

ПРОЕКТУВАННЯ ЛОГІЧНО-АРИФМЕТИЧНИХ НАНОПРИСТРОЇВ

Реалізується комп'ютерне проектування наноелектронних схем на квантових мажоритарних компонентах. Пропонуються методи побудови логічно-арифметичних обчислювальних пристроїв комбінаційного типу, які реалізують практично повну систему логічних функцій як в мажоритарному, так і в булевому базисах.

Теза. Квантові коміркові автомати – технологія, що виникла два десятиліття тому, в якій значенням логічних станів відповідають позиції окремих електронів. Квантові комірки використовуються для конструювання логічних нанoeлементів та арифметичних нанопристроїв. Робота присвячена комп'ютерному проектуванню сучасних логічно-арифметичних пристроїв, до складу яких входять універсальні мажоритарні елементи. В роботі виконується моделювання квантових нанопристроїв з використанням системи автоматизованого проектування (САПР) QCADesiner.

Ключові слова: квантовий комірковий автомат, мажоритарний елемент, автоматизоване проектування, логічно-арифметичні пристрої.

Вступ. Квантові коміркові автомати – це обчислювальна парадигма, згідно з якою інформація представляється певною конфігурацією електронів у комірці квантових автоматів, що складається з однієї чи двох окремих молекул [1].

Орієнтація пари квантових комірок така, що їхнє взаєморозміщення визначає взаємний вплив. Ця взаємодія зарядів між сусідніми комірками дає змогу обробляти і передавати інформацію. Такий метод є функціонально аналогічним, але структурно відрізняється від способу, в який комбінуються окремі вентиля у великих інтегральних мікросхемах для забезпечення виконання логічно-арифметичних операцій та створення схем з пам'яттю.

1. Основи теорії квантових коміркових автоматів. Прилади на квантових коміркових автоматах (КА) складаються з нанорозмірних діелектричних комірок, які мають чотири квантові напівпровідникові точки, розташовані у кутках, і два рухомі електрони. Окрема комірка забезпечує тунельні переходи з потенціальними бар'єрами. Переходи контролюються локальним електричним полем, величина якого збільшується для перешкодження руху електронів, або зменшується для його спонукання. Таким чином, окрема комірка може перебувати в одному з трьох станів. Нульовий стан, або стан невизначеності настає, коли потенціальний бар'єр зменшений, і рухомий електрон може зайняти будь-яку з вакансій. Інші два стани – стани поляризації, виникають, коли величина потенціального бар'єру зростає і зберігає свій рівень, щоб мінімізувати енергетичний рівень комірки. Набір станів Q скінченний і типовий: $Q = \{0,1\}$. Ймовірність перебування комірки в одному із станів поляризації може бути співвіднесена з густиною заряду кожної окремої квантової точки і визначається формулою:

$$P = \frac{(\rho_1 + \rho_3) - (\rho_2 + \rho_4)}{(\rho_1 + \rho_3) + (\rho_2 + \rho_4)} = \pm 1,$$

де ρ_i – густина електричного заряду кожної квантової точки комірки.

На рис. 1 зображена базова комірка КА, два способи її розміщення в просторі і поляризації електронів.

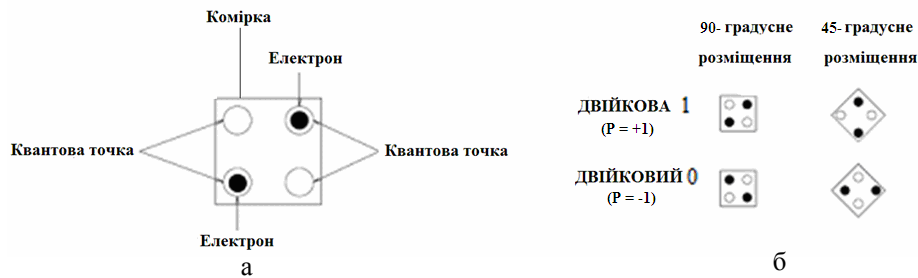


Рис. 1. Комірка квантового автомата (а), її два способи розміщення в просторі (б) і поляризації ($P = \pm 1$)

2. Логічний мажоритарний елемент та інвертор. Розміщуючи комірки в послідовності одна за одною і викликаючи їх взаємодію між собою, можливо забезпечити протікання інформації по такому провіднику. Теоретично існує два методи побудови провідника залежно від 45-градусної чи 90-градусної орієнтації комірок, але технологічно складно виготовити нанокмірки з різною орієнтацією.

За допомогою КА можуть бути сконструйовані різні елементи для виконання логічних і арифметичних операцій. Базовими логічними нанокмірками в теорії коміркових автоматів є мажоритарний елемент (МЕ) та інвертор (рис. 2).

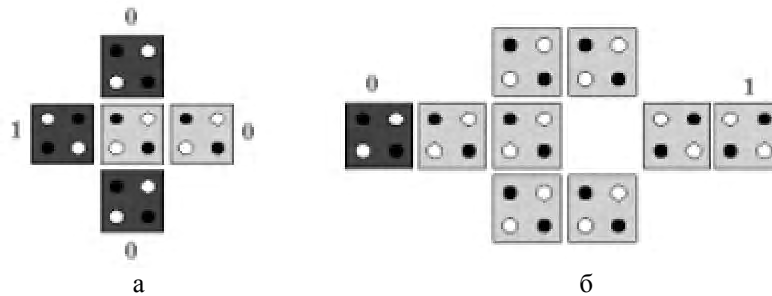


Рис. 2. Тривходовий мажоритарний елемент (а) та інвертор (б) на базі коміркових автоматів

Поляризація вихідної комірки МЕ збігається з поляризаціями більшості вхідних комірок. Булевий вираз для мажоритарної функції:

$$\text{maj}(x_2, x_1, x_0) = x_2 x_1 \vee x_2 x_0 \vee x_1 x_0,$$

де x_2, x_1 та x_0 – вхідні аргументи. Фіксація поляризації одного з входів мажоритарного елемента як логічний 0 чи логічна 1 дає змогу отримати елементи І чи АБО, відповідно $\text{maj}(x_2, x_1, 0) = x_2 \cdot x_1$, $\text{maj}(x_2, x_1, 1) = x_2 \vee x_1$. Такі комірки можуть бути створені в процесі виробничого виготовлення, що усуває необхідність підтримувати постійний струм через схему.

3. Синхронізація. Синхронізація відіграє важливу роль в керуванні роботою квантово-коміркової логіки. Такий контроль реалізується в результаті приєднання КА до тактових зон таким чином, що вони замикаються в послідовність для бажаного напрямку передачі сигналу. Коли потенціал зони, де знаходиться КА, зменшується, електрони втрачають стабільність, в результаті чого поляризація комірки не визначається. Зростання потенціального бар'єру зменшує коефіцієнт тунелювання, в результаті чого електрон починає локалізуватися. Якщо електрон займає одне місце, то КА набуває визначеної поляризації. Коли потенціальний бар'єр досягає максимуму, говорять, що комірка закрита. Закриті комірки працюють як умовний вхід, причому дійсний вхід може набувати нового значення. Саме тому існує певна затримка в поширенні сигналу через КА. З метою забезпечення обчислень сигнал проходить через тактові зони, що представляють собою області, де відбуваються обчислення. Тактові зони фізично упорядковані, а це означає, що обчислення повинні проводитися в послідовному порядку. Сигнали повинні надходити до схеми обрахунку без затримок.

Квантові комірки МЕ повинні бути в тактовій зоні, відділеній від тактових зон вхідних і вихідної комірок, тому мажоритарний елемент розташовується на краях інших тактових зон.

4. Суматори. Науковці Харківського університету радіоелектроніки [2] та Університету Нотр Дам [1] першими запропонували мікро- та наносхеми суматорів на базі МЕ. Однобітний напівсуматор на КА може бути складений з чотирьох МЕ і двох інверторів (рис.3). Вирази для суми S і переповнення C цього суматора такі:

$$S = \text{maj}(\overline{xy}, \overline{xy}, 1) = x \oplus y, \quad C = \text{maj}(x, y, 0) = xy,$$

де x, y – вхідні доданки.

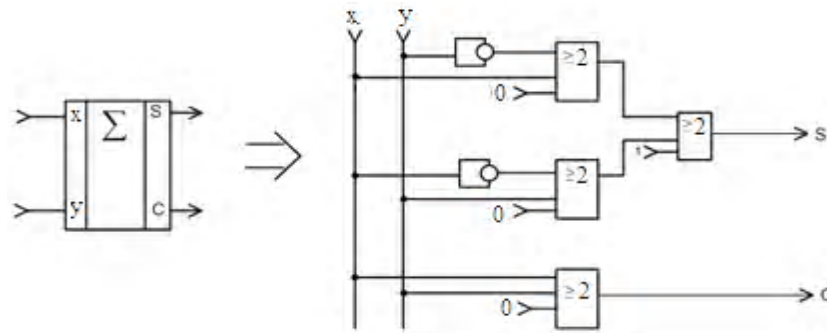


Рис. 3. Схема однобітного напівсуматора на тривходових мажоритарних елементах

На рис. 4 наведена наносхема на КА однобітного напівсуматора (а) та результати моделювання її часових діаграм на планшетному полі САПР QCADesiner [4, 5]. Для конструювання вхідних провідників використані комірки з 45 градусною орієнтацією. Використання такого способу розміщення комірок створює інвертуючий ланцюг, в якому кожна комірка протилежно поляризована до сусідніх.

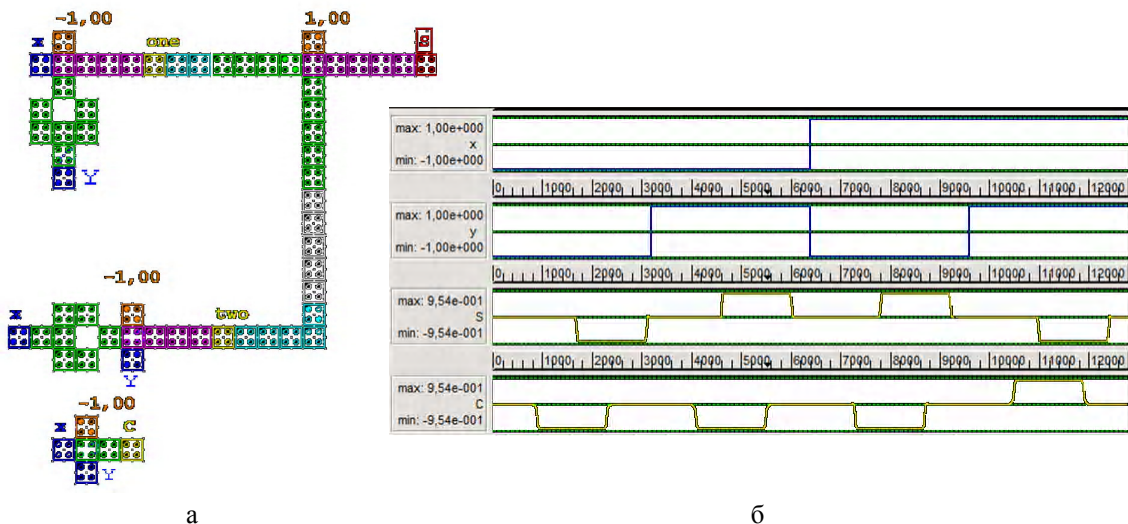


Рис. 4. Наносхема однобітного напівсуматора на КА (а) та результат моделювання його логічних діаграм (б)

Якщо провідник з однаково поляризованих комірок перетинає інвертуючий провідник, провідники не взаємодіють між собою, тому можуть працювати незалежно на одному рівні. Такий перетин має назву компланарний [3,5]. Проблемою компланарного перетину є те, що відстань між комірками окремого провідника призводить до зниження ймовірності проходження сигналу. Затримка такого суматора – один тактовий цикл, що складається з чотирьох тактових зон, представлених на рис. 4 різними ступенями градацій сірого.

Дворозрядний суматор реалізує арифметичне додавання S_2, S_1, S_0 дворозрядних бінарних чисел x_1x_0 та y_1y_0 (рис.5).

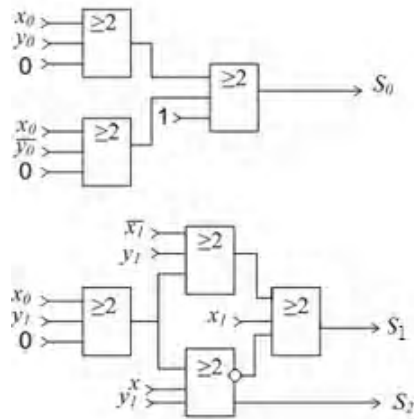


Рис.5. Наносхема дворозрядного суматора на тривходових мажоритарних елементах
Логічні рівняння для трьох виходів дворозрядного суматора, реалізованого на семи МЕ і одному інверторі, мають вигляд:

$$S_0 = \text{maj}(\text{maj}(x_0, \bar{y}_0, 0), \text{maj}(x_0, y_0, 0), 1) = x_0 \bar{y}_0 \vee \bar{x}_0 y_0 = x_0 \oplus y_0,$$

$$C_0 = \text{maj}(x_0, y_0, 0) = x_0 y_0,$$

$$S_1 = \text{maj}(\text{maj}(x_1, y_1, C_0), x_1, \text{maj}(x_1, y_1, \bar{C}_0)) = \bar{x}_1 \bar{y}_1 C_0 \vee \bar{x}_1 y_1 \bar{C}_0 \vee x_1 \bar{y}_1 \bar{C}_0 \vee x_1 y_1 C_0 =$$

$$C_0 (\bar{x}_1 \bar{y}_1 \vee x_1 y_1) \vee \bar{C}_0 (\bar{x}_1 y_1 \vee x_1 \bar{y}_1) = (x_1 \oplus y_1) \oplus C_0,$$

$$S_2 = \text{maj}(C_0, x_1, y_1) = x_1 y_1 \vee x_1 C_0 \vee y_1 C_0.$$

Далі на рис. 6, 7 показано результати проектування цієї наносхеми за допомогою САПР QCAD.

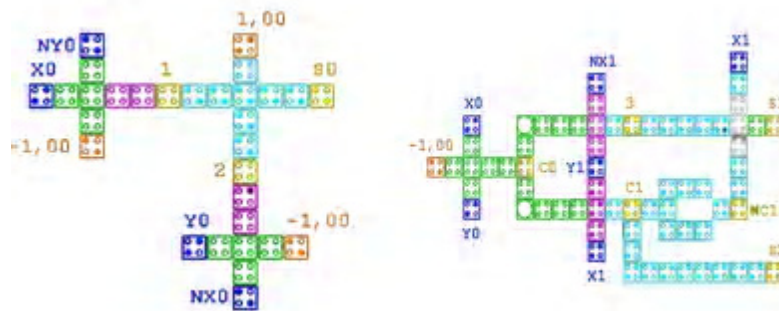


Рис. 6. Проект наносхеми дворозрядного суматора

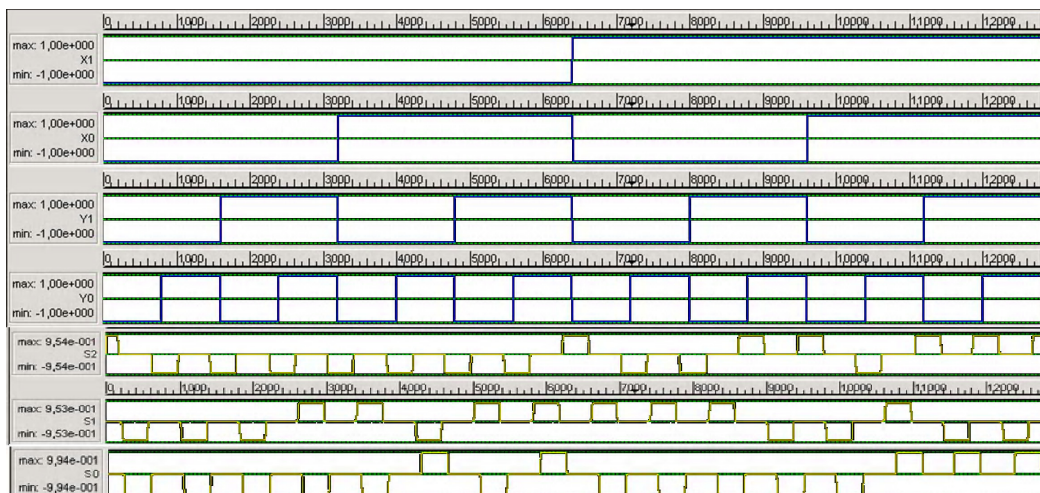


Рис. 7. Моделювання часових характеристик дворозрядного суматора

Спроекована таким чином наносхема дворозрядного суматора базується на 98 квантових коміркових автоматах, розмір яких (18x18) нм, з чотирма квантовими точками діаметром 5 нм, відстань між центрами сусідніх комірок складає 20 нм. Загальний розмір конструкції (360x414) нм. Існує 11 входів і три виходи, а чотири комірки мають фіксовану поляризацію.

При використанні п'ятивходових МЕ можна побудувати найбільш раціональну і просту схему однорозрядного суматора. Структурна схема однорозрядного суматора побудована на одному п'ятивходовому МЕ і одному тривходовому (рис. 8).

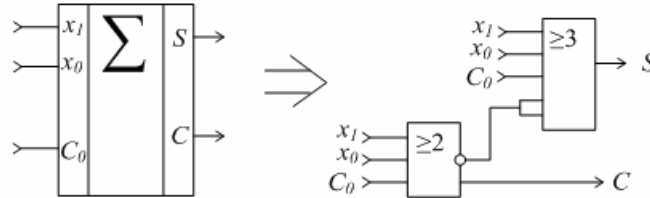


Рис. 8. Схема однорозрядного суматора на базі п'ятивходового МЕ

Результати комп'ютерного проектування цієї наносхеми за допомогою САПР QCAD наведені на рис. 9 та 10.

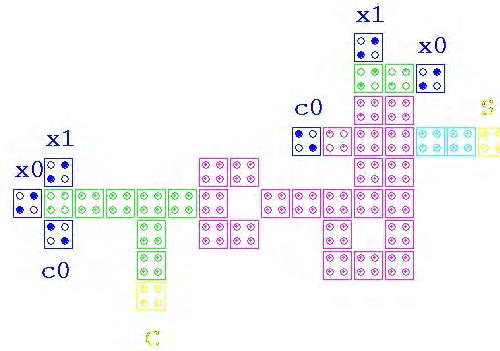


Рис. 9. Проект повного однорозрядного суматора на п'ятивходовому МЕ

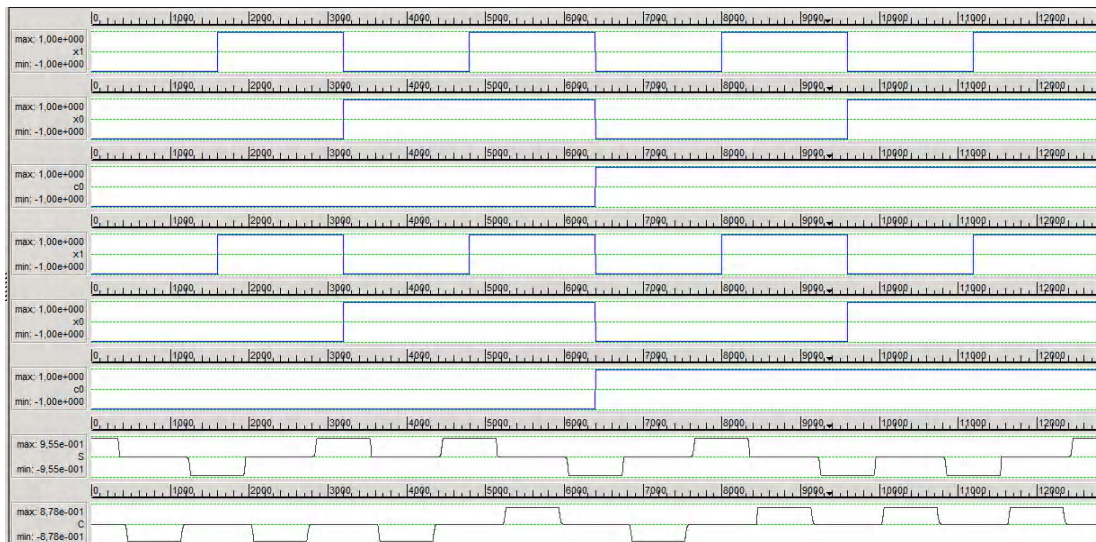


Рис. 10. Моделювання часових характеристик повного однорозрядного суматора на п'ятивходовому МЕ

Функції додавання S та переносу C визначаються правилами додавання в мажоритарно-му базисі [2]:

$$S = \text{maj}(x_1, x_0, C_0, \bar{C}) = \bar{C}(x_1 \vee x_0 \vee C_0) \vee x_1 x_0 C_0,$$

$$C = \text{maj}(x_1, x_0, C_0) = x_1 x_0 \vee x_1 C_0 \vee x_0 C_0.$$

Найпрорстіша наносхема повного суматора базується на 41 КА, а її загальний розмір становить (288x162) нм.

Висновки. Виконане комп'ютерне проектування одно- та дворозрядних суматорів. Використання багаторівневого перетинання провідників дозволяє уникнути проблем компланарного перетину. Моделювання виконане в такий спосіб, що виходи перебувають в останній четвертій тактовій зоні, а це відповідає фазі спокою після фази, в якій проводилися останні обчислення. Необхідно три повних тактових цикли для завершення операції додавання. Досягнута мета проектування надійного розшарування наносхеми дворозрядного суматора і підвищення його експлуатаційної надійності, але наявність недоліків і дефектів, пов'язаних з молекулярною технологією виготовлення квантових коміркових автоматів, потребує подальшої роботи в цьому напрямку.

Список літератури: 1. *Tougaw, P.D., Lent C.S.* Logic devices implemented using quantum cellular automata / *Tougaw, P.D., Lent C.S.* // J. Appl. Phys., American Institute of Physics. 1994. 2. *Пакулов Н.Н.* Мажоритарний принцип построения надежных узлов и устройств ЦВМ / Пакулов Н.Н. М.: Сов. радио, 1974. 3. *Bhanja, S., Ottavi, M., Lombardi, F., Pontarelli. S.* OCA circuit for robust coplanar crossing / *Bhanja, S., Ottavi, M., Lombardi, F., Pontarelli. S.* // Journal of Electronic Testing. 2007. P. 193-210. 4. *Melnyk O.S., Tsapok L.O.* Computer simulation of nanoelectronics arithmetic – logic devices // Електроніка та системи управління.- 2012,- N1 (31), P.5-10. 5. *Walus, K.* QCADesiner: A CAD Tool for an Emerging Nano-Technology / *Walus, K.* // Micronet Annual Workshop. 2003.

Надійшла до редколегії 13.03.2014

Мельник Олександр Степанович, канд. техн. наук, доцент кафедри електроніки Харківського національного авіаційного університету. Наукові інтереси: наноелектроніка, системи автоматизованого проектування, моделювання одноелектронних схем. E-mail: melnyk.ols@gmail.com, тел.: (050) 5501090, (093) 9945251.

Козаревич Вікторія Олександрівна, асистент кафедри електроніки Харківського національного авіаційного університету. Наукові інтереси: цифрова наноелектроніка, математичне моделювання одноелектронних схем. E-mail: st-viktoria@yandex.ru

Романюк Всеволод Юрійович, студент кафедри електроніки Харківського національного авіаційного університету. Наукові інтереси: моделювання арифметико-логічних наносхем. E-mail: sevczik@rambler.ru.