

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

Термоенергетична надійність наносхем космічного застосування

В роботі наведені результати запровадження новітніх технологій комп'ютерного моделювання термоенергетичних характеристик одноелектронних наносхем з квантовими автоматами при криогенних температурах для прогнозування їх безвідмовної роботи в космічних умовах. В системі автоматизованого проектування QCADesignerE синтезовані арифметично-логічні мажоритарні схеми наносуматора-віднімача та реалізовані адекватне моделювання часових діаграм, які підтвердили їх продуктивність.

Новітня технологія коміркового автомата (КА або QCA – quantum-dot cellular automata) є найперспективнішим напрямком наноелектроніки [1], який, до того, підтверджує справедливості з-на Мура [2]. На відміну від традиційних мікроелектронних технологій, наприклад, на базі комплементарних МОН-транзисторів, в КА бінарна інформація передається у вигляді геометричного розташування елементів, а не через логічні рівні напруг і струмів.

Квантові точки або кулонівські острівці повинні бути ізольованими напівпровідниками, тобто не містити вільних електронів провідності. У разі використання металевих точок або острівців, сигнал у ланцюгу КА згасає вже до четвертої комірки. Логічний стан комірки (0 або 1) визначається розподілом електронів у вузлових точках або острівцях. Квантові точки створюються за допомогою електронної літографії.

На рис. 1 зображена комірка розміром 50х50 нм з чотирма квантовими точками, розташованими досить близько одна до одної. Електрони можуть здійснювати тунельні переходи між цими точками по чотирьох позиціях при подачі вхідної (керуючої) напруги $U_{\text{вх}}$ та/або під впливом електричних полів навколишніх комірок.

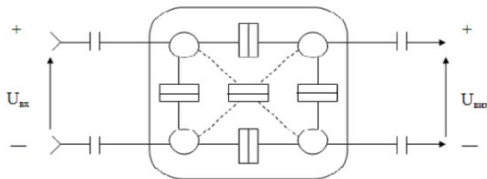


Рис. 1. Комірка квантового автомату

Важливим показником в цифровій мікроелектроніці вважається добуток потужності на затримку (час) виконання операцій логічними елементами. Графіки таких залежностей для різних сучасних мікротехнологій та порівняльне місце КА серед них наведені на рис. 2. Вочевидь, цей параметр для наноелектронних КА розташовується на шість-сім порядків нижче, ніж у будь-якої іншої мікроелектронної технології [3].

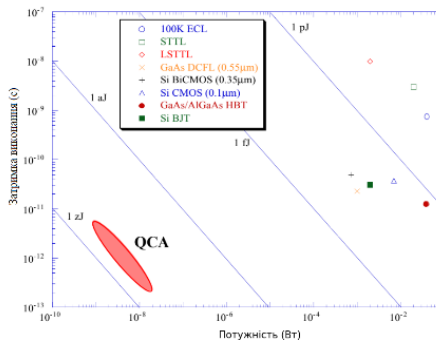


Рис. 2. Добуток потужності та затримки

З огляду на ці вражаючі результати, подальші дослідження технології та архітектури КА безумовно є обґрунтованими.

Переваги ККА:

1. Паралельність обчислень: Квантові КА можуть обробляти дані паралельно, що дозволяє значно збільшити продуктивність.
2. Шифрування: Квантові ефекти можуть бути використані для створення безпечних криптографічних систем.
3. Обробка великих обсягів даних: Здатність ККА до обробки великих обсягів даних дозволяє застосовувати їх в складних обчислювальних завданнях.

Недоліки ККА:

1. Технічні виклики: Реалізація квантових ефектів в автоматах потребує високоенергетичних і складних систем.
2. Стабільність квантових станів: Забезпечення стабільності квантових станів в умовах зовнішніх впливів та високих температур - завдання складне та потребує досліджень.
3. Квантові помилки: Квантові системи піддаються помилкам через феномен квантового розсіювання та інші квантові ефекти.

На рис. 3 зображена схема суматора-віднімача однорозрядних чисел x_1, x_2 та переносу з молодшого розряду x_3 з мажоритарною логікою функціонування у складі трьох універсальних мажоритарних елементів [4].

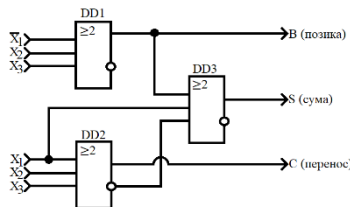


Рис. 3. Наносхема однорозрядного суматора-віднімавача з мажоритарною логікою

Мажоритарні та булеві функції схеми однорозрядного суматора-віднімача:

$$B = maj(\bar{x}_1, x_2, x_3) = \bar{x}_1 x_2 \vee \bar{x}_1 x_3 \vee x_2 x_3,$$

$$C = maj(x_1, x_2, x_3) = x_1 x_2 \vee x_1 x_3 \vee x_2 x_3,$$

$$S = maj(B, x_1, \bar{C}) = B x_1 \vee B \bar{C} \vee x_1 \bar{C}.$$

Таблиця 1.

Таблиця істинності для однорозрядного суматора-віднімача

x_1	x_2	x_3	B	C	S
0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	0	1
0	1	0	1	0	1
0	1	1	1	1	0
1	0	0	0	0	1
1	0	1	0	1	0
1	1	0	0	1	0
1	1	1	1	1	1

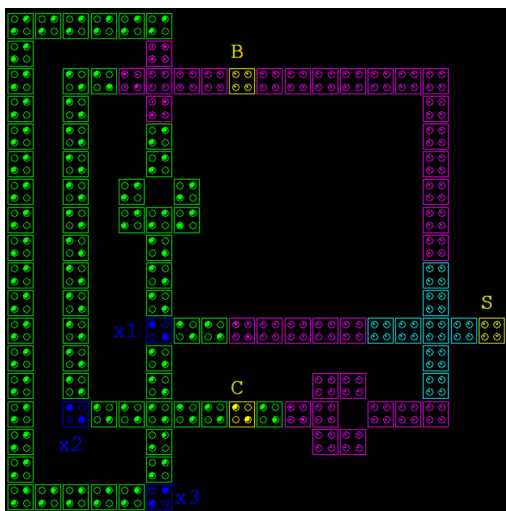


Рис. 4. Модель наносхеми однорозрядного суматора-віднімача на планшеті САПР QCADesignerE [5].

Загальна кількість КА в наносхемі складає: 107, розміри КА: (18x18) нм, відстань між центральними КА: 20 нм. Діаметр квантових острівців дорівнює 5 нм. Загальні розміри наносхеми (340x358) нм.

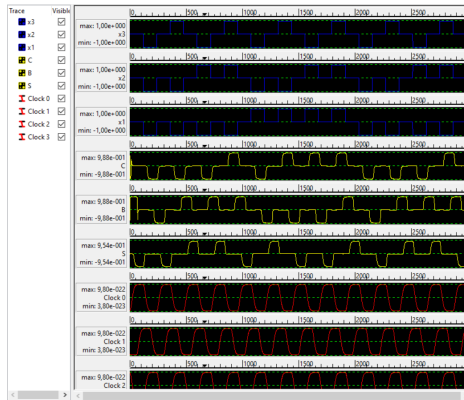


Рис. 5. Результати моделювання часових діаграм наносхеми однорозрядного суматора-віднімача при температурі 0 К

Повне розсіювання енергії (Sum_Ebath):

$5.15e^{-002} \text{ eV}$ (Error: $\pm 4.76e^{-003} \text{ eV}$).

Середнє розсіювання енергії за цикл (Avg_Ebath):

$4.68e^{-003} \text{ eV}$ (Error: $\pm 4.33e^{-004} \text{ eV}$).

Таким чином, моделювання осцилограм наносхеми підтверджують її працездатність в космічних умовах згідно таблиці 1.

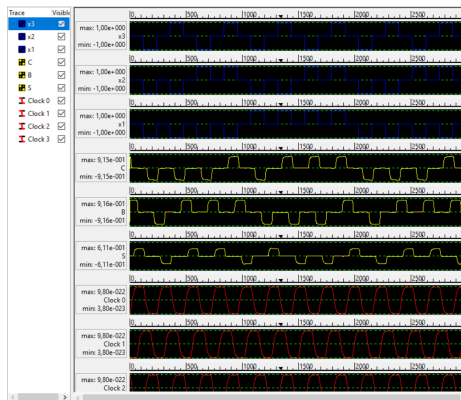


Рис. 6. Моделювання часових діаграм наносхеми при температурі 10 К

Повне розсіювання енергії (Sum_Ebath) :

$4.19e^{-002} \text{ eV}$ (Error: $\pm 3.64e^{-003} \text{ eV}$).

Середнє розсіювання енергії за цикл (Avg_Ebath):

$3.81e^{-003} \text{ eV}$ (Error: $\pm 3.31e^{-004} \text{ eV}$).

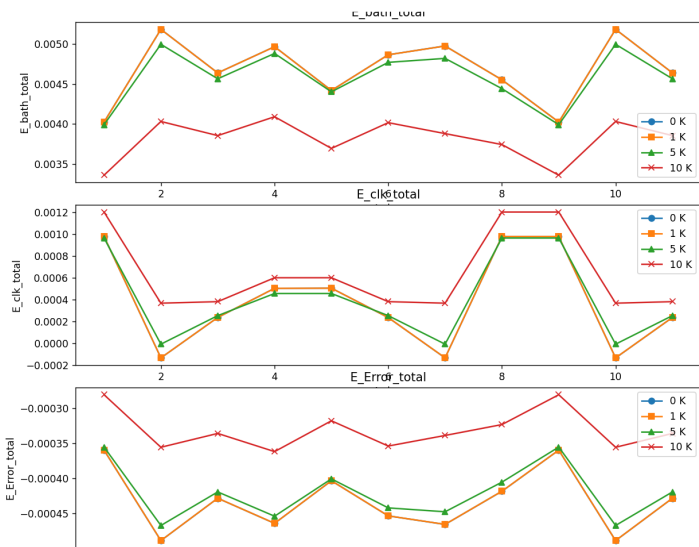


Рис. 7. Порівняння розподілу енергії наносхеми однорозрядного суматора-вчитувача по комірках при температурному впливі 0-10 К

Висновок. Отже підвищення температури від 0 до 10 К суттєво знижує працездатність наносхеми. Подальше підвищення температури до 25 К спричиняє відмову і можливу деструкцію її нанокомпонентів.

Список літератури

1. C. S. Lent, L. Mo, and L. Yuhui, "Bennett clocking of quantum-dot cellular automata and the limits to binary logic scaling," *Nanotechnology*, vol. 17, p. 4240, 2006.
2. J. Timler and C. S. Lent, "Maxwell's demon and quantum-dot cellular automata," *Journal of Applied Physics*, vol. 94, pp. 1050-1060, 2003.
3. J. Timler and C. S. Lent, "Power gain and dissipation in quantum-dot cellular automata," *Journal of Applied Physics*, vol. 91, pp. 823-831, Jan 15 2002.
4. Пакулов, Н. І., Мажоритарний принцип побудови надійних вузлів та пристроїв ЦВМ, с.87.
5. F. Sill Torres, R. Wille, P. Niemann, and R. Drechsler, "An energy-aware model for the logic synthesis of quantum-dot cellular automata," *IEEE Trans. on CAD of Integrated Circuits and Systems*, accepted, to be published in 2018.