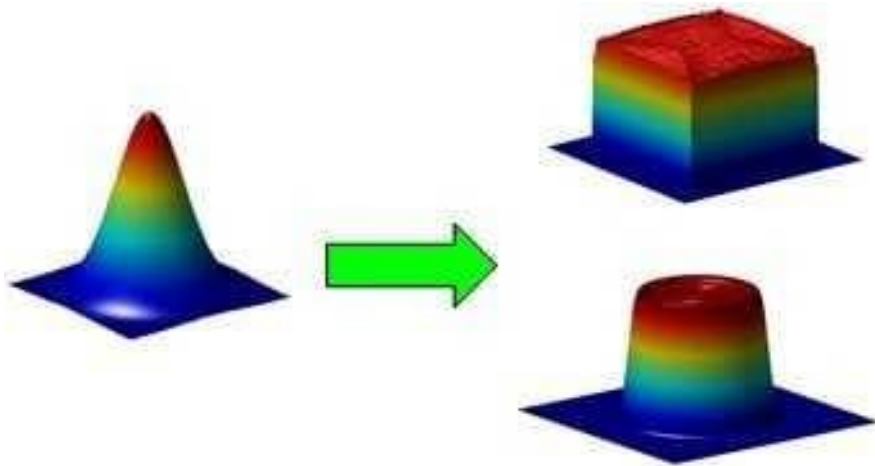


Рисунок 6. Вирівнювання профілю інтенсивності лазерного пучка застосуванням оптичних компонент beam shaper top hat. [18].

Шляхом зміни фокусу лазерного променя по глибині матеріалу можна досягати створення тривимірних структур (Рис. 7), зокрема полімерах, шляхом наступного витравлення оброблених чи необроблених ділянок (за принципом аналогічним застосуванню позитивного та негативного фоторезисту в традиційній літографії (Рис. 1).

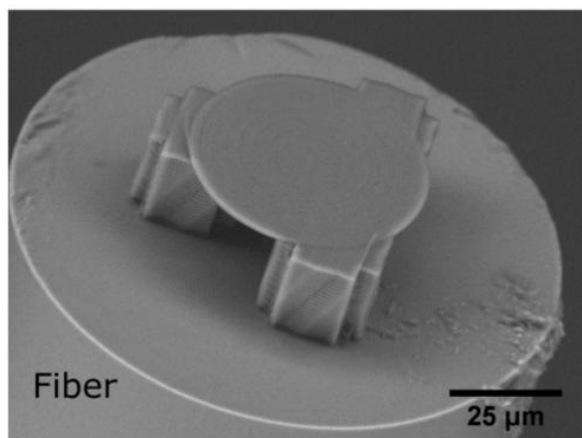


Рисунок 7. Монолітний мікрооптичний елемент на кінчику оптичного волокна, виготовленого прямим лазерним записом. [19].

Для яких пристроїв/технологій підходить безмаскова літографія

Безмаскова літографія найкраще підходить там, де потрібні або гнучкість, або специфічна геометрія, або швидка зміна дизайну, або великі регулярні структури, зокрема:

- *Фотоні- та метаматеріали* — фотонні кристали, метаповерхні, гратчасті резонатори, дифракційні решітки, структуровані поверхні для маніпуляції світлом.
- *3D-оптичні компоненти (мікролінзи, мікрооб'єктиви, waveguides, мікро- і нанорезонатори)*. (Рис. 7),
- *Мікрофлюїдні та біомедичні чіпи* — Lab-On-Chip (Рис. 8), мікроканали, мікро- і нано-структури для керування течією рідини, а також “штучні середовища” для клітин, біосенсиори. [15]
- *Функціоналізовані поверхні* — шорсткості, текстури, які змінюють властивості поверхні: гідрофобність / гідрофільність, зменшення тертя, антирефлекс, підсилення оптичних сигналів, сенсори (Рис. 9).
- *Мікро/нано-механіка (MEMS / NEMS), мікромеханічні елементи, прототипування мікроструктур* — коли потрібно швидко “намалювати” мікроробота, мікрозонд, мікрокласичну структуру без маски. DLW — гарний підхід. [11]
- *R&D, прототипування, дрібносерійне виробництво* — стартапи, наукові дослідження, спеціалізовані пристрої, де гнучкість і швидка ітерація важливіші за можливість дешевого масового виробництва.

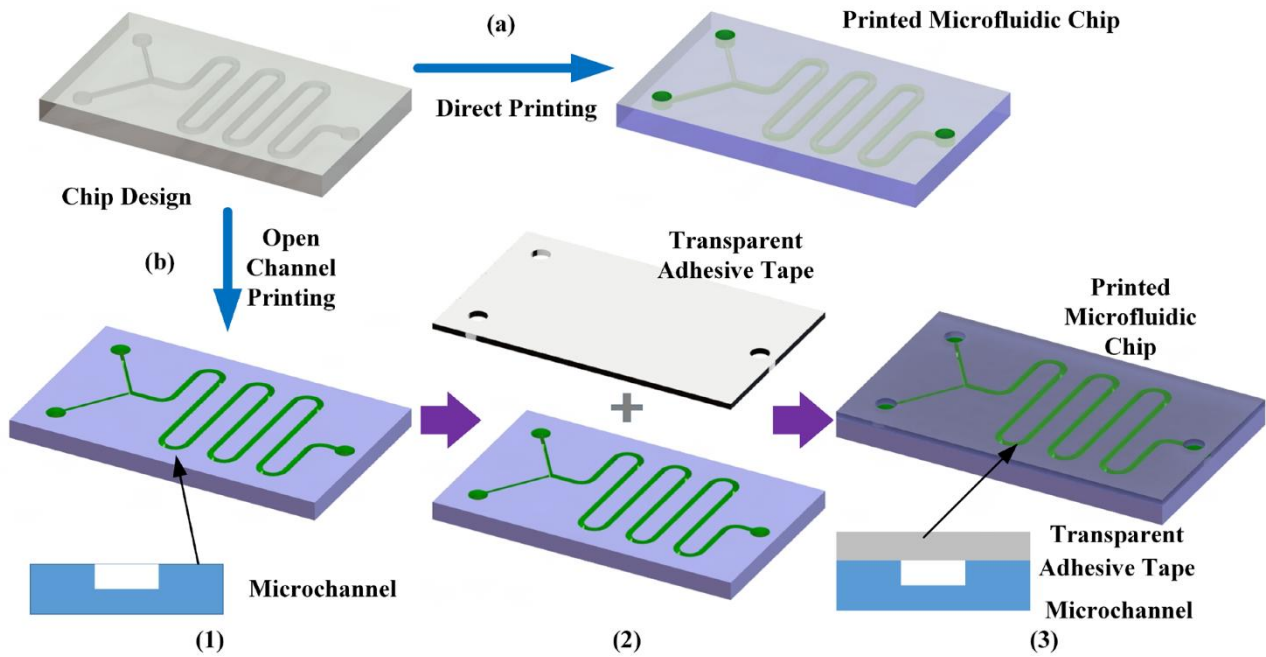


Рисунок 8. Процес виробництва систем мікрофлюїдики на основі технології прямого лазерного запису: (a) прямий друк прихованих каналів, фокусуванням в глибині підкладки та (b) друк структур з відкритими каналами та формування закритих систем за допомогою герметизації прозорою клейкою стрічкою [20].

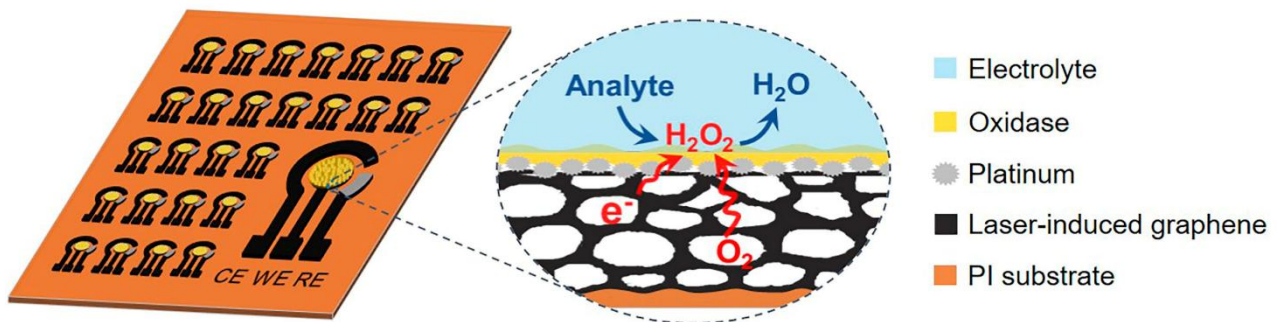


Рисунок 9. Схематична ілюстрація масивів трьохелектродних біосенсорів (ліворуч), виготовлених на гнучкій полімерній підкладці (поліімін) шляхом локального перетворення полімеру на графен під дією (скануючого) лазерного випромінювання. Справа схематично показана структура додатково функціоналізованого центрального (робочого) електрода. [21].

Безмаскова оптична літографія реалізується за допомогою пристроїв, що складаються з таких основних компонентів (Рис. 10): джерела лазерного випромінювання, просторового модулятора лазерного випромінювання, системи дзеркал та лінз для проектування промодульованого

випромінювання на поверхню зразка. Оскільки густина інтенсивності (інтенсивність на одиницю площі) в такій ситуації значно менша порівняно з розглянутим вище випадком прямого лазерного запису вихідним лазерним пучком, її вистачає лише для модифікації світлочутливих матеріалів. Зокрема, можливе використання стандартних фоторезистів, розроблених для традиційної маскової фотолітографії, а також травлення та інших технологічних процесів.

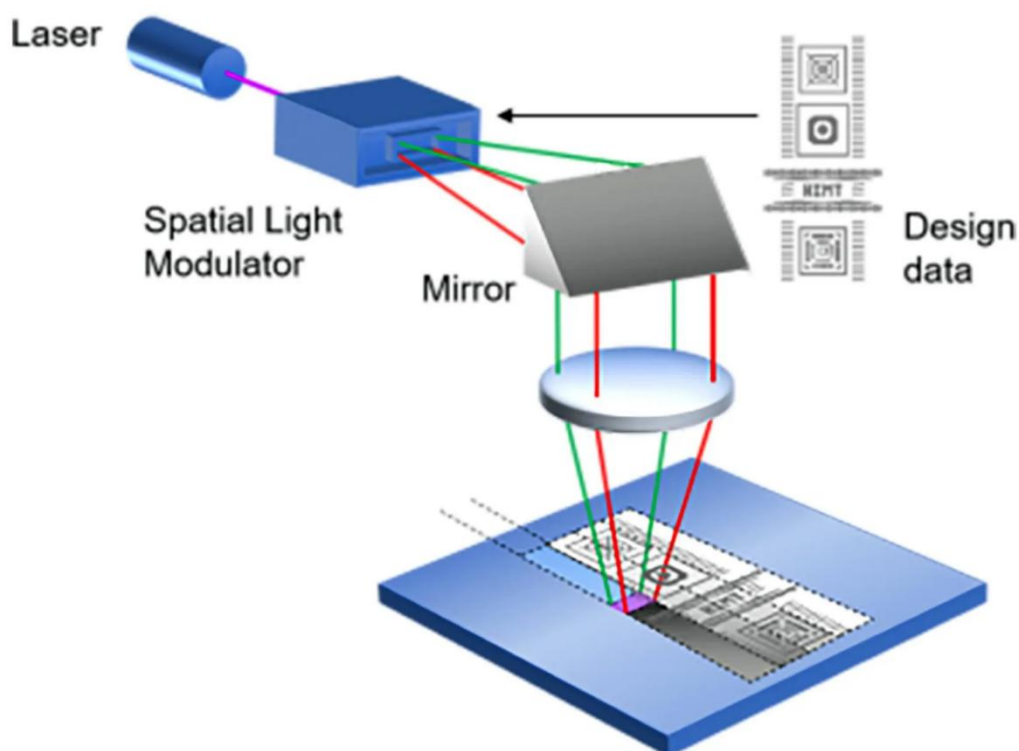


Рисунок 10. Схематична ілюстрація приладу безмаскової оптичної літографії. [22].

Висновок

Безмаскова літографія — це не “модний тренд”, а серйозна технологічна альтернатива класичній фотомасковій літографії, особливо актуальна для досліджень, прототипування, мікро-/нано-фабрикації, мікро- та наноструктур, мікро-оптики, поверхневих текстур, біомедичних пристроїв і багатьох інших напрямків. Хоча вона ще не стала домінантною технологією у масовому виробництві мікроелектроніки (через певні обмеження: точність, швидкість, суміщення шарів, масштабованість), її переваги — гнучкість, адаптивність, простота зміни дизайну, можливість 3D — роблять її незамінною для тих задач, де важливий прототип, індивідуальність, швидка ітерація чи спеціалізоване функціональне рішення.

Джерела:

- [1] <https://www.geeksforgeeks.org/electrical-engineering/what-is-photolithography/>
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Back_end_of_line
- [3] <https://en.wikipedia.org/wiki/CMOS>
- [4] E Zhu, Z Zhang and C Wang Editorial: Emerging chip materials and devices for post Moore's era. *Front. Mater.* 10 (2023) 1224537. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1224537>.
- [5] J. Han, D. Xin, J. Pang, L. Zhao, D. Sun, Y. Zheng, X. Liu, Z. Zhao, X. Zhang, Q. Sun, H. Liu and W. Zhou. Laser-assisted manufacturing for sensors. *Int. J. Extrem. Manuf.* 7 (2025) 042008 (30pp) <https://doi.org/10.1088/2631-7990/adbb35>.
- [6] S. Baek, J.S. Son. Recent Advances in Direct Optical Patterning of Inorganic Materials and Devices. *Adv. Phys. Res.* 3 (2024) 2300069. <https://doi.org/10.1002/apxr.202300069>.
- [7] https://www.tsmc.com/english/dedicatedFoundry/technology/logic/l_2nm
- [8] https://en.wikipedia.org/wiki/Maskless_lithography
- [9] W. Tian. Research progress of laser lithography. *J. Phys.: Conf. Series* 2608 (2023) 012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2608/1/012016>.
- [10] A. Tsiamis, J.R.K. Marland, J.G. Terry, A.F. Murray. Comparison of Conventional and Maskless Lithographic Techniques for More than Moore Post-Processing of Foundry CMOS Chips. *J. Microelectromechanical Systems* 29 (2020) 1245-1252.
- [11] I. Bernardeschi, M. Ilyas, L. Beccai. A Review on Active 3D Microstructures via Direct Laser Lithography. *Adv. Intell. Syst.* 3 (2021) 2100051. <https://doi.org/10.1002/aisy.202100051>
- [12] https://en.wikipedia.org/wiki/Direct_laser_interference_patterning
- [13] https://en.wikipedia.org/wiki/Electron-beam_lithography
- [14] Tomás Pinheiro,* Maria Morais, Sara Silvestre, Emanuel Carlos, João Coelho, Henrique V. Almeida, Pedro Barquinha, Elvira Fortunato,* and Rodrigo Martins* Direct Laser Writing: From Materials Synthesis and Conversion to Electronic Device Processing. *Adv. Mater.* 2024, 36, 2402014. <https://doi.org/10.1002/adma.202402014>
- [15] F. Sima and K. Sugioka. Ultrafast laser manufacturing of nanofluidic systems. *Nanophotonics* 10 (2021) 2389-2406. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2021-0159>
- [16] <https://www.newport.com/n/laser-micromachining>
- [17] https://en.wikipedia.org/wiki/Gaussian_beam
- [18] <https://www.holoor.co.il/application/beam-shaper-top-hat/>
- [19] L. Jonušauskas, D. Gailevičius, L. Mikoliūnaitė, D. Sakalauskas, S. Šakirzanovas, S. Juodkasis, M. Malinauskas. Optically Clear and Resilient Free-Form μ -Optics 3D-Printed via Ultrafast Laser Lithography. *Materials* 10 (2017) 12. <https://doi.org/10.3390/ma10010012>
- [20] J. Qiu, J. Li, Z. Guo, Y. Zhang, B. Nie, G. Qi, X. Zhang, J. Zhang and R. Wei. 3D Printing of Individualized Microfluidic Chips with DLP-Based Printer. *Materials* 16 (2023) 6984. <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/21/6984>
- [21] M. Zhang, J. Zhang, Z. Ding, H. Wang, L. Huang and X. Feng. Laser-Induced Graphene Arrays-Based Three-Phase Interface Enzyme Electrode for Reliable Bioassays. *Biomimetics* 8 (2023) 26. <https://doi.org/10.3390/biomimetics8010026>
- [22] [https://wiki.nanofab.ucsb.edu/wiki/Maskless_Aligner_\(Heidelberg_MLA150\)](https://wiki.nanofab.ucsb.edu/wiki/Maskless_Aligner_(Heidelberg_MLA150))