

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ШВИДКОДІЇ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ “ІЗМІР” НА ШВИДКІСНИХ ВІС/НВІС

С. П. Новосядлий, А. І. Терлецький, О. Б. Фрик

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника;
76000, м. Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57;
тел. +380(342)59-60-07, e-mail: andrii.terletskyi@pu.if.ua*

Розглянуто можливості підвищення швидкодії як ВІС/НВІС, так і комп'ютерних вимірювальних систем шляхом зниження робочої температури до криогенного рівня для випадків використання високо- або надпровідного розведення. Показано, що за криогенних температур швидкодія системи залежить як від параметрів ліній зв'язку, так і активних елементів структур ВІС/НВІС, що зумовлено зростанням рухливості носіїв заряду. Також продемонстровано, що використання надпровідного розведення дає вигоди тільки у разі значного поліпшення параметрів швидкісних ПТШ-транзисторів як активних елементів ВІС (пам'яті, мікропроцесорів, мікроконтролерів тощо).

***Ключові слова:** великі інтегральні схеми, вимірювальна система, надпровідникові з'єднання, польові транзистори, швидкодія систем.*

Постановка проблеми. Швидкодія сучасних вимірювальних комп'ютерних систем, а також ВІС/НВІС все більшою мірою визначається часом затримки сигналу в міжз'єднаннях (лініях передавання), які займають до 65-75% площі структури. З підвищенням ступеня інтеграції та зменшенням розмірів міжз'єднань у структурах ВІС/НВІС стала часу шини залишається незмінною, однак надійність таких структур різко знижується внаслідок процесів електроміграції в шинах і контактах.

Підвищити швидкодію можна у разі зниження робочих температур аж до криогенних, наприклад, до температури кипіння рідкого азоту (77 К). При цьому зменшується опір металевого (поліцидного) розведення та зростає надійність завдяки зниженню інтенсивності теплових електроміграційних процесів, особливо в структурах на основі GaAs, теплопровідність якого в 2-3 рази менша, ніж Si.

Ще цікавішим є використання високотемпературного надпровідного (ВТНП) розведення як для друкованих плат, так і для кристалів ВІС/НВІС. У цьому випадку граничні частоти слід оцінювати з урахуванням не тільки параметрів ліній зв'язку комп'ютерної системи, але й характеристик транзисторів як активних елементів структур ВІС/НВІС, навантажених на лінію. Звісно, для такого використання ВТНП матері-

алів слід ще вирішити цілу низку складних технологічних завдань, однак деякі, поки що теоретичні результати можна отримати вже зараз.

Оцінювання швидкодії обчислювальної (вимірювальної) системи. Розглянемо систему із загальною шиною, до якої під'єднані ряд блоків, такі як пристрій введення-виведення, процесор і пам'ять. Інформація між пам'яттю та іншими блоками передається пакетами, кожен з яких містить дані й адресу блока призначення. Режим розподіленого часу, який використовують для організації процесу обміну, реалізують шляхом мультиплексування. Очевидно, що швидкодія всієї системи визначається пропускнуою здатністю шини та швидкодією мультиплексорних пристроїв.

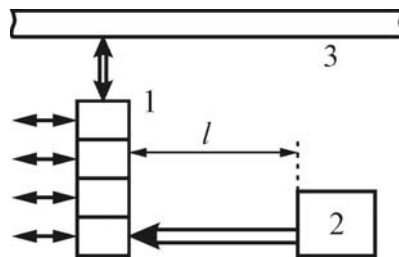


Рис. 1. Схема мультиплексування комірок пам'яті в обчислювальній системі "Ізмір" із загальною шиною: 1) зсувний регістр, 2) пристрій керування, 3) загальна шина

На рис. 1 подана схема мультиплексування комірок пам'яті в обчислювальній (вимірювальній) системі "Ізмір", яке здійснюють за допомогою зсувного регістра 1 і схеми керування 2. Регістр має N розрядів і складається з N тригерів, виконаних за М-С схемою (на рисунку показано 4 розряди). В свою чергу кожен тригер складається з 8-10 логічних елементів, а його сумарний час затримки в чотири рази більший ніж час затримки кожного з цих логічних елементів (з урахуванням внутрішнього розведення ІС). Інформація на шину 3 подається синхронно зі зсувними імпульсами схеми керування 2. Регістр і схема керування розміщені на одному кристалі $0,6 \times 0,6 \text{ см}^2$. Вважатимемо, що довільне з'єднання всередині регістра не перевищує декількох ширин транзистора ПТШ, а максимальна довжина з'єднання між регістром і схемою керування рівна стороні кристала l .

Електричні з'єднання між елементами на кристалі ВІС/НВІС і між самими кристалами виконані за допомогою алюмінієвого сплаву АКГо-1-1 або надпровідника товщиною 0,5 мкм (рис. 2, а). При цьому найвища щільність струму для алюмінієвого розведення рівна $2 \cdot 10^5 \div 5 \cdot 10^5 \text{ А/см}^2$, а для надпровідної металізації – $5 \cdot 10^6 \text{ А/см}^2$. Питомий опір сплаву АКГо-1-1 становить $3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ та $0,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ за температур 300 К і 77 К відповідно. Ширина ПТШ-транзистора w повинна становити не менше 20 мкм, оскільки у випадку її зменшення

починає впливати бічна паразитна ємність транзистора. Максимальний струм (в мА), який протікає через транзистор шириною w , рівний $0,1 \cdot w$ (в мкм). Середня довжина з'єднання в тригері – $2 \cdot w$, а між регістром і схемою керування – $l=0,6$ см.

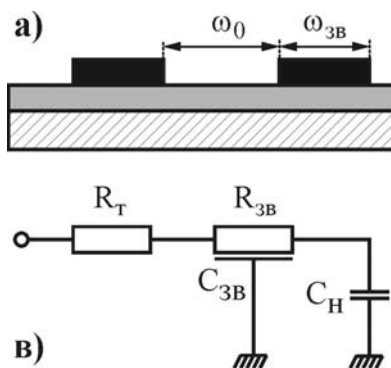


Рис. 2. Поперечний переріз смужкової лінії зв'язку (а), яку використовують для міжз'єднання у ВІС/НВІС і між ними, та її еквівалентна електрична схема (б).

В якості діелектрика використовують SiO_2 (ФСС чи БФСС) товщиною 0,5 мкм. Вважаючи металеве розведення достатньо щільним, кожний його сусідній шар можна розглядати як екран, віддалений від іншого шару на 1 мкм (а не 0,5 мкм з урахуванням того, що такий екран не суцільний). За таких конструкторсько-технологічних обмежень (КТО) приведені до відповідних розмірностей формули для ємності лінії зв'язку C_{3B} та її опору R_{3B} записуються у такому вигляді:

$$C_{3B} = l \cdot [0,4 \cdot w_{3B} + 1 + \frac{0,02 \cdot w_{3B} + 0,25}{(w_0)^{1,14}}], \quad R_{3B} = 600 \cdot k_T \cdot \frac{l}{w_{3B}},$$

де w_{3B} – ширина металевого провідника, мкм; w_0 – відстань між провідниками, мкм; $k_T = 1$ (300 К) і $k_T = 0,25$ (77 К) для високопровідного з'єднання; C_{3B} в пФ, l – у см.

Параметри ПТШ-транзистора на епішарах GaAs, сформованих на Si-підкладках, такі як опір відкритого транзистора R_T (Ом), його вхідна ємність C_T (пФ) і стала часу вмикання транзистора τ_T (пс) оцінюють за такими формулами:

$$R_T = 10^3 (2\rho_K + L \frac{\mu_0}{\mu_i}) / w; \quad C_T = 10^{-3} L w; \quad \tau_T = 10^{-3} w \cdot \rho_3 + L (\rho_K + L \frac{\mu_0}{\mu_i}) + 2L \cdot$$

Тут $i = 0,1$; ρ_K – питомий опір витоку (стоку), Ом·мм; L – довжина затвора, у мкм; μ_0, μ_i – рухливості електронів за температур 300 і 77 К відповідно; w у мкм; ρ_3 – поверхневий опір металізації затвора, Ом/мкм. На рис. 2, б подана еквівалентна електрична схема лінії зв'язку.

Затримка, зумовлена лінією зв'язку, визначається як

$$\tau_{3B} = R_{3B} \cdot C_{3B} + 2,3(R_T \cdot C_{3B} + R_T \cdot C_H + R_{3B} \cdot C_H), \quad C_H = 3 \cdot C_T,$$

де C_n – ємність навантаження. Для розрахунку часу затримки між схемою керування та регістром будемо вважати, що $R_m = 0$, тобто вихід схеми керування достатньо низькоомний.

Час, подання інформації на шину складається з двох складових: часу затримки τ_l у лінії зв'язку довжиною $l=0,6\div 1,0$ см від схеми керування до регістра та часу спрацьовування тригера τ_2 , рівного чотирьом значенням часу затримки, кожен з яких складається із часу вмикання транзистора τ_m і затримки τ_3 . Остання зумовлена передаванням сигналу через шину довжиною $2w$. Максимальна частота f_{\max} подання інформації з кристала ВІС на загальну шину визначається як $f_{\max} = 1/[3 \cdot (\tau_1 + \tau_2)]$.

Здійсимо розрахунок f_{\max} за $T = 300$ К для випадку алюмінієвого розведення. За умови максимальної щільності струму, що становить $2 \cdot 10^3$ А/см² та ширині транзистора w вважатимемо ширину міжз'єднань $w_{зв} = 0,1 \cdot w$. За температури $T = 300$ К відношення $\mu_0/\mu_i = 1$, а $\rho_3 = 0,3$ Ом/мкм, тому для $w_p = w_{зв}$ отримуємо $C_{зв} = l \cdot (0,04 \cdot w + 1)$, $R_{зв} = 6 \cdot 10^3 \cdot l/w$, $R_m = 10^3 \cdot (2\rho_k + L)/w$, $C_n = 3 \cdot C_{cm} = 3 \cdot 10^{-3} \cdot Lw$, $\tau_m = 3 \cdot 10^{-4} \cdot w^2 + L \cdot (2\rho_k + L)$, $\tau_1 = \tau_{зв}$ при $L = 1$ см, $\tau_2 = 4(\tau_m + \tau_{зв})$ при $l = 2 \cdot 10^{-4} \cdot w$. Результати розрахунку τ_1 , τ_2 та f_{\max} для різних значень ширини транзистора w , ρ_k , і l за температури $T = 300$ К подано в табл. 1.

Таблиця 1. Результати обчислення граничної частоти подання інформації для випадку алюмінієвого розведення (300 К)

| № п/п | Параметри | $L = 1,5$ мкм, $\rho_k = 2$ Ом·мм | | | $L = 1,0$ мкм, $\rho_k = 1$ Ом·мм | | | $L = 0,5$ мкм, $\rho_k = 0,5$ Ом·мм | | |
|-------|------------------|--------------------------------------|------|------|--------------------------------------|-----|------|--|------|-----|
| | | w , мкм | | | | | | | | |
| | | 20 | 50 | 100 | 20 | 50 | 100 | 20 | 50 | 100 |
| 1 | τ_1 , пс | 600 | 420 | 360 | 600 | 420 | 360 | 600 | 420 | 360 |
| 2 | τ_2 , пс | 257 | 273 | 304 | 120 | 122 | 142 | 32 | 39 | 55 |
| 3 | f_{\max} , ГГц | 0,39 | 0,48 | 0,50 | 0,46 | 0,6 | 0,66 | 0,53 | 0,73 | 0,8 |

З табл. 1 видно, що значне покращення характеристик ПТШ мало впливає на загальну швидкодію схеми. Тут основним чинником, що визначає швидкодію, є стала часу лінії зв'язку τ_l .

Оцінимо тепер f_{\max} ($T = 77$ К). За таких температур опір алюмінієвого розведення спадає в 4 рази. В цьому випадку можна зменшити ширину ліній зв'язку, однак це не завжди доцільно, оскільки мінімальна ширина ліній зв'язку визначається не тільки допустимою щільністю струму, але й мінімальними КТО. Тому також будемо вважати, що $w_{зв} = 0,1 \cdot w$. Нехай за температури $T = 77$ К відношення $\mu_0/\mu_i = 0,5$, а $\rho_3 = 0,1$ Ом/мкм, $k_m = 0,25$, тоді $R_{зв} = 1,25 \cdot 10^3 \cdot l/w$, $\tau_m = 10^{-4} \cdot w^2 + L \cdot (\rho_k + 0,5 \cdot L) + 2L$, $R_m = 10^3 \cdot (2\rho_k + 0,5L)/w$. Решту величин визначають як і у випадку $T = 300$ К. Результати розрахунку τ_1 , τ_2 та f_{\max} подано в табл. 2.

Таблиця 2. Результати обчислення граничної частоти подання інформації для випадку алюмінієвого розведення (77 К)

| № п/п | Параметри | $L = 1,5$ мкм, $\rho_k = 2$ Ом·мм | | | $L = 1,0$ мкм, $\rho_k = 1$ Ом·мм | | | $L = 0,5$ мкм, $\rho_k = 0,5$ Ом·мм | | |
|----------|------------------|--------------------------------------|------|------|--------------------------------------|-----|-----|--|----|-----|
| | | w , мкм | | | | | | | | |
| | | 20 | 50 | 100 | 20 | 50 | 100 | 20 | 50 | 100 |
| 1 | τ_1 , пс | 125 | 88 | 69 | 121 | 84 | 65 | 117 | 80 | 61 |
| 2 | τ_2 , пс | 240 | 253 | 274 | 91 | 107 | 111 | 27 | 81 | 39 |
| 3 | f_{\max} , ГГц | 0,91 | 0,98 | 0,87 | 2,6 | 1,8 | 1,9 | 2,3 | 3 | 3,3 |

Аналіз цих результатів моделювання свідчить, що криогенне охолодження дає суттєвий вигравш у швидкодії ПТШ (у 4 рази), якщо довжина затвору зменшується до субмікронного діапазону (0,5 мкм), а опір легованих областей витоку і стоку до 0,5 Ом·мм. В іншому випадку вигравш у швидкодії буде меншим приблизно у двічі.

На завершення обчислимо значення f_{\max} ПТШ для випадку використання надпровідного розведення. Вважаючи $R_m=0$ (для схеми керування), за формулами отримуємо $\tau_{3\phi}=0$, оскільки час затримки здебільшого визначається тривалістю фронту імпульсів, які формуються на приймальному кінці лінії. Узгоджена надпровідна смужкова лінія має смугу пропускання ≥ 100 ГГц, тобто вона практично не спотворює фронту імпульсів. Чистий час затримки в такому випадку рівний часу поширення електромагнітного сигналу, що для довжини лінії $l = 1$ см становить приблизно 50 пс. Однак на максимальну частоту зсуву реєстра цей час затримки вже не впливає. Фронт імпульсів, які впливають на f_{\max} , визначається переважно часовими характеристиками вихідного каскаду схеми керування, тому вважатимемо $\tau_{3\phi}=\tau_m$. Для надпровідного розведення маємо: $\rho_3=0$, $k_m=0$ і $R_{3\phi}=0$, $\tau_m=L \cdot (\rho_k+0,5L)+2L$, $R_m=10^3 \cdot (2\rho_k+0,5L)/w$.

Результати моделювання максимальної частоти подання інформації на загальну шину від параметрів ПТШ з використанням надпровідного розведення подано в табл. 3.

Таблиця 3. Результати обчислення граничної частоти подання інформації для випадку надпровідного розведення

| № п/п | Параметри | $L = 1,5$ мкм, $\rho_k = 2$ Ом·мм | | | $L = 1,0$ мкм, $\rho_k = 1$ Ом·мм | | | $L = 0,5$ мкм, $\rho_k = 0,5$ Ом·мм | | |
|----------|------------------|--------------------------------------|------|-----|--------------------------------------|-----|-----|--|-----|-----|
| | | w , мкм | | | | | | | | |
| | | 20 | 50 | 100 | 20 | 50 | 100 | 20 | 50 | 100 |
| 1 | τ_1 , пс | 60 | 63 | 67 | 23 | 24 | 28 | 7 | 8 | 9 |
| 2 | τ_2 , пс | 240 | 251 | 268 | 91 | 97 | 106 | 27 | 30 | 34 |
| 3 | f_{\max} , ГГц | 1,1 | 1,06 | 1,0 | 2,9 | 2,8 | 2,5 | 9,8 | 8,8 | 7,8 |

З табл. 3 видно, що надпровідність дає суттєвий вигравш у швидкодії, якщо самі транзистори ПТШ мають високі швидкісні характеристики, що насамперед забезпечується за рахунок субмікронних затворів ПТШ і малих контактних опорів стік-витоків областей на арсенідгалієвих структурах. Таким чином, надпровідне розведення на кристалі ВІС/НВІС з розмірами $1 \times 1 \text{ см}^2$ може забезпечити надійну роботу цифрових пристроїв з тактовою частотою до 10 ГГц (система “Ізмір”).

Моделювання продуктивності обчислювальної (вимірювальної) системи. Швидкодія системи із загальною шиною визначається швидкістю обміну пакетів інформації між різними модулями цієї системи. Якщо пакет містить S шарів по m біт, то увесь пакет інформації передається за час $t_0 \leq m \cdot C / f_{\max} + \tau_{\max}$, де τ_{\max} – максимальний час затримки передавання одиничного сигналу шиною між найбільш віддаленими модулями. Зазвичай вважають, що $m \cdot C / f_{\max} \gg \tau_{\max}$, тому $t_0 = m \cdot C / f_{\max}$.

Швидкодія вимірювальної (обчислювальної) системи визначається кількістю операцій, які виконуються за одиницю часу. Якщо кожний процесор за одиницю часу виконує m операцій над потоком даних K (біт/с), то максимальне число процесорів (робочих місць), що використовуються в системі, становить $f_{\max} / 2K$, а їхня загальна продуктивність становить $m \cdot f_{\max} / 2K$ операцій за секунду. Таким чином, швидкодія всієї комп'ютерної системи типу “Ізмір” прямопропорційна максимальній частоті передавання інформації по загальній шині f_{\max} .

Аналіз дисперсійних і передавальних характеристик алюмінієвих і надпровідних ліній розведення, які охолоджуються до криогенних температур 77 К, показує, що у випадку довжини А1-лінії понад 2 см і частот вищих 0,5 ГГц затухання сигналу в такій лінії є досить високим. З огляду на це, таке розведення не можна використовувати для частот 10 ГГц та довжин провідника понад 10 см, тобто кристала ВІС з розмірами $10 \times 10 \text{ см}^2$. У той же час надпровідна лінія забезпечує смугу частот до $f_{\max} = 100 \text{ ГГц}$, якщо її довжина має декілька десятків сантиметрів.

Якщо обчислювальна комп'ютерна система розміщена в об'ємі декількох кубічних метрів, то за допомогою надпровідних ліній зв'язку можна організувати швидкість обміну інформацією між різними її модулями на частотах до $10 \div 20 \text{ ГГц}$, що неможливо забезпечити у разі алюмінієвого розведення навіть охолоджуючи його до криогенних температур 77 К (рис. 3). Як було показано вище, такі частоти можна забезпечити тільки за умови використання активних ВЧ-приладів, до яких насамперед належать ПТШ-транзистори на GaAs субмікронного розміру. Перехід на алюмінієве розведення можливий тільки у випадку подальшого масштабування технологічних розмірів до рівня 0,25 мкм.

Таким чином встановлено, що за температури 300 К швидкодія системи з алюмінієвим розведенням визначається сталими часами затримки ліній зв'язку і практично не залежить від параметрів швидкодіючих ПТШ-транзисторів. За криогенних (77 К) температур швидкодія за-

лежить від обох зазначених чинників, а у разі використання надпровідного розведення головним чинником, що обмежує швидкодію системи, є затримка в ПТШ, яку можна додатково зменшити шляхом використання надпровідних матеріалів також і для формування електродів бар'єрів Шоттки.

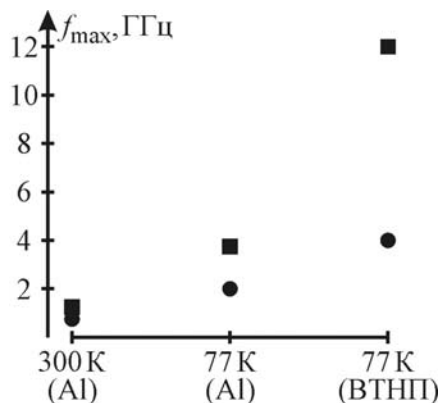


Рис. 3. Залежність максимальної частоти передавання інформації між блоками комп'ютерної системи типу "Ізмір" залежно від температури та виду розведення. Тут $L = 0,5$ мкм, $\rho_k = 0,5$ Ом·мм (крива 1); $L = 1,0$ мкм, $\rho_k = 2$ Ом·мм (крива 2)

Література

1. Новосядлий С.П. Суб- і наномікронна технологія структур ВІС / С.П. Новосядлий. – Івано-Франківськ: Місто НВ, 2010. – 456 с.
2. Новосядлий С.П. Діагностика субмікронних структур ВІС / С.П. Новосядлий, А.І. Терлецький. – Івано-Франківськ: Сімик, 2016. – 478 с.
3. Розробка технології багатозарядної іонної імплантації GaAs для субмікронних структур ВІС / С.П. Новосядлий, С.І. Бойко, Л.В. Мельник, С. В. Новосядлий // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2015. – Т. 18, № 6/5. – С. 32-40.
4. Новосядлий С.П. Патент на корисну модель № 68203 МПК H01L21/20 від 26.03.12. Спосіб формування епітаксійних арсенід-галієвих шарів на монокристалічних кремнієвих підкладках / С.П. Новосядлий, В.М. Вівчарук, Т.П. Кіндрат. – Опубл. Бюлетень Інституту промислової власності № 6 від 26.03.12.
5. Золотухин И. В. Физические свойства аморфных металлических материалов / И. В. Золотухин. – М: Металлургия, 1986. – 176 с.
6. Елинсон К. Н. Проблема межсоединений в современной микроэлектронике / К. Н. Елинсон, А. А. Суханов // Микроэлектроника. – 1984. – Т. 13, вып. 3. – С. 179-195.
7. Superconductors as very high-speed system-level interconnects / О.К. Kwon, В. W. Langley, R. F. Pease et al // IEEE Electr. Dev. Letters. – 1987. – v.8, No.2. – P. 582-587.

8. Новосядлий С.П. Комп'ютерне моделювання арсенідгалієвих супер-бета-транзисторів на гетероструктурах для швидкодіючих ВІС / С. П. Новосядлий, В. С. Гузік // Фізика і хімія твердого тіла. – 2015. – Т.16, № 3. – С. 592-598.
9. Новосядлий С. П. Варізонна технологія формування структур швидкодіючих GaAs-транзисторів як основи сучасних ВІС // С. П. Новосядлий, А. М. Босацький // Фізика і хімія твердого тіла. – 2015. – Т.16, № 1. – С. 222-229.

*Стаття надійшла до редакційної колегії 26.09.2017 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф. **Мойсишиним В.М.**,
д.т.н., професором **Олійником А.П.***

COMPUTER SIMULATION OF PERFORMANCE OF “IZMIR” MEASURING COMPUTER SYSTEM IN HIGH-SPEED LSI/VLSI

S. P. Novosjadly, A. I. Terletskyi, O. B. Fryk

Vasyl Stefanyk Precarpathian National University;

76000, Ivano-Frankivsk, Shevchenko str., 57;

tel. +380 (342) 59-60-07, e-mail: andrii.terletskyi@pu.if.ua

The possibilities of improving of performance both LSI/VLSI and computer measuring systems by decreasing of operating temperature to cryogenic level for cases of high conductive or superconducting wiring. It was shown that system performance depends on parameters of connecting lines and structures of active elements LSI/VLSI at cryogenic temperatures due to the growing mobility of charge carriers. It was demonstrated also that the use of superconducting wiring (routing) is effective only on condition of significant improvement options SFETs as active elements LSI (memory, microprocessors, microcontrollers, etc.).

Key words: *large integrated circuits, measuring system, superconducting connections, FETs, system performance.*