

УДК 681.3

Доц. О.А. Пастух, д-р техн. наук;
доц. В.В. Яцишин, канд. техн. наук; ст. викл. В.В. Лесів –
Тернопільський НТУ ім. І. Пулюя

МАТЕМАТИЧНИЙ ФОРМАЛІЗМ ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ КВАНТОВИХ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ПЕРЕТВОРЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ

Формально математично обчислені оцінки витрат часу та енергії на виконання базових квантових логічних елементів, які діють на регістр квантових бітів в основі яких розглянуто напівпровідникову елементну базу за Бруком Кейном. Послідовності таких квантових логічних елементів утворюють логічне програмне забезпечення сучасних квантових радіотехнічних систем перетворення інформації. Показано, що квантові радіотехнічні системи є ефективніші порівняно з навіть найсучаснішими класичними суперкомп'ютерними системами. Доведено, що найбільш перспективною для квантових бітів є твердотільна напівпровідникова елементна база.

Ключові слова: квантова радіотехнічна система, напівпровідникова елементна база, квантовий логічний елемент.

Вступ. Серед сучасних радіотехнічних систем перетворення інформації є квантові радіотехнічні системи перетворення інформації. Такі квантові радіотехнічні системи перетворення інформації використовують квантову елементну базу і на основі неї реалізуються квантові логічні елементи. Послідовність квантових логічних елементів представляє собою логічну програму, за якою працюють квантові радіотехнічні системи перетворення інформації. Серед великого різноманіття перспективних квантових елементних баз, які потенційні для майбутнього використання, є твердотільна напівпровідникова елементна база. Успішне використання такої елементної бази у квантових радіотехнічних системах перетворення інформації можливе за умови детального розгляду та аналізу математичного формалізму, який лежить в основі проектування таких систем та оцінювання витрат ними часових і енергетичних ресурсів. Тому у дослідженні сформульовано таке завдання.

Постановка завдання. Розглянути та проаналізувати математичний формалізм елементної бази квантових радіотехнічних систем перетворення інформації.

Основна частина. Розглянемо послідовно формальні деталі твердотільної напівпровідникової елементної бази квантових радіотехнічних систем перетворення інформації, яка лежить у фізичній основі квантових бітів (кубітів). Важливість цього полягає у тому, що саме на них реалізуються квантові логічні елементи.

Твердотільна напівпровідникова елементна база та реалізація на ній квантових логічних елементів

Виходячи з технологічної точки зору, твердотільна напівпровідникова елементна база на ядерних спінах є найбільш пріоритетною, оскільки більшість наявних виробництв, що виготовляють мікро- та наноелектронні пристрої, спрямовані на роботу з напівпровідниками. Крім цього, така елементна база використовує добре напрацьовані методи фізики твердого тіла та методи ЯМР. З цих причин за основу вибрано твердотільну напівпровідникову елементну базу з методикою ЯМР для обчислення оцінок витрат часу, енергії на перетворення нечіткої інформації.

Уперше напівпровідникову елементну базу на ядерних спінах запропонував у 1998 р. австралійським ученим Б. Кейном у [1]. Її узагальнення на багатокубітний випадок зроблено акад. РАН К.А. Валієв та проф. А.А. Кокін [2]. Інтенсивно наукові дослідження щодо побудови повномасштабного ансамблевого квантового регістра та квантових комірок пам'яті на напівпровідниках з методикою ЯМР здійснив також наукові співробітники Фізико-технологічного інституту РАН та вчені світу.

Для обчислення оцінок витрат часу, пам'яті та енергії на виконання розроблених квантових методів обчислення розглянемо детальніше суть пропозиції Б. Кейна [1]. Б. Кейн запропонував одержати матрицю з ізотопу ^{28}Si , оскільки лише він має ядро з нульовим значенням спіну (у всіх інших ізотопів кремнію та інших напівпровідників спіни ядер відмінні від нуля), що дає змогу ізолювати кубіт від довільних ступенів свободи, які призводять до декогеренції. Важливим моментом також є те, що для кремнію найбільш розвинена технологія одержання матеріалу, набуто великого досвіду створення нанооб'єктів.

Як донор зі спіном ядра $s=1/2$ для кремнієвої матриці з ізотопів ^{28}Si можна використовувати ^{31}P . Слушно зазначити, що систему $^{28}\text{Si} : ^{31}\text{P}$ було вивчено ще 40 років тому в експериментах з електронно-ядерного подвійного резонансу. За мілікельвінових температур ($\approx 0,1\text{ K}$) час релаксації ^{31}P обмежений фононами і становить $\approx 10^{18}$ секунд. Кремнієву пластину за такої температури поміщають у постійне магнітне поле з індукцією $B_0 \geq 2\text{ Тл}$ (рис. 1). За таких умов електрони повністю спін-поляризовані ($e \uparrow / e \downarrow < 10^{-6}$), а ядерні спіни упорядковуються завдяки взаємодії з електронами [3].

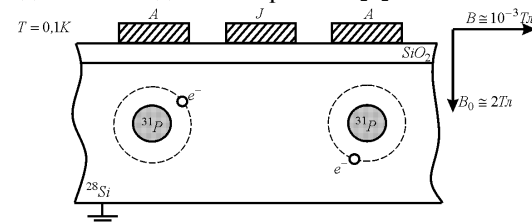


Рис. 1. Схематичне зображення (без дотримання масштабу) фрагменту одновимірного квантового регістру: діаметр затворів порядку 10 нм, відстань від затвора до підкладки порядку 40 нм

Як видно з рис. 1, два кубіти в одновимірному квантовому регістрі, який містить два ^{31}P донори із зв'язаними електронами, імплантуються у матрицю кремнієвого ізотопу ^{28}Si . Вони відділені від металевих затворів поверхневим оксидним шаром SiO_2 . Затвори А задають резонансну частоту ядерно-спінового кубіта. Затвор J керує взаємодією між електронами сусідніх ядерних спінів. Подаючи на різні А-затвори напругу різної величини і полярності, можна селективно задавати резонансну частоту для кожного окремо взятого кубіта. Електричне поле, яке прикладене до системи, змінює хвильову функцію електрона від ядра і зменшує надтонку взаємодію між спінами електрона та ядра фіксованого донора ^{31}P , що призводить до зміни значення резонансної частоти

(рис. 2, який навів Б. Кейн у своїй роботі [1]). Глибина імплантації донора ^{31}P у матрицю ізотопу ^{28}Si становить 20 нм, враховуючи фактор Штарківського розщеплення. Таким чином, селективно (шляхом дії зовнішнього електромагнітного випромінювання з магнітною індукцією складового магнітного поля \vec{B} , вектор якої ортогональний до вектора магнітної індукції \vec{B}_0 зовнішнього постійного магнітного поля і частота якого дорівнює резонансній частоті перевертання спіну) можна здійснювати довільні обертання кожного ядерного спіну і цим самим фізично реалізовувати однокубітні квантові логічні елементи (операції) [1].

Реалізація двокубітних квантових логічних елементів здійснюється на основі взаємодії між ядерними спінами сусідніх атомів. Така взаємодія виникає опосередковано внаслідок електронної спінової взаємодії двох сусідніх донорів (кубітів), які розташовані достатньо близько один від одного, і хвильові функції електронів перекриваються. Величина перекриття електронних хмар (відповідно обмінної частоти) пропорційна різниці потенціалів між затворами J та підкладкою (рис. 3, який навів Б. Кейн у роботі [1]). Для реалізації двокубітних логічних елементів значення обмінної частоти має дорівнювати значенню, яке можна визначити з графіка, що наведений на рис. 3, відповідно при відстані між донорами $200\text{Å} = 20\text{ нм}$.

Детектування спінового стану електрона може здійснюватися таким чином. Обидва електрони можуть бути зв'язаними на одному і тому ж донорі (D -стан), оскільки завжди існує різниця потенціалів між сусідніми затворами A . Таким чином, напруга прикладена до A -затворів, може викликати переміщення заряду між донорами, що можливо, коли електрони перебувають у синглетному стані. Якщо електрони перебувають у різних станах, то під затвором може з'явитися два електрони і заряд буде рівним $2e^-$. В іншому випадку існує одиничний заряд електрона e^- . Переміщення заряду може бути виміряно засобами одноелектронних ємнісних давачів.

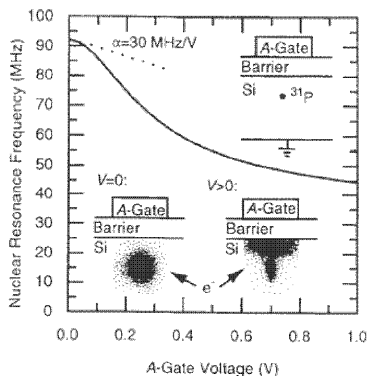


Рис. 2. Залежність резонансної частоти від різниці потенціалів між затвором A та підкладкою [1]

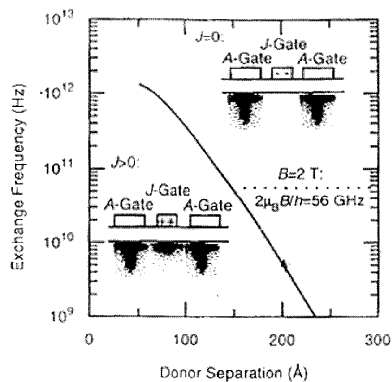


Рис. 3. Залежність обмінної частоти від відстані між сусідніми донорами, коли напруга на затворі $J = 0$ [1]

Повну інформацію стосовно напівпровідникової елементної бази, яку запропонував Б. Кейн, подана у його роботі [1].

Виходячи з наведеного вище, можна обчислити оцінки витрат часу та енергії для реалізації одно- і двокубітних квантових логічних елементів на основі твердотільної напівпровідникової елементної бази на ядерних спінах, запропонованої Б. Кейном [1].

Оцінювання витрат часу та енергії для реалізації одно- та двокубітних квантових логічних елементів на твердотільній напівпровідниковій елементній базі Б. Кейна

З даних, наведених Б. Кейном (рис. 2) у його роботі [1], випливає, що середнє значення оцінки витрат часу на реалізацію однокубітного квантового логічного елемента становить $\tau_1 \approx 10^{-8}$ с. Оцінка витрат енергії E_1 складається з суми $\tilde{E}_1 + \tilde{\tilde{E}}_1$. Тут \tilde{E}_1 – оцінка енергії конденсатора (обкладками якого є затвор A та підкладка), що витрачається на відтягування електронної хмари (для фіксування заданого номіналу резонансної частоти кубіта), $\tilde{\tilde{E}}_1$ – енергія електромагнітного імпульсу, який повертає спіни. Таким чином

$$E_1 = \tilde{E}_1 + \tilde{\tilde{E}}_1 = \frac{c \cdot u^2}{2} + h\nu_1 = \frac{\epsilon_{Si} \cdot \epsilon_0 \cdot S \cdot u^2}{2d} + h\nu_1,$$

де: $\epsilon_{Si} = 11,68$ – діелектрична проникність матриці ізотопу ^{28}Si ; $\epsilon_0 = 8,8 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$; $S = 8 \cdot 10^{-17} \text{ м}^2$ – площа затвора A ; $u = 0,5 \text{ В}$ – різниця потенціалів між затвором A та підкладкою; $d = 4 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ – товщина матриці ізотопу ^{28}Si ; $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ – стала Планка; $\nu_1 = 7 \cdot 10^7 \text{ Гц}$ – резонансна частота кубіта, а відповідно й електромагнітного імпульсу.

$$\text{Отже, } E_1 \approx \frac{11,68 \cdot 8,8 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}} \cdot 8 \cdot 10^{-17} \text{ м}^2 \cdot (0,5 \text{ В})^2}{2 \cdot 4 \cdot 10^{-8} \text{ м}} + 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 7 \cdot 10^7 \text{ Гц} \approx 0,3 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 0,2 \text{ eV}.$$

Витрати часу на реалізацію затвором J двокубітного квантового логічного елемента у квантовій мережі порівняно з витратами часу на реалізацію однокубітного квантового логічного елемента можна знехтувати, оскільки значення його оцінки визначається часом зарядки конденсатора $\tau_2 = RC$, обкладками якого є затвор J та підкладка. Легко бачити, що порядок величини τ_2 складає 10^{-21} с , тобто $\tau_1 \gg \tau_2$. Таким чином, для розрахунку витрат часу на реалізацію конкретної квантово-логічної програми слід враховувати витрати часу на реалізацію наявних у ній однокубітних квантових логічних елементів, а витратами часу на реалізацію двокубітних квантових логічних елементів можна знехтувати.

Оцінка витрат енергії E_2 на реалізацію двокубітного квантового логічного елемента повинна дорівнювати обмінній енергії електронів, хмари яких перетинаються при поданні позитивного потенціалу на затвор J . Оскільки, як

засначалося, обмінна частота повинна дорівнювати значенню, яке відповідає відстані 200 \AA на рис. 4.3, то її значення наближено становить $10^{10} \text{ Гц} = 10 \text{ ТГц}$. Таким чином,

$$E_2 \approx h\nu_2 = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 10^{10} \text{ Гц} = 6,6 \cdot 10^{-24} \text{ Дж} \approx 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ eВ}.$$

Як видно $E_1 \gg E_2$, тому з високою точністю в розрахунках витрат енергії на реалізацію конкретної квантово-логічної програми слід враховувати витрати енергії на реалізацію наявних у ній однокубітних квантових логічних елементів, а витратами енергії на реалізацію двокубітних квантових логічних елементів можна знехтувати.

Висновки. Формально математично обчислені оцінки витрат часу та енергії на виконання базових квантових логічних елементів, які діють на регістр квантових бітів, в основі яких розглядають напівпровідникову елементну базу за Б. Кейном. Послідовності таких квантових логічних елементів утворюють логічне програмне забезпечення сучасних квантових радіотехнічних систем перетворення інформації.

Література

1. Kane B. A silicon-based nuclear spin quantum computer / B. Kane // Nature. – 1998. – Vol. 393. – № 6681. – Pp. 133-137.
2. Валиев К.А. Квантовые компьютеры: надежды и реальность / К.А. Валиев, А.А. Кокин. – Ижевск: Изд-во РХД, 2001. – 352 с.

Пастух О.А., Яцишин В.В., Лесив В.В. Математический формализм элементной базы квантовых радиотехнических систем преобразования информации

Формально математически вычислены оценки расходов времени и энергии на выполнение базовых квантовых логических элементов, которые действуют на регистр квантовых битов, в основе которых рассмотрена полупроводниковая элементная база по Бруку Кейну. Последовательности таких квантовых логических элементов образуют логическое программное обеспечение современных квантовых радиотехнических систем превращения информации. Показано, что квантовые радиотехнические системы более эффективны, в сравнении с даже самыми современными классическими суперкомпьютерными системами. Доказано, что наиболее перспективной для квантовых битов является твердотельная полупроводниковая элементная база.

Ключевые слова: квантовая радиотехническая система, полупроводниковая элементная база, квантовый логический элемент.

Pastukh O.A., Vyatcshyn V.V., Lesiv V.V. Mathematical Formalism of Component Basis of Quantum Radio-Engineering Systems of Information Transformation

Time estimation and energy costs for basic quantum logic components accomplishment acting on quantum bit register are formally mathematically calculated. Kane's Semiconductor component basis is considered on the basis of quantum bit register. The sequences of such quantum logical elements form logic software of modern quantum radio-engineering systems of information transformation.

Keywords: quantum radio engineering system, semiconductor element base, quantum gate.

УДК 004.3

Викл. М.М. Мандрона; курсант Р.В. Сало – Львівський ДУ безпеки життєдіяльності

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЗАКЛАДНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ НЕСАНКЦІОНОВАНОГО ОТРИМАННЯ АКУСТИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Розглянуто один із способів несанкціонованого отримання акустичної інформації, який базується на використанні закладних пристроїв. Сконструйовано два пристрої, досліджено принцип їх роботи і проведено експериментальні випробування щодо визначення основних технічних характеристик. На основі отриманих результатів здійснено порівняльний аналіз пристроїв, описано їх переваги і недоліки та визначено краший із них. Виготовлені пристрої застосовано в навчальному процесі ЛДУ БЖД під час проведення лабораторних занять, де в режимі реального часу продемонстровано процес витоку акустичної інформації, що дає змогу краще освоїти методи виявлення і захисту від закладних пристроїв.

Ключові слова: закладний пристрій, радіозакладка, прослуховування приміщення, технічні характеристики, порівняльний аналіз.

Вступ. Сьогодні акустичний канал витоку інформації вважають найпоширенішим, тому що в будь-якій ситуації, чи то під час проведення нарад, переговорів, чи то інших подій, люди природнім способом, а саме вголос, висловлюють свої думки, ідеї чи просто важливу інформацію. Разом із цим, завжди існувало поняття конкурент чи опонент, тобто ті особи, яким знання цієї інформації може принести користь. Одним із способів підслуховування розмов – є встановлення у приміщенні, де буде відбуватись розмова, закладних пристроїв (ЗП). Це мініатюрні електронні пристрої, призначені для перехоплення акустичної інформації. Зазвичай вони складаються з мікрофону і радіопередавача, що забезпечує передавання звукового сигналу, який підслуховується, на значну відстань за допомогою електромагнітних хвиль [1].

На сьогодні таких пристроїв, або як у народі їх називають "жучків", є дуже багато. Кожен із них відрізняється розмірами і технічними характеристиками, але всі вони виконують своє призначення – дають змогу прослуховувати розмову у приміщенні, фізично не перебуваючи у ньому.

Зазвичай закладні пристрої розміщують у віконних рамах, електричних розетках, дверних ручках, вмонтовують у предмет інтер'єру, настільну лампу, стіни приміщення та ін.

Постановка проблеми. Проблема прослуховування для України та інших країн світу не нова, тому важливо знати різні методи і способи захисту акустичної інформації від витоку. Для того, щоб ефективно захистити інформацію, треба чітко знати, якими пристроями зловмисники можуть це здійснити, і по яких каналах витоку інформації.

Мета роботи сконструювати декілька закладних пристроїв для дослідження їх принципу роботи, визначити технічні характеристики і здійснити порівняльний аналіз.

Виклад основного матеріалу. Згідно з визначення НД ТЗІ 2.7-011-2012, закладний пристрій – потай встановлений технічний засіб, який створює загрозу для інформації [2]. Залежно від виду інформації, що перехоплюється, закладні пристрої поділяються на акустичні, телефонні, апаратні та закладні відеосистеми.