

СУЧАСНІ ОДНОЕЛЕКТРОННІ НАНОТЕХНОЛОГІЇ

Анотація. У цій роботі описані наносхеми на квантових коміркових автоматах (КА) або quantum-dot cellular automata (QCA) та пов'язані з ними компоненти, такі як провідник, елемент мажоритарного вибору і інвертор. Поєднання цих основних компонентів є необхідним для технології реалізації сучасних цифрових наносхем. Одноелектронна компонентна база в найбільшому ступені впливає на такі основні експлуатаційні характеристики і параметри сучасних комп'ютеро-обчислювальних систем, як швидкість, що перевищує 10 ТГц, енергоспоживання, що складає менше 1 нВт, та субмікронні розміри. Для однопідресної передачі інформації та комутації в наносхемах застосовують чотирифазні багатопідресні системи синхронізації. Принципово нова особливість наноелектроніки пов'язана з тим, що для нанoeлементів починають переважати квантові ефекти, які вважались паразитними для мікроелектроніки.

Ключові слова: квантові коміркові автомати, нанопровідники, інвертор, мажоритарний елемент, автоматизація проектування.

Melnik Oleksandr, Myshynskiy Arsen
National Aviation University

MODERN SINGLE-ELECTRONS NANOTECHNOLOGY

Summary. This paper describes quantum-dot cellular automata (QCA) and related components such as nanowire, majority selection element, and inverter. The integration of these basic components is necessary for the technological implementation of modern digital nanosystems. The single-electron component base has the greatest impact on such basic operational characteristics and parameters of modern computer-computing systems as speed exceeding 10 THz, power consumption, which is 1 nW, and submicron dimensions. Four-phase multi-layer clock synchronization systems are used for unidirectional information transfer and switching in nanosystems. A fundamentally new feature of nanoelectronics is because quantum effects, which were considered parasitic microelectronics, begin to prevail for nanoelements. Qca cells [1] use electron positions at quantum dots to implement binary "0" and "1". The cell (50x50) nm contains four semiconductor quantum dots with a diameter of 5nm in each corner. The dielectric plane of the cell is shown for illustration purposes only. Two electrons occupy diagonal points according to the principle of electronegativity [2]. Each electron can tunnel between points within the same cell, but can not get out of it. Two electrons within each cell repel one another under the action of Coulomb forces to the opposite diagonal corners of the cell. This creates two States that are used to represent logical values, namely, the upper left and lower right points correspond to the logical "0". In this case, it is said that the cell on the QCA is "polarized to -1". The opposite configuration represents logical "1". In this case, the cell on the QCA is "polarized to +1". Nanowires on QCA. The Coulomb interaction is used to determine the position of electrons in a cell [3]. Consider a few cells on a SPACECRAFT is placed in a series. Assume that the cells on the left are input cells and the cells on the right are output cells. In the case of a logical "0" at the input, in all subsequent cells through the Coulomb interaction formed logical "0". This process is repeated for all cells in the nanowire close to the original. Similarly, the same process is for nanowires when transmitting a logical "1".

Keywords: quantum-dot cellular automata, semiconductor, inverter, majority element, computer-aided design.

Вступ. Комірки КА [1] використовують позиції електронів у квантових точках для реалізації бінарних "0" і "1". На рис. 1 комірка (50x50) нм містить чотири квантові напівпровідникові точки діаметром 5 нм в кожному куту. Діелектрична площина комірки зображена тільки для ілюстрації. Два електрони за принципом електронегативності займають діагональні точки [2]. Кожен електрон може тунелювати між точками в межах однієї комірки, але не може вийти з неї. Два електрони в межах кожної комірки відштовхуються один від одного під дією кулонівських сил до протилежних діагональних кутів комірки. Це створює таких два стани, що використовуються для представлення логічних значень, а саме заняття верхньої лівої і нижньої правої точки відповідає логічному "0". У цьому випадку кажуть, що комірка на КА "поляризована до -1". Протилежна конфігурація являє логічну "1". У цьому випадку комірка на КА "поляризована до +1".



Рис. 1. Поляризації комірок КА

Джерело: [2]

Нанопровідники на КА. Кулонівська взаємодія використовується для визначення позиції електронів в комірках [3]. Розглянемо кілька комірок на КА, розміщених послідовно, як показано на рис. 2. Припустимо, що комірки, розташовані ліворуч, є вхідними, а комірки справа – вихідними. У разі логічного "0" на вході (рис. 2,а), у всіх наступних комірках через кулонівську взаємодію формуються логічні "0". Цей процес повторюється для

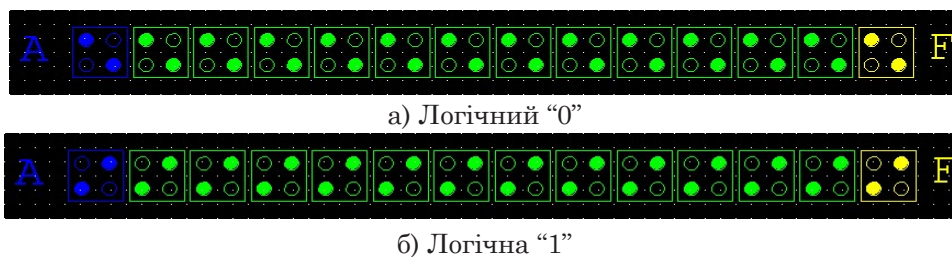


Рис. 2. Лінійні провідники на КА

Джерело: розроблено авторами

усіх комірок у нанопровіднику впритул до вихідної. Аналогічно, на рис. 2,б ілюструється той же процес для нанопровідника при передачі логічної "1".

Для нормального функціонування технологія КА потребує наявності механізму синхронізації. Синхронізація складається з чотирьох сигналів ($\phi_0, \phi_1, \phi_2, \text{ і } \phi_3$), як показано на рис. 3. Низький рівень синхросигналів, передній фронт переходу з низького на високий рівень, високий рівень та задній фронт переходу знову на низький рівень формують чотири такти обробки інформації: зберігання (hold), передача (release), утримання (relax) та запирання (latch). Коли синхроімпульс має низький рівень ($\phi < 0$), у комірках КА електрони зберігають фіксовані позиції і не тунелюють через високі потенційні бар'єри між ними (стан зберігання). Передній фронт синхросигналу ($d\phi/dt > 0$) викликає тунелювання електронів у комірках (стан передачі). При високому рівні синхросигналу ($\phi > 0$) вважається, що електрони мають нульову поляризацію (стан утримання). Під час формування заднього

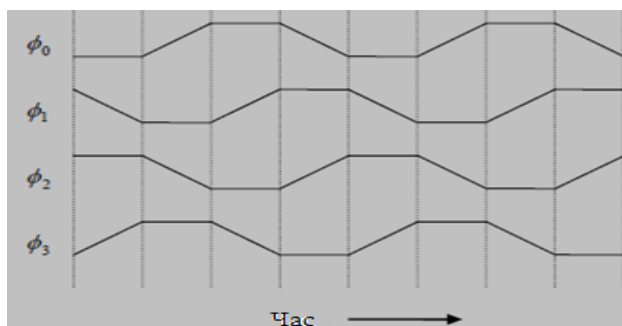


Рис. 3. Чотирифазні синхросигнали для комутації схем на КА

Джерело: розроблено авторами

фронт ($d\phi/dt < 0$) електрони відштовхуються від поверхні синхропровідників, а їх положення залежить від впливу кулонівського відштовхування сусідніх комірок (стан запирання або підготовки до нового робочого циклу). Таким чином, система з чо-

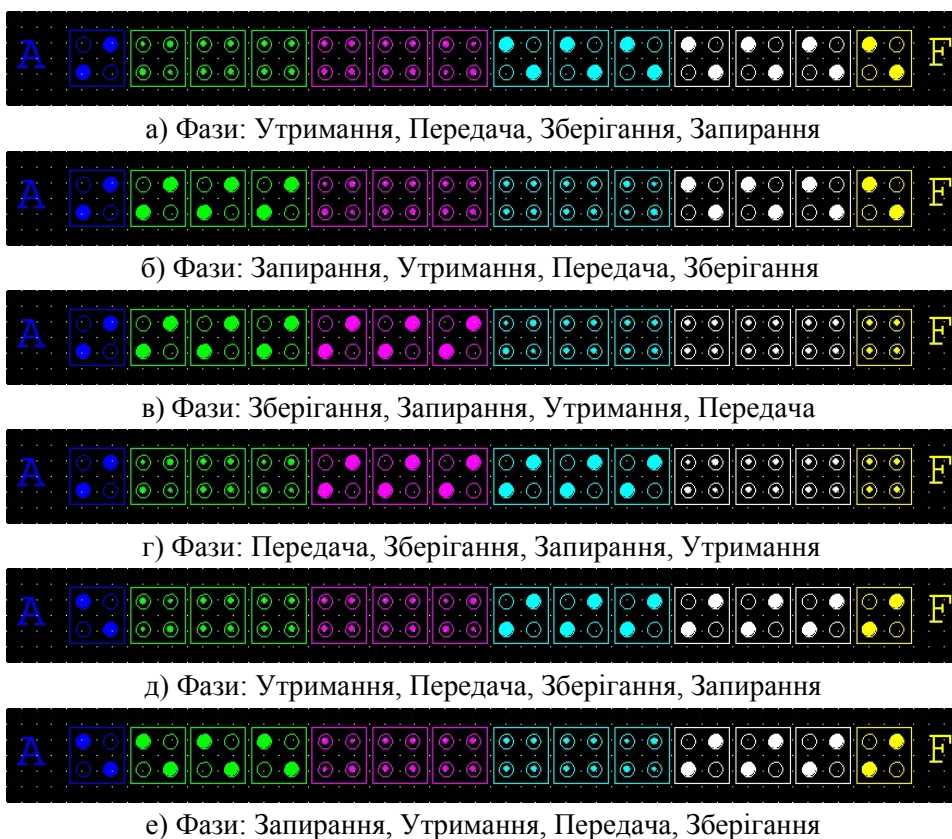


Рис. 4. Конвеєрні провідники на КА

Джерело: розроблено авторами

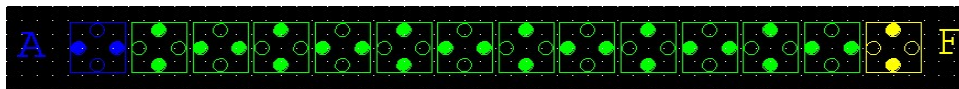
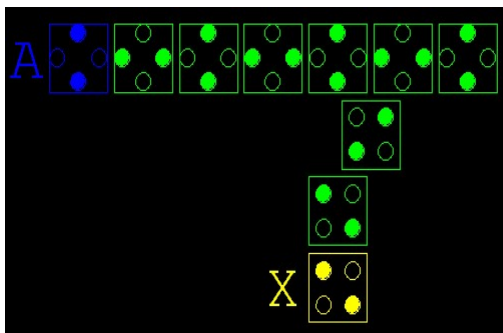
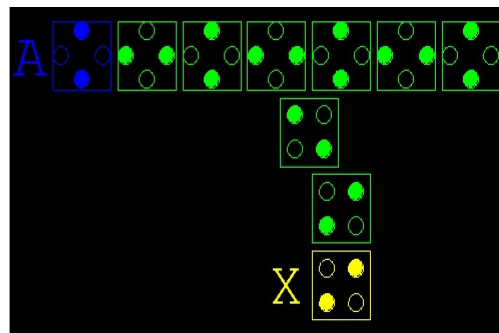


Рис. 5. Нанопровідник на КА

Джерело: розроблено авторами



а) Буферний вихід



б) Інвертований вихід

Рис. 6. Ланцюг інверсії з відгалуженням

Джерело: [2]

тирьох циклів потрібна в технології КА для передачі інформації (логічних значень) по провідниках або логічних елементах.

Рис. 4 ілюструє процес передачі інформації по нанопровіднику завдяки використанню чотири-тактного механізму синхронізації. Кожна частина представляє собою одну чверть циклу.

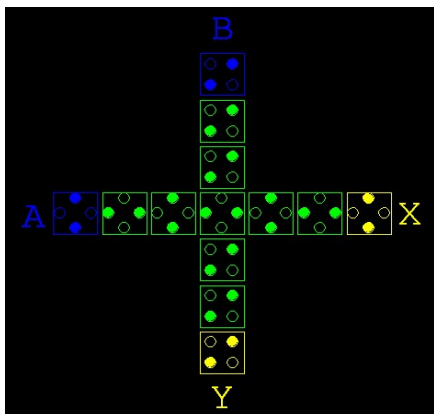


Рис. 7. Перетин провідників на нормальних (BY) та інверсійних (AX) КА

Джерело: [2]

Система автоматизованого проектування (САПР) QCADesigner [4] використовує зелений, фіолетовий, синій і білий кольори комірок для циклів ϕ_0 , ϕ_1 , ϕ_2 і ϕ_3 , відповідно. Кожна частина представляє певний етап в певний час.

Існує ще один вид нанопровідників на КА, що називається схемою інверсії, яка показано на рис. 5. Положення квантових точок у нормальному буфері комірки повертається на 45° за або проти годинникової стрілки, щоб стати перевернутою коміркою.

Це також може бути зроблено шляхом розміщення нормальної комірки нижче або вище інверсного. Кола та приведеної комірки на підграні між перевернутими комітками у певному місці для отримання буферного (початкового) значення (рис. 6,а), або інвертованого значення (рис. 6,б). Передбачається, що входні комірки поляризовані до значення логічного "0".

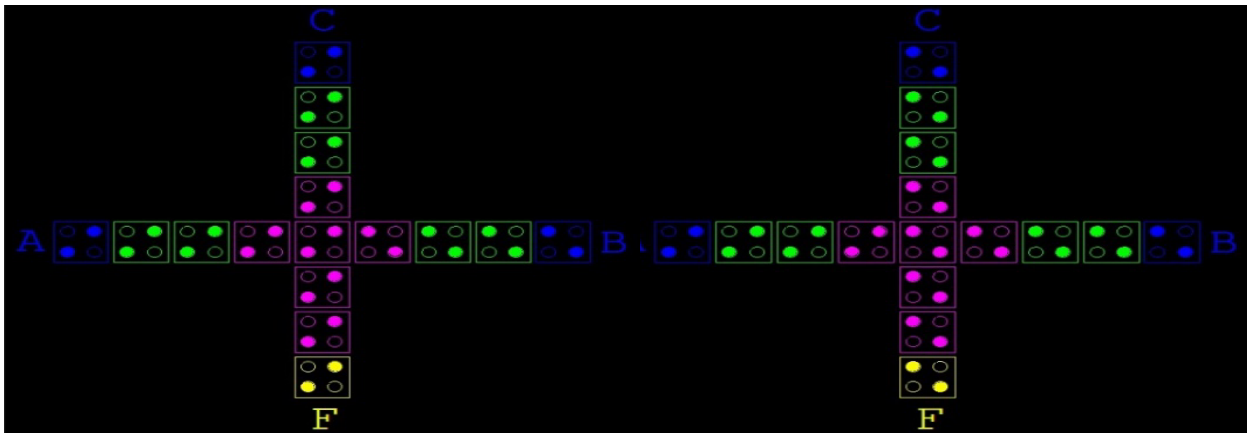
Нормальні нанопровідники на КА й кола інверсії можуть бути використані при перетині з меншим рівнем завад. Як показано на рис. 7, нормальні КА розташовані вертикально, а інверсні розташовані горизонтально (або навпаки). Інверсні КА повинні бути безперервними нанопровідниками на перетині, в той час як нормальний КА має розрив на перехресті.

Таблиця 1

Програмування мажоритарного елемента (2 з 3)

Вхід 1 С (програмований)	Вхід2 В	Вхід3 А	Вихід F	
0	0	0	0	Виконує логічну функцію множення "І" (кон'юнкція)
0	0	1	0	
0	1	0	0	
0	1	1	1	Виконує логічну функцію додавання "АБО" (диз'юнкція)
1	0	0	0	
1	0	1	1	
1	1	0	1	
1	1	1	1	

Джерело: [2]

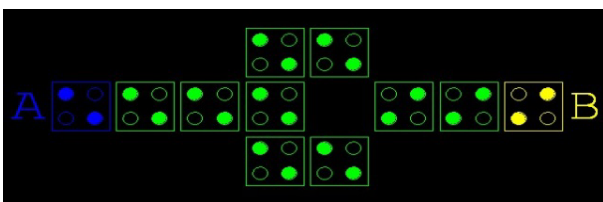


а) Елемент "І"

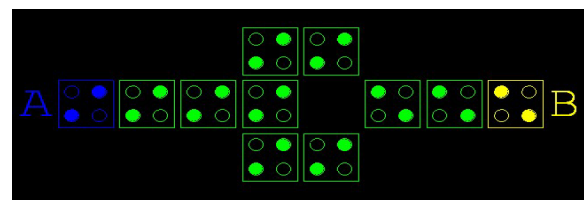
б) Елемент "АБО"

Рис. 8. Програмовані мажоритарні елементи

Джерело: [2]



а) На вході "0"



б) На вході "1"

Рис. 9. Елемент заперечення НІ на КА

Джерело: [2]

Логічні наноелементи на КА. Базовим в технології КА є тривходовий мажоритарний елемент [2; 3]. Логічний вираз для мажоритарного елемента має вигляд:

$$F = AB \vee BC \vee AC. \quad (1)$$

Якщо хоча б на двох входах діє логічний "0", то на виході також діє логічний "0". Згідно рівнянню (1) тривходова наносхема та її таблиця істинності з одним із входів, на який подається фіксований "0" є еквівалентною двовходовому елементу логічно перемноження І. Аналогічним чином, якщо принаймні на два входи подається логічна "1", результатом є логічна "1". Тривходова таблиця перетворень з одним із входів, на який подається фіксована "1" є еквівалентною двовходовому елементу логічного додавання АБО. Табл. 1 ілюструє можливості програмування мажоритарного елемента. Затінені символи представляють програмоване значення. Рис. 8 ілюструє реалізацію елементів І та АБО. Сума кулонівської взаємодії від сигналів В, С визначає значення сигналу на виході.

Найбільш завадостійкими є елементи заперечення НІ з розгалуженням ліній на КА (рис. 9). Рис. 9,а показує розташування електронів в КА для інвертування логічного "0". Аналогічно, на рис. 9,б показано інвертуючий елемент з логічною "1" на вході комірки. На виході завжди отримують $V = A$.

Елемент заперечення НІ зазвичай використовує одну чи дві зони синхронізації.

В САПР QCADesigner[4] доступні три різні алгоритми моделювання.

Алгоритм нелінійної апроксимації побудований на нелінійній апроксимації функції відгуку комірка-до-комірки. В САПР прийнято адиабатичне перемикавання (поляризацію), завжди залишаючись дуже близько до основного стану кожної комірки та обчислюючи за допомогою формули:

де P_i – поляризація стану комірки, P_j – поляризація стану сусідніх комірок, $E_{i,j}^k$ – енергія взаємодії між комірками, γ – потенціал тунелювання.

$$P_i = \frac{E_{i,j}^k \sum P_j}{2\gamma} \sqrt{1 + \left(\frac{E_{i,j}^k \sum P_j}{2\gamma} \right)^2}, \quad (2)$$

Цифровий алгоритм представляє собою симулятор бінарної логіки. При використанні цього алгоритму кожна комірка є в одному з трьох станів: "нейтральний", "логічний нуль" або "логічна одиниця". За допомогою цих трьох станів та необхідної інформації про зону синхронізації кожної комірки, моделювання може бути швидко виконане, і кожному набору вхідних сигналів буде відповідати адекватний набір вихідних сигналів. Бінарний підхід припускає, що комірка представляє собою просту двостанову систему, для якої Гамільтоніан має визначення:

Використовуючи алгоритм Якобі, можемо знайти власні значення та вектори (3) Гамільтоніана:

$$H_i = \sum_j \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} P_j E_{i,j}^k & -\gamma_j \\ -\gamma_j & -\frac{1}{2} P_j E_{i,j}^k \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де H_i – Гамільтоніан, ψ_i – стан вектора комірки. E_i – енергія пов'язана з станом ψ_i . Цей алгоритм (3) та (4) впорядковує кожен з станів від-

$$H_i \psi_i = E_i \psi_i, \quad (4)$$

ТЕХНІЧНІ НАУКИ

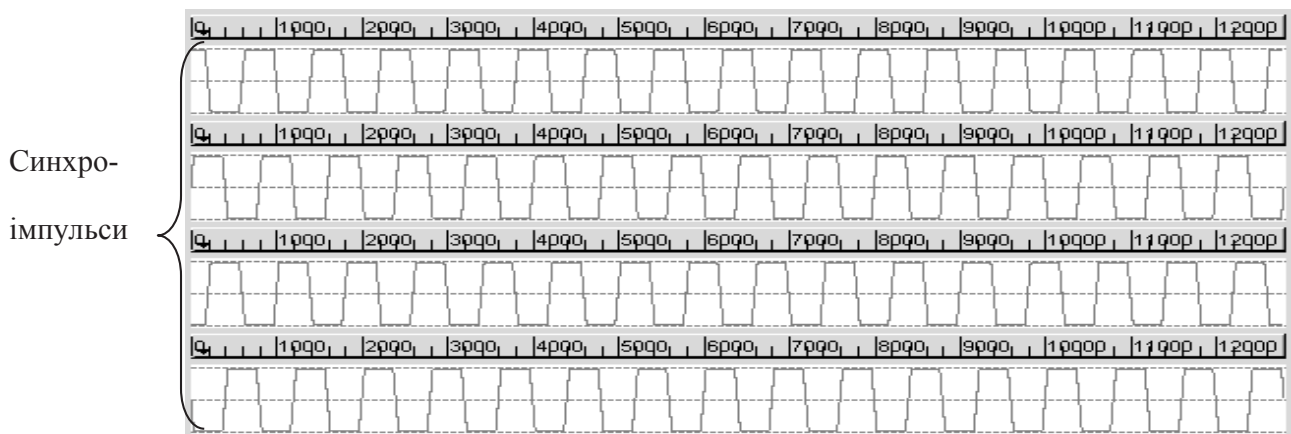


Рис. 10. Результат моделювання роботи мажоритарного елемента на КА

Джерело: [2]

повідно до їхньої енергії у порядку зростання. Першим у впорядкованому списку є стан з найнижчою енергією.

Для ілюстрації на рис. 10 наведені результати моделювання в САПР QCADesigner часових діаграм мажоритарного нанoelementa (рис. 8).

Отримані осцилограми повністю відповідають таблиці програмування (табл. 1).

Висновок. Квантово-точковий комірковий автомат (КА) є відносно новою нанотехнологією. На відміну від комплементарної-метал-оксид-напівпровідникової (КМОН) технології, КА використовує позиції електронів у квантових точках для представлення бінарних значень "0" і "1".

КА-технологія використовує кулонівську взаємодію, щоб визначати поляризації електронів, а КМОН використовується для визначення потенціалу (напруги) логічних рівнів. Перевагами впровадження технології КА є найменший розмір наносхеми, більш високі робочі частоти і щонайменше енергоспоживання.

Якщо при переході від мікро- до нанoeлектроніки квантові ефекти є паразитними, наприклад, роботі класичних біполярного та польового транзисторів при зменшенні розмірів починає заважати тунелювання носіїв заряду, то одноелектроніка яка використовує квантові ефекти, – це основа нової гетероструктурної нанoeлектроніки.

Список літератури:

1. Lent C.S., Isaksen B. Clocked molecular quantum-dot cellular automata IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 50, no. 9, pp. 1890-1896, Sept. 2003.
2. Мельник О.С., Миколушко А.М. Репрограмовані мультиплексорні наносхеми. Вісник НТУ "ХПІ", серія : Математичне моделювання в техніці та технологіях. 2019. № 8(1333). С. 53–62.
3. Lent T.D. A QCA implementation of a look-up Tables for FPGA. Rochester Institute of Teleology, N.Y., 2006. № 5.
4. URL: www.qcadesigner.ca/tutorials/QCATutorial.html

Reference:

1. Lent C.S., Isaksen B. Clocked molecular quantum-dot cellular automata IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 50, no. 9, pp. 1890-1896, Sept. 2003.
2. Melnyk O.S., Mykolushko A.M. (2019). Reprogrammed multiplexer nanosystems [Reprogrammed multiplexer nanosystems]. *Visnyk NTU "KhPI", seriya : Matematychnye modeliuvannia v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*, 8(1333), 53–62.
3. Lent T.D. A QCA implementation of a look-up Tables for FPGA. Rochester Institute of Teleology, N.Y., 2006. № 5.
4. URL: www.qcadesigner.ca/tutorials/QCATutorial.html