

4. Atamanyuk R.B, Novosyadly S.P. Silicic compiling as instrument of planning of topology of large-scale arrays and providing its reliability at algorithmic level // The IX International Conference "Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science" (Lviv – Slavske, February 28 – March 4, 2006). – Lviv, 2006. – P.604–605.
5. Атаманюк Р.Б, Новосядлий С.П. Ущільнене компонування топології інтегральних схем методом деформаційної ретракції // П'ята науково-технічна конференція "ПРИЛАДОБУДУВАННЯ 2006: стан і перспективи" (25 – 26 квітня 2006 р.). – К., 2006. – С.209–210.

*In this paper the silicic compiling process is described as instrument of planning of topology of large-scale arrays and providing its reliability at algorithmic level of the integrated circuit. Improvement of method of the silicic compiling through discrete optimization of topology is proposed.*

**Key words:** silicic compiling, integrated circuit, optimization, verification.

УДК 621.382

ББК 32.85

*В.І. Голота, І.Т. Козут*

### ЕЛЕМЕНТИ АРХІТЕКТУРИ МАТРИЧНО-ЕМІТЕРНОЇ НАНОМЕТРОВОЇ ЛІТОГРАФІЇ

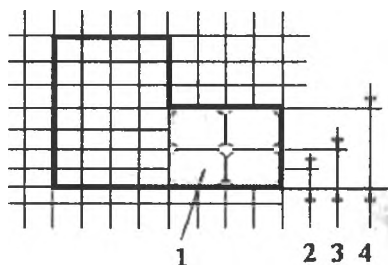
*Розглянуто сучасний стан розвитку оптично-проекційної та матрично-емітерної нанометрової літографії. Подано вихідні дані та результати розрахунків структури й основних елементів архітектури системи. Запропоновано інтегровані КНІ КМОН структури на основі базових матричних кристалів для реалізації ІС логіки, пам'яті й керування матричними випромінювачами.*

**Ключові слова:** нанометрова літографія, елемент архітектури, КНІ КМОН структури, мікроелектронні пристрої.

**Вступ.** Прогрес сучасної мікроелектроніки в значній мірі визначається можливостями технології виробництва інтегральних схем (ІС). Одним із базових технологічних процесів у виробництві ІС є літографія. У сучасних оптичних літографіях використовується ультрафіолетове (УФ), глибоке ультрафіолетове (ГУФ) та екстремальне ультрафіолетове (ЕУФ) випромінювання [1]. Літографії з УФ, ГУФ та ЕУФ випромінюванням забезпечують технологічні норми нанометрового діапазону. ЕУФ літографія має найвищу роздільну здатність і продуктивність і буде основною в масовому виробництві ІС на найближче десятиріччя. Але в зв'язку з надзвичайною складністю та високою вартістю ЕУФ літографії, недовговічністю проекційної оптики й відбиваючих масок актуальним є завдання створення альтернативних літографій. Однією з таких є матрично-емітерна (МЕ) літографія.

**Оптичні проекційні літографії.** На даний час у масовому виробництві ІС використовуються оптичні проекційні літографії з технологічними нормами 180 нм, 130 нм, 90 нм, 65 нм, а в перспективі планується освоєння – 45 нм (2007), 32 нм (2009), 22 нм (2011) [2, 3].

Технологічна норма визначає мінімальний (планарний) розмір елемента (МРЕ) топології (рис.1).



*Рис.1. Топологічний елемент: 1 – піксел; 2 – крок координатної сітки; 3 – розмір пікселя; 4 – мінімальний розмір елемента*

Так, для оптичної проекційної літографії МРЕ визначається з формули (1):

$$MRE = k_1 \frac{\lambda}{NA}, \quad (1)$$

де  $k_1$  – коефіцієнт, що визначається характеристиками джерела випромінювання, проекційної системи, геометрії маски та чутливості фоторезисту;  $\lambda$  – довжина хвилі випромінювання, нм;  $NA$  – числова апертура лінзи.

Літографія УФ випромінювання з довжинами хвиль до 248 нм і спеціальними методами формування топографічного зображення дозволяє отримувати МРЕ 180÷130 нм. Літографія ГУФ випромінювання з довжинами хвиль 193,4÷157 нм і спеціальними методами формування топографічного зображення дозволяє отримувати МРЕ 90÷45 нм.

Подальше зменшення МРЕ до 32÷22 нм без використання спеціальних методів формування топографічного зображення забезпечує літографія ЕУФ випромінювання з довжиною хвилі 13,4 нм. Значення МРЕ топології для оптичної літографії з різними характеристиками УФ випромінювання подане в таблиці 1.

Таблиця 1

Мінімальний розмір елемента топології

Випромінювання	Довжина хвилі, нм	$k_1$ ( $k_{\min} = 0,25$ )	$NA$ ( $NA_{\max} = 0,87$ )	МРЕ, нм
УФ	248 (KrF)	0,40	0,55	180
		0,40	0,76	130
ГУФ	193,4 (ArF)	0,30	0,64	90
		0,27	0,80	65
	157 (F2)	0,30	0,72	65
		0,25	0,87	45
ЕУФ	13,4 (Xe2)	0,83	0,17	65
		0,57	0,17	45
		0,41	0,17	32
		0,28	0,17	22

Таким чином, при масовому виробництві ІС ЕУФ літографія забезпечує найвищу роздільну здатність і найбільшу продуктивність (60 пластин Ø300 мм у годину). Але у зв'язку з надзвичайною складністю й високою вартістю ЕУФ літографії, недовговічністю комплектів відбиваючих масок і проекційної оптики актуальним є завдання створення альтернативних літографій. У цьому напрямку ведуться активні дослідження та розроблено багато варіантів безмаскових літографій: оптичної, електронно-променевої, йонно-променевої, інтерферонційної та імпринтової [4, 5]. Однією з перспективних є МЕ літографія.

**3. Матрично-емітерна літографія.** Випромінювачем електронів у МЕ літографії є холодний катод у вигляді вертикальної вуглецевої нанотрубки Ø17 нм [6, 7]. Мікрофотографія вуглецевої нанотрубки та схематичне зображення одного випромінювача зображені на рис.2.

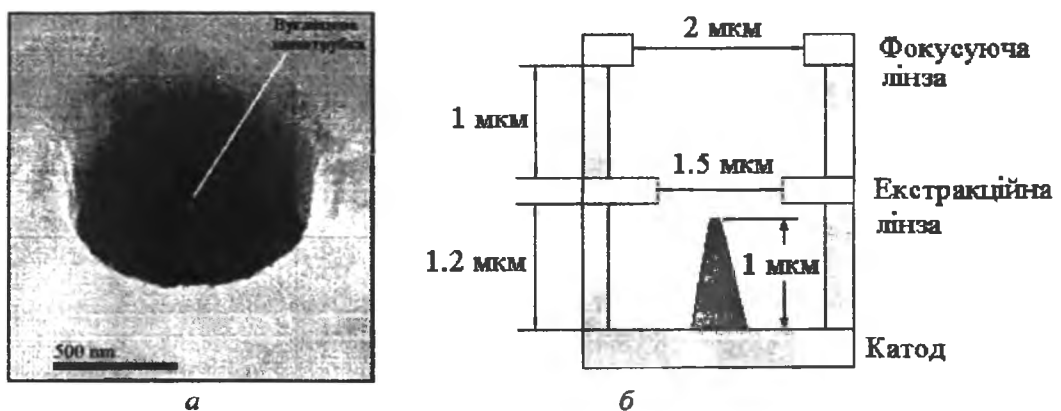


Рис.2. Вуглецева нанотрубка: а – мікрофотографія; б – схематичне зображення випромінювача електронів

Випромінювачі об'єднуються в матриці та розміщуються на кристалі однієї великої ІС розміром 300 мм×300 мм рядами. На одній матриці площею 100 мм<sup>2</sup> розміщується від 3×10<sup>6</sup> до 9×10<sup>6</sup> випромінювачів із кроком  $t_x$  мкм× $t_y$  мкм залежно від розміру пікселя. Для експонування всієї пластини використовується від 10 до 20 рядів матриць випромінювачів із кроком  $t_{ряд}$  залежно від схематехнічної архітектури, під яку необхідно виділити площу кристала. Кожний випромінювач має електростатичний екстракційний і фокусуєуючий електроди, розділені шаром діелектрика SiO<sub>2</sub>. Крім того, кожний випромінювач інтегрований зі схемами логіки, пам'яті, керування й контролю дози експозиції [7, 8]. Схематичне зображення одного ряду випромінювачів показано на рис.3.

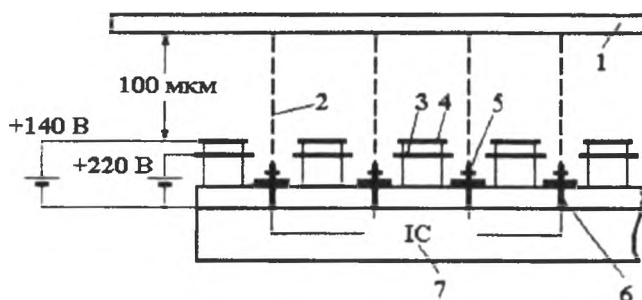


Рис.3. Ряд випромінювачів: 1 – кремнієва пластина; 2 – електронний промінь; 3 – екстракційний електрод (анод); 4 – фокусуєуючий електрод; 5 – вуглецева нанотрубка (катод); 6 – контакт між ІС та випромінювачем; 7 – ІС логіки, пам'яті й керування

Для отримання напівтонових пікселів при формуванні країв зображень використовуються 5-розрядні біти й система експонування з 32 значеннями заповненості імпульсу з періодом  $T$  (рис.4).

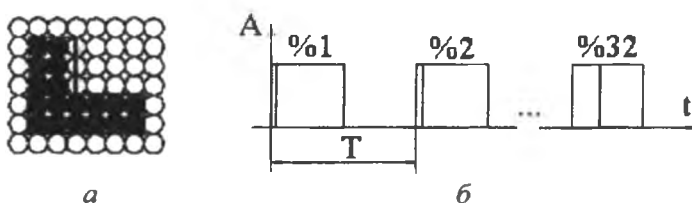


Рис.4. Сірононі піксели: а – піксели різної дози експонування; б – імпульси експонування різної заповненості

Для усереднення геометричного відхилення та різної емісійної здатності вуглецевих нанотрубок один піксел експонується 8–10 разів різними випромінювачами. Така надлишковість і суцільність перекриття досягається за рахунок повороту всього кристала відносно напрямку руху пластини на кут  $\alpha$ .

**4. Вихідні дані для розрахунку структури й елементів архітектури.** Вихідні дані для розрахунку структури й елементів архітектури МЕ літографії вміщені в таблиці 2.

Таблиця 2

Вихідні дані для розрахунку

Мінімальний розмір елемента топології, нм	65±22
Кількість рівнів експонування	32
Час експонування одного пікселя, мкс	1
Струм експонування одного пікселя, нА	1
Швидкість переміщення пластини, мм/с	≤5
Частота модуляції випромінювача, МГц	1
Продуктивність, Ø300 мм пластин/год	80

Результати розрахунку структури випромінювачів подано в таблиці 3.

## Результати розрахунку

Показники	Варіант 1	Варіант 2
1. Кількість рядів матриць, шт	10	10
2. Крок рядів ( $t_{\text{ряд}}$ ), мм	22	22
3. Розмір матриці, мм×мм	10×10	10×10
4. МРЕ топології, мм	65	22
5. Розмір пікселя, мм	32	11
6. Крок випромінювачів по $OX$ ( $t_x$ ), мкм	8	4
7. Крок випромінювачів по $OY$ ( $t_y$ ), мкм	4	2,7
8. Кількість випромінювачів по $OX$ , шт	$1,25 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^3$
9. Кількість випромінювачів по $OY$ , шт	$2,5 \cdot 10^3$	$3,7 \cdot 10^3$
10. Усього випромінювачів, шт	$3,1 \cdot 10^6$	$9,2 \cdot 10^6$
11. Коефіцієнт перекриття	10	10
12. Проекція радіус-вектора $R_x$ , мкм	120	60

За результатами розрахунків отримано структуру випромінювачів і перші елементи архітектури системи: кількість та крок рядів і матриць (рис.5), кут повороту кристала  $\alpha$  (рис.6), кількість і крок випромінювачів у матриці (рис.7).

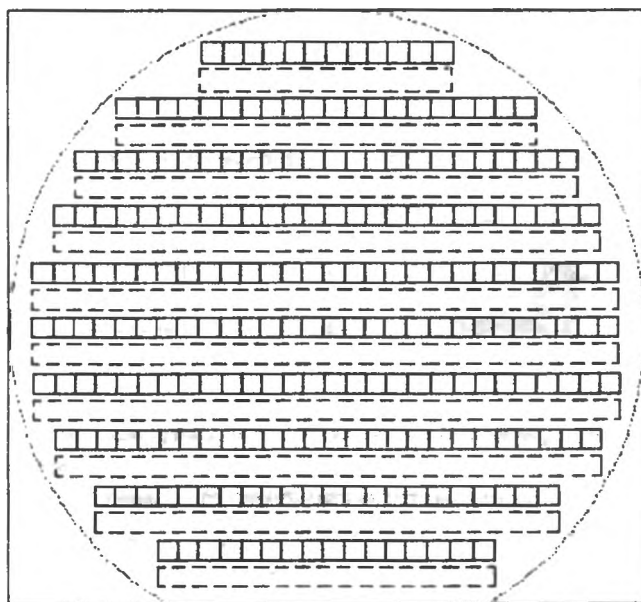


Рис.5. Розміщення рядів і матриць:  $\square$  – матриця випромінювачів,  $\square$  – топографічний образ ІС на кремнієвій пластині

Розрахункова кількість матриць в 10 рядках: 1 – 12, 2 – 20, 3 – 24, 4 – 26, 5 – 28, 6 – 28, 7 – 28, 8 – 26, 9 – 22, 10 – 16. Таким чином, на кристалі розміщується 230 матриць розміром 10 мм×10 мм. Для експонування всіх 460 топографічних образів ІС на пластині її необхідно перемістити на величину кроку рядів  $t_{\text{ряд}} = 22$  мм.

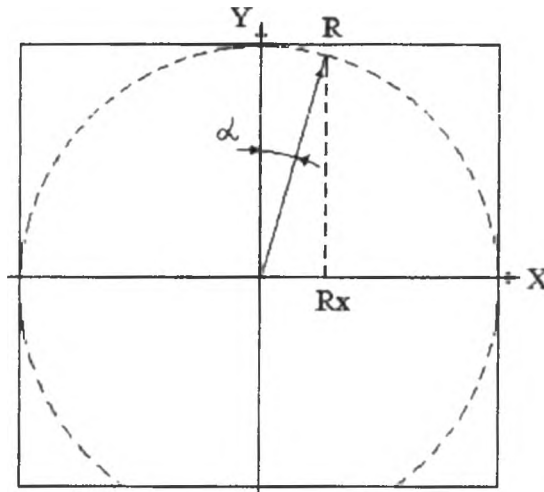


Рис.6. Поворот кристала на кут  $\alpha$ :  $R_x$  – проекція радіус-вектора

Оскільки кут  $\alpha$  має малі значення, то замість нього використовується значення проекції радіус-вектора на вісь  $OX$ . Заданий кут повороту  $\alpha$  можна отримати при досягненні проекцією радіус-вектора величини  $R_x$ .

У матриці випромінювачі розміщуються з кроком  $t_x$  і  $t_y$  (рис.7, а). Значення кроків  $t_x$ ,  $t_y$  і кута повороту  $\alpha$  розраховані з умови забезпечення кратності та суцільності перекриття ряду пікселів (рис.7, б).

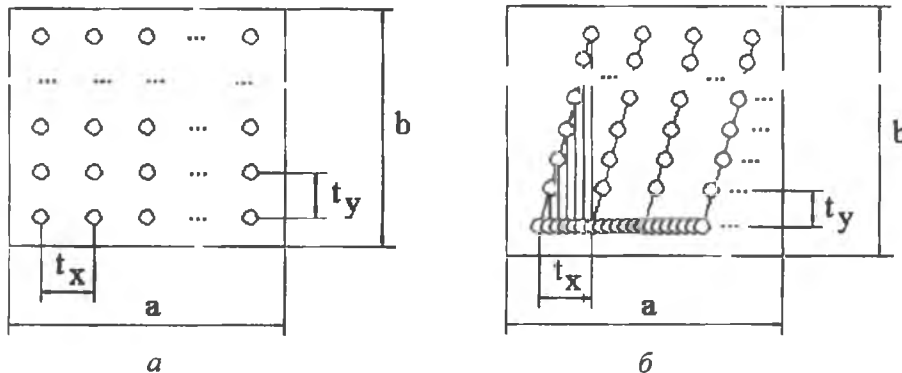


Рис.7. Матриця випромінювачів: а – розміщення випромінювачів; б – перекриття ряду пікселів із заданою кратністю

**5. Елементи архітектури матрично-емітерної літографії.** З вихідних даних таблиці 4, узятих за основу для розробки елементів архітектури системи, видно, що за роздільною здатністю й продуктивністю МЕ літографія переважає ЕУФ літографію. Це зумовлює розширення напрямків пошуків і досліджень. Для реалізації системи у вигляді керованого комп'ютером мікроелектронного пристрою проводяться дослідження й розробляються елементи архітектури за такими напрямками:

- архітектура системи (послідовна, послідовно-паралельна, синхронна, асинхронна);
- ІС МЕ літографії (технологія, схемотехніка, елементна база, топологія);
- САПР система – канал передачі даних – ІС МЕ літографії – система синхронізації і переміщення – кремнієва пластина.

Щодо першого напрямку елементи архітектури вибрано за показниками продуктивності та об'ємів інформації. Згідно з таблицею 1, продуктивність МЕ літографії повинна становити одну  $\varnothing 300$  мм пластину за 45 с. Для експонування на цій пластині всіх пікселів розміром 11 нм із можливістю вибору 32 значень заповненості імпульсу потрібно передати  $1,9 \cdot 10^{15}$  бітів інформації. Ураховуючи неприйнятно великий об'єм інформації, можна зробити висновок: передавати біти для всіх матриць потрібно паралельно й синхронно. Для такої архітектури залежність об'ємів і швидкості передачі інформації для однієї матриці від розміру пікселя показана на рис.8 і рис.9.

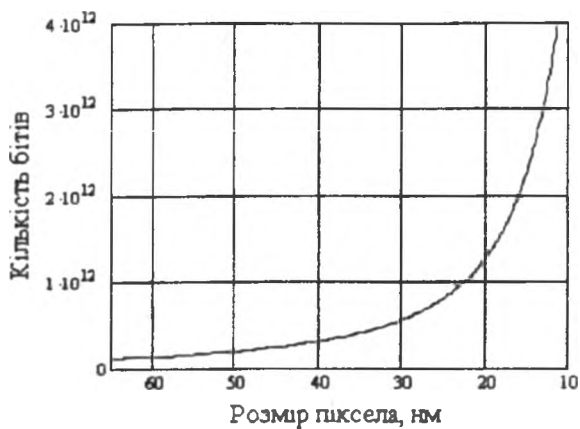


Рис. 8. Об'єм інформації для однієї матриці

Як видно з рис. 8, об'єми інформації для однієї матриці попадають у діапазон 1÷4 Тбіт. Джерелом таких великих об'ємів інформації можуть бути накопичувачі на жорстких магнітних дисках системи RAID HDD.

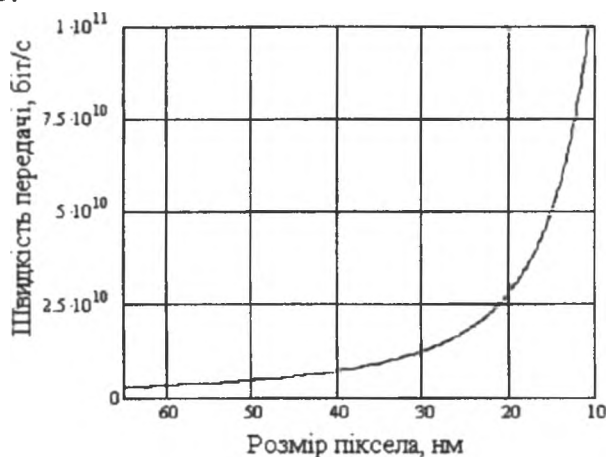


Рис. 9. Швидкість передачі інформації для однієї матриці

Для прийнятих у розрахунок розмірів пікселів об'єми та швидкість передачі інформації подані в таблиці 4. У цьому випадку на одну матрицю передаються також великі, але прийнятні об'єми та швидкості передачі інформації.

Таблиця 4

Об'єми і швидкість передачі інформації для однієї матриці

Показники	Варіант 1	Варіант 2
1. Розмір пікселя, нм	32	11
2. Кількість бітів	$0,488 \cdot 10^{12}$	$4,132 \cdot 10^{12}$
3. Швидкість передачі, біт/с	$10,8 \cdot 10^9$	$91,8 \cdot 10^9$

Наступним кроком у деталізації елементів архітектури є вибір структури комірок пам'яті випромінювачів. Структура комірок пам'яті повинна забезпечити розрахункову швидкість передачі інформації матрицею з урахуваннями швидкодії елементної бази, часу експонування пікселів і переміщення пластини. З багатоваріантних розрахунків структури комірок пам'яті було вибрано таку: паралельний доступ до комірок пам'яті за рядами і послідовний за стовпцями матриці. Для цього всі стовпці матриці підключаються до окремих дешифраторів адреси. Час доступу (читання/запису) до однієї комірки пам'яті при такій структурі поданий у таблиці 5. Запис інформації в комірки пам'яті дозволяє керувати випромінювачами (включено/виключено) та засвічувати піксели.

Піксели експонуються рядами за синхроімпульсами, що надходять від системи переміщення пластини.

Програмування комірок пам'яті й експонування пікселів

Показники	Варіант 1	Варіант 2
1. Розмір пікселя, нм	32	11
2. Час актуалізації ряду пікселів, мкс	144	49,5
3. Час експонування ряду пікселів, мкс	1	1
4. Час переміщення ряду пікселів, мкс	10	13
5. Час міжрегістрових передач, мкс	12	16
6. Кількість дешифраторів комірок пам'яті	$1,25 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^3$
7. Час доступу до комірки пам'яті, нс	49	8
8. Швидкість переміщення пластини, мм/с	3,2	1,1

6. Схемотехнічні рішення й елементна база. В експериментальних матрицях випромінювачів ІС логіки, пам'яті та керування реалізуються за КМОН технологією [8]. Структурна схема керування одним випромінювачем показана на рис.10.

Проте значно перспективнішими для побудови таких ІС є структури кремній-на-ізоляторі (КНІ). Порівняно зі стандартними КМОН ІС на об'ємному кремнії, КНІ КМОН ІС мають значно кращі характеристики швидкодії, щільності елементів на кристалі, споживаної потужності, температурного діапазону та радіаційної стійкості. На рис.11 показана структура стандартного та КНІ МОН транзисторів.

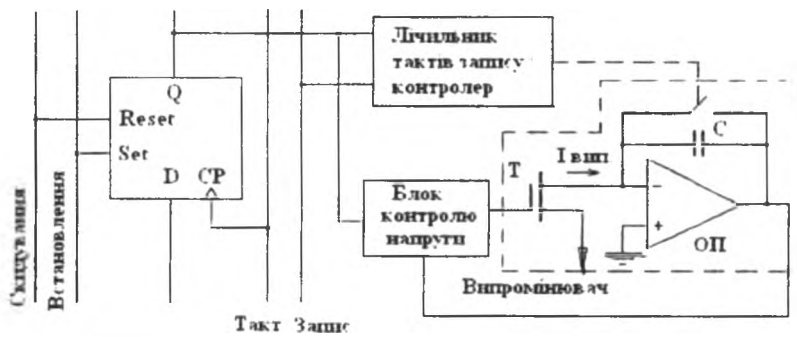


Рис.10. Структурна схема керування випромінювачем: D-тригер; лічильник тактів запису/контролер; блок контролю напруги; блок контролю дози експозиції (інтегратор з елементів Т, С, ОП)

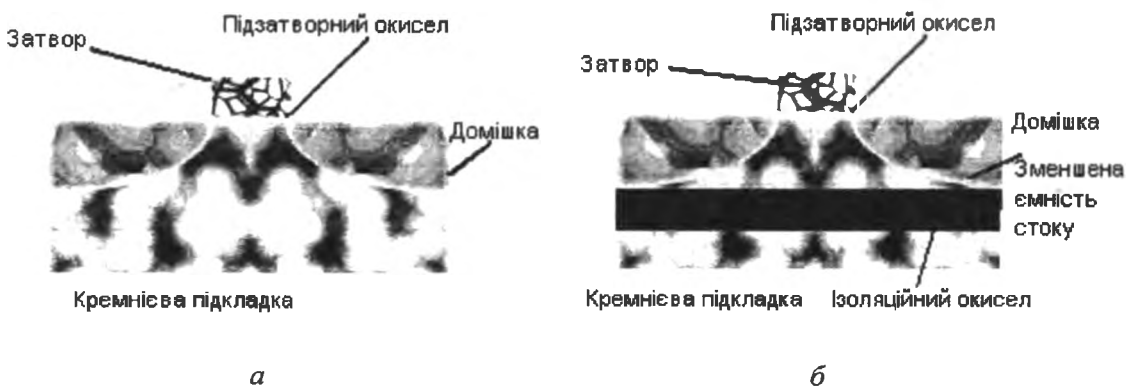


Рис.11. Структура транзисторів: а – стандартного; б – КНІ МОН

Із використанням КНІ МОН транзисторів можна будувати базові логічні схеми. Так, на рис.12 показано схематичні топології стандартного (а) та КНІ КМОН інверторів (б).

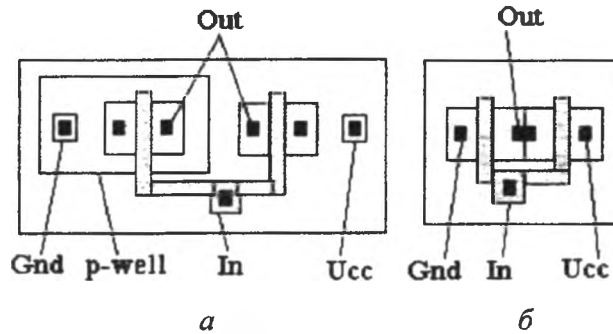


Рис.12. Топологія інверторів: а – стандартного; б – КНІ КМОН

З рисунків видно, що за розміром площі, кількістю контактів, довжин з'єднань, при однакових співвідношеннях ширина та довжина каналів МОН транзисторів, КНІ структури мають суттєві переваги. Оскільки матриця випромінювачів має регулярну структуру, то для реалізації ІС логіки, пам'яті та керування оптимальним є базовий матричний кристал (БМК) на КНІ КМОН структурах [9]. Крім цього, КНІ структури є значно гнучкішими при створенні тривимірних мікросистемних пристроїв, що дозволяє монолітну інтеграцію матричних випромінювачів і схем керування на мікросистемному рівні. Особливої уваги заслуговують розроблені КНІ МОН транзистори із П-подібним профілем затвора, що суттєво підвищує ступінь інтеграції.

**Висновки.** Розглянуто сучасний стан і напрямки розвитку оптичних проекційних та альтернативної безмаскової літографії. У результаті їх порівняння за різними аспектами встановлено, що МЕ літографія не поступається ЕУФ літографії. Виділено напрямки досліджень і визначено задачі, які необхідно розв'язати для створення такої системи у вигляді керованого комп'ютером мікроелектронного пристрою. Прийнято вихідні дані для розрахунку структури й елементів архітектури МЕ літографії. Вибрана паралельно-послідовна синхронна архітектура системи. За результатами розрахунків отримано основні елементи архітектури системи, структуру випромінювачів. Розраховано об'єми та швидкість передачі інформації. На основі цього визначено структуру і швидкодію комірок пам'яті. Запропоновано інтегровані КНІ КМОН структури на основі базових матричних кристалів. У цих структурах пропонується використовувати КНІ МОН транзистори як із П-подібним, так і з планарним профілем затвора.

1. Berkeley Extreme Ultraviolet Microexposure Tool. 2004 Year-End Report. Technology Transfer #05024630A-Eng. Sematech. February 28, 2005. <http://www.sematech.org/docbase/abstracts/4630aeng.htm>.
2. Semiconductor Industry Association (SIA), The International Technology Roadmap for Semiconductors. 2005. Lithography. [www.sia-online.org](http://www.sia-online.org).
3. Gwyn C., Lee S.H. First lithographic results from extreme ultraviolet Engineering Test Stand // J. Vacuum Science & Technology B, 19. – 2001. – Nov/Dec. – V.6. – P.2389. EUV LLC project. [www.intel.com/technology/silicon/lithography.htm](http://www.intel.com/technology/silicon/lithography.htm).
4. Rajesh Menon, Amil Patel, Dario Gill, Hi Smith. Maskless lithography // Material Today's. – 2005. – February. – P.26–33.
5. Алферов Ж. Полупроводниковая электроника в России. Состояние и перспективы развития // ЭЛЕКТРОНИКА. – 2005. – №4. – С.5–9.
6. Baylor L.R., Lowndes D.H., Thomas C.E., Guilor M.A., Merkulov V.I. Digital electrostatic electron-beam array lithography // J. Vacuum Science & Technology B (Microelectronics and Nanometer Structures). – 2002. – V.20. – P.2646.
7. Baylor L.R., Lowndes D.H., Thomas C.E., Guilor M.A., Merkulov V.I., Yang X., Melechko A.V., Hale M.D. Vertically aligned carbon nanofiber-based field emission electron sources with an integrated focusing electrode // J. Vacuum Science & Technology B 22. – 2004. – Jan/Feb. – No.1. – P.35–39.
8. Baylor L.R., Lowndes D.H., Simpson M.L., Thomas C.E., Guillorn M.A., Merkulov V.I. Digital electrostatic electron-beam lithography // J. Vacuum Science & Technology B 20. – 2002. – Nov/Dec. – No.6. – P.2646–2650.
9. Druzhynin A., Kogut I. Digital CMOS ARRAY based on SOI Structures // Electron Technology. – Warshawa, 1999. – V.32. – No.1/2. – P.142–145.



*The modern situation and directions of nanometer optical and matrix array emitter lithography development is considered. The input data and calculation of structure and basic elements of architecture system is described. The integrated SOI CMOS structures are offered on the basis of base matrix crystals for realization of logic, memory and management for matrix emitters.*

**Key words:** *nanometer lithography of architecture element, SOI CMOS structure, microelectronic devices.*

УДК 621.382, 546.28

ББК 31.233, 32.97

Б.В. Атаманюк

## ДЕКОМПОЗИЦІЯ ТА ВЕРИФІКАЦІЯ ТОПОЛОГІЇ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ

За допомогою нерва канонічного покриття графа, що відповідає інтегральній схемі або алгоритмічному процесу проектування топології інтегральної схеми, проводиться декомпозиція графа за хвильовим алгоритмом, через континуумзначну ретракцію та стереографічну проекцію проводиться планаризація графа, за допомогою фундаментальної групи та відповідних гомотопних теорем здійснюється верифікація графа на лінійну зв'язність.

**Ключові слова:** *інтегральна схема, розбиття, верифікація.*

Природно подавати окремі елементи інтегральної схеми вершинами, а з'єднання – дугами графа.

Граф називається регулярним, якщо кожне ребро з'єднує тільки два вузли, і нерегулярним, якщо існують ребра, які з'єднують не два, а кілька вузлів графа, тобто ребро одним краєм приєднується не до вузлів, а до ребер. Якщо коефіцієнт розгалуження більший за одиницю, то таку мережу називають багатоелементною або багатовіконною.

Нехай  $r$  – кратність розгалуження графа  $G = \{V, E\}$  в даній вершині  $a \in V$ . Позначимо  $E = E_1 \cup E_2 \cup E_3$ , тобто множина всіх ребер графа  $E$  складається з множини  $E_1$  усіх ребер, що належать зафіксованому фрагменту  $\Phi$  графа  $G$ ,  $E_2$  – множина тих ребер, що одним кінцем містяться у  $\Phi$ , іншим – у доповненні  $G \setminus \Phi$  і  $E_3$  – множина ребер, що розміщені за межами фрагмента  $\Phi$ , тобто  $E_3 = \{e \in E / e \notin \Phi\}$ . Тоді ясно, що сумарна кратність розгалужень  $r(\Phi) = r(E_1) + r(E_2)$ .

Потрібно знайти таке розбиття  $\Omega = \{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_n\}$  графа  $G = \{N, E\}$  на частини, при якому мінімізується кількість підграфів  $\Omega_i$ , а також мінімізується кількість зв'язків між ними, тобто  $\sum r(E_2) \rightarrow \min$ .

Мінімізація кількості фрагментів здійснюється методом оптимізації згортання графа з побудовою дерева згортання. Це дерево будуємо так: до найнижчого рівня відносимо всі вершини  $a \in (V, E)$ , тобто приймаємо  $X_1 \equiv V$ . Позначимо вибраний критерій через  $F$ . Тоді на першому кроці виділяємо з множини  $X_1$  рівноцінні за вибраним критерієм  $F$  групи елементів (по два, які утворюють ребра). Сформовані групи належать до множини  $X_2$  – другого рівня згортання. На другому кроці беремо елементи з двох множин  $X_1$  та  $X_2$  і за тим же критерієм  $F$  формуємо множину  $X_3$  як об'єднання вибраних елементів з  $X_1$  та  $X_2$  і т. д. На найвищому рівні одержимо вершину  $X_n$ , що містить об'єднання всіх вершин із множини  $X_1$ . Ця вершина називається коренем дерева згортання. Насправді вершина  $X_n$  – це символічне позначення  $U$  всіх вершин графа, але вибрана вона специфічним способом через дерево згортання.

Нехай зафіксовано дві вершини  $x_k$  та  $x_j$ . Позначимо через  $b_{kj}$  кількість ребер, що з'єднують ці дві вершини й не виходять за межі фрагмента  $\Phi$ . Позначимо  $a_n + a_j = r(E_2(x_k)) + r(E_2(x_j))$  – сумарна кратність вершин, з яких ребра виходять за межі фрагментів. Позначимо через  $c_{kj}$  сумарні кратності обох вершин  $x_k$  та  $x_j$ . Тоді цільова функція  $F_{kj}$  із коефіцієнтами  $\omega_{kj}$  має вигляд:  $F_{kj} = \omega_1 b_{kj} + \omega_2 c_{kj} - \omega_3 (a_k + a_j)$ . При  $\omega_3 = 0$  шукаємо пару фрагментів, що мають максимальну кількість зовнішніх зв'язків  $\max(\omega_1 b_{kj} + \omega_2 c_{kj})$ . При  $\omega_1 = 0$  шукаємо пару фрагментів, що мають