

*О.О. Нагайченко, О.С. Мельник, к.т.н., доцент
(Національний авіаційний університет, Україна)*

Надійність одноелектронних наносхем в космічних умовах експлуатації

Робота присвячена комп'ютерному моделюванню працездатності універсальних мажоритарних елементів при криогенних температур. Реалізоване комп'ютерне моделювання мажоритарних наносхем на базі квантових коміркових автоматів з використанням автоматизованої системи проектування QCADesiner.

Вступ. Квантові коміркові автомати (КА) представляють парадигму, згідно з якою інформація представляється певною конфігурацією електронів в комірці КА, що складається з однієї чи двох окремих молекул.

Орієнтація пари КА така, що їхнє взаєморозміщення визначає взаємний вплив. Ця взаємодія зарядів між сусідніми комірками дає змогу обробляти і передавати інформацію.

Моделі квантових наноелектронних мажоритарних елементів. Нанопристрої на КА складаються з діелектричних комірок, які мають чотири квантові напівпровідникові точки, розташовані в кутках, і два рухомих електрони заповнюють діагональні точки. Порядок їх розміщення залежить лише від скінченного набору можливих значень в межах певної комірки [1,2]. Окрема комірка забезпечує тунельний перехід з потенціальним бар'єром. Переходи контролюються локальним електричним полем, величина якого збільшується для перешкоджання руху електронів, або зменшується для його спонукання. Окрема комірка може перебувати в одному з трьох станів: нульовий стан або стан невизначеності наступає, 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: $Q = \{0, 1\}$.

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

Розміщуючи комірки в послідовності одна за другою і викликаючи їх взаємодію між собою, можливо забезпечити передачу інформації по такому провіднику. Теоретично існує два методи побудови провідника в залежності від 45-градусної чи 90-градусної орієнтації комірок, але технологічно складно виготовити нанокірки з різною орієнтацією.

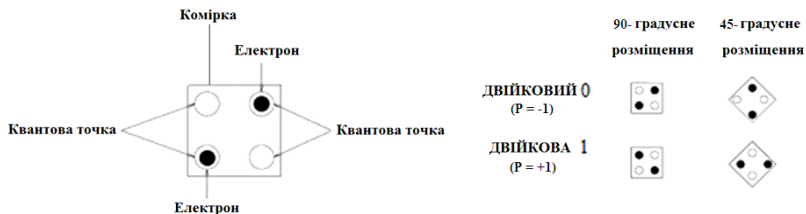


Рис. 1. Клітка КА (а), її два розміщення в просторі (б) і поляризації ($P \pm 1$)

За допомогою КА реалізують елементи для виконання логічних і арифметичних операцій. Базовими логічними елементами в нанoeлектроніці КА є мажоритарний елемент та інвертор (рис. 2).

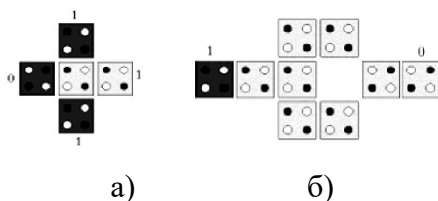


Рис. 2. Мажоритарний елемент (а) та інвертор (б) на базі КА

Вихідна клітка мажоритарного елемента (МЕ) буде мати поляризацію більшості вхідних клірок. Булевий вираз для мажоритарної функції має вигляд:

$$maj(x_2, x_1, x_0) = x_2x_1 \vee x_2x_0 \vee x_1x_0$$

Синхронізація відіграє важливу роль в керуванні роботою квантово-кліркової логіки. Такий контроль реалізується в результаті приєднання клірок до тактових зон таким чином, що вони замикаються в послідовність для бажаного напрямку передачі сигналу.

На рис. 3 наведені схеми універсальних мажоритарних елементів (УМЕ) з різними вихідними інверторами. Схеми показані на вхідному планшеті систем автоматизованого проектування QCADesiner [3].

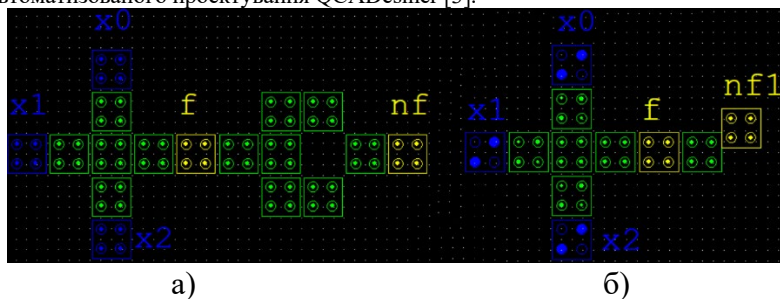
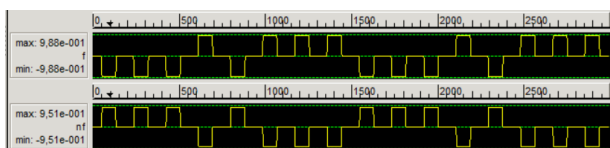


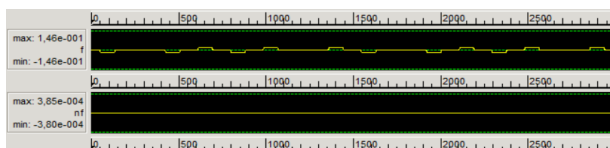
Рис. 3. Наносхеми УМЕ з завадостійким інвертором (а) і з спрощеним інвертором (б)

Поточна версія QCADesigner включає три різні механізми моделювання. Перший - це цифровий логічний симулятор, який вважає КА або нульовими, або повністю поляризованими. Другий — це механізм нелінійної апроксимації, який використовує функцію нелінійної реакції від КА до КА для ітераційного визначення стабільного стану КА у межах проекту. Третій використовує гамільтоніан з двома станами для формування наближення повної квантовомеханічної моделі всієї системи.

Результати моделювання впливу наднизьких температур на працездатність мажоритарних наносхем. В результаті співставного комп'ютерного моделювання отримані осцилограми працездатності на рис. 4 і рис. 5 УМЕ з різними вихідними інверторами.



a)



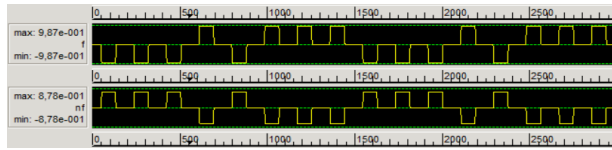
б)

Рис. 4. Осцилограми досліджуваної наносхеми УМЕ з завадостійким інвертором при 0K (a) і 40K (б)

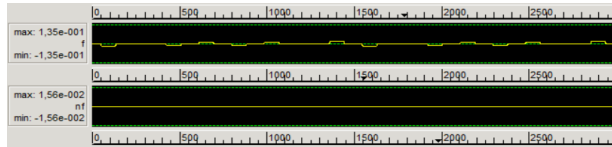
Таблиця 1.

Кріотемпературна залежність логічних сигналів на виходах УМЕ з завадостійким інвертором

T, K	f, мкВ	nf, мкВ
0	3.6346	3.4985
10	2.8249	2.5527
15	2.4395	1.7848
16	2.3598	1.6028
17	2.2773	1.4068
40	0.1975	0.02593



а)



б)

Рис. 5. Осцилограми досліджуваної наносхеми УМЕ з спрощеним інвертором при 0К (а) і 40К (б)

Таблиця 2.

Кріотемпературна залежність логічних сигналів на виходах УМЕ з спрощеним інвертором

T, K	f, мкВ	nf, мкВ
0	3.6309	3.2299
5	3.2039	2.7917
10	2.8220	2.03704
11	2.7465	1.8803
12	2.6707	1.7305
13	2.5914	1.5894
14	2.5117	1.4515
15	2.4294	1.3221
30	0.8305	0.1772
40	0.1826	0.07765

Висновки.

Натепер працездатність одноелектронних наносхем неможлива в умовах нормальних земних температур (300К). Працездатність суттєво залежать при наднизьких температурах від кількості КА. Для спрощеного УМЕ на 11 КА амплітуди логічних сигналів зменшуються в 20 раз для прямого виходу f при зростанні температури від 0К до 40 К і 50 раз для інверсного виходу nf. В той же час для складного УМЕ на 17 КА відповідні зменшення складають 18 і 14 раз. Таким чином, завадостійкий УМЕ має вищу працездатність, особливо по інверсному виходу.

На сучасному етапі наноелектроніки основне застосування одноелектронних наносхем можливе виключно в космічних умовах при $T \approx 0\text{K}$.

Робляться спроби створення нанопристроїв для криогенних температур в земних умовах.

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. Мельник О.С. Автоматизоване моделювання наносхем на квантових коміркових автоматах / О.С. Мельник, В.В. Івахнюк // Електроніки та систем управління. – 2010, - №2, – с. 81-84.
3. Walus, K. QCADesiner: A CAD Tool for an Emerging Nano-Technology / Walus, K. // Micronet Annual Workshop – 2003.
4. <https://www.arxiv-vanity.com/papers/1904.13318/>