

УДК 53.06

**Жижко Володимир Абрамович**

*незалежний експерт*

**Жижко Владимир Абрамович**

*независимый эксперт*

**Zhyzhko Volodymyr**

*Independent Expert*

**ПРО КОНСТРУКЦІЮ ТРАНЗИСТОРА НА ОСНОВІ ВУГЛЕЦЮ  
О КОНСТРУКЦИИ ТРАНЗИСТОРА НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДА  
ABOUT THE CONSTRUCTION OF THE CARBON TRANSISTOR**

*Анотація.* Розглянуто можливості та проблеми проектування і виробництва мікросхем високої інтеграції на основі використання вуглецю в якості основного матеріалу. Викладена конструкція основного елемента мікросхем - транзистора на вуглецевій основі, а також модифікація схемотехніки КМОП, що дозволяє будувати схеми з малим споживанням на транзисторах з одним типом носіїв.

**Ключові слова:** ВІС, транзистор, схемотехніка КМОП, вуглець.

*Аннотация.* Рассмотрены возможности и проблемы проектирования и производства микросхем высокой интеграции на основе использования углерода в качестве основного материала. Изложена конструкция основного элемента микросхем – транзистора на углеродной основе, а также модификация схемотехники КМОП, позволяющая строить схемы с малым потреблением на транзисторах с одним типом носителей.

**Ключевые слова:** БИС, транзистор, схемотехника КМОП, углерод.

**Summary.** *The possibilities and problems of designing and manufacturing high-integration microcircuits based on the use of carbon as the main material are considered. The design of the main element of microcircuits - a transistor on a carbon substrate, as well as a modification of the CMOS circuitry, which makes it possible to build circuits with low consumption on transistors with one type of carriers, are described.*

**Key words:** *LSI, transistor, CMOS circuitry, carbon.*

Досягнення в інтегральній електроніці вражають. Мільярди транзисторів на одному чіпі процесора, тактові частоти в кілька гігагерц, перехід лідерів галузі до 3-нанометрових проектних норм, заява ІВМ про розробку технології в 1 нанометр - це нинішні реальності. Одними з наступних кроків можуть виявитися перехід до транзисторів з одним електроном або підвищення швидкодії за рахунок включення в конструкцію транзистора наноструктур, наприклад, графена [1; 2]. Зараз успіхи і розробки НВІС засновані на добре відпрацьованій і вивченій технології, що використовує кристалічний кремній в якості основного матеріалу для виробництва цифрових мікросхем. У цій статті обговорюється шлях збільшення швидкодії транзисторів за рахунок використання матеріалу з більшою ніж у кремнії рухливістю носіїв, а також деякої модифікації КМОП схемотехніки.

Вимоги до конструкції: 1 - технологічність - можливість виготовляти ВІС на існуючому в даний час обладнанні, бажано з якомога меншою кількістю масок і технологічних операцій, 2 - можливість будувати на основі базових елементів схеми високої інтеграції, нинішні процесори складаються з мільярдів транзисторів, 3 - високе швидкодія, тактова частота близько сотні гігагерц, 4 - тепловиділення не повинно перевищувати 1 ват на мільйон транзисторів при тактовій частоті близько 1 гігагерц, як у нинішніх кремнієвих ВІС.

З умов 2, 3, 4 випливає, що схемотехнічною основою логіки ВІС можуть бути тільки системи, засновані на маніпуляціях з напругою і з мінімальними струмами. З цієї причини відразу виключаються конструкції з діодами. Практично єдиними залишаються варіанти схемотехніки, що дозволяють реалізувати комплементарну логіку, в якій логічний вентиль пропускає малий струм і тільки в момент перемикання рівня сигналу (з 1 в 0 або з 0 в 1). Є кілька передумов розглядати вуглець в якості матеріалу, що становить інтерес для мікроелектроніки:

- вуглець належить до тієї ж 4-ї групі в періодичній системі елементів, що і кремній та германій;
- чистий вуглець (графіт) має металеву провідність, сильно легований киснем вуглець - діелектрик, слабо легований - напівпровідник.

Тобто за допомогою легування можна формувати ширину забороненої зони і рухливість носіїв в широких межах, - створити транзистор, що працює в режимі збіднення, можна шляхом легування каналу як фосфором, так і киснем, в залежності від того, який із процесів легування краще забезпечує досягнення потрібних електричних параметрів транзистора, - провідність р- або n- типу забезпечується легуванням тими ж матеріалами, що і для кремнію, тобто елементами 3-ї групи для діркової провідності, і елементами 5-ї - електронної. Кисень - елемент 6-ї групи, тому помірне легування киснем дає електронну провідність, можливість формувати ширину забороненої зони дозволяє знизити напругу, що управляє на затворі транзистора. Завдання отримання вуглецю високого ступеня хімічної чистоти давно вирішено (для потреб атомної промисловості).

На рис. 1 показаний варіант n-канального транзистора з оксидом вуглецю під затвором. Електричні властивості різних ділянок транзистора визначаються поєднанням і співвідношенням легуючих домішок:

- бором (р-тип) для основного обсягу підкладки;
- фосфором (n-тип) для областей витоку і стоку;
- киснем для областей товстого і тонкого діелектричних шарів, а також формування напівпровідникових параметрів графіту (ширина забороненої зони, рухливість і концентрація електронів).

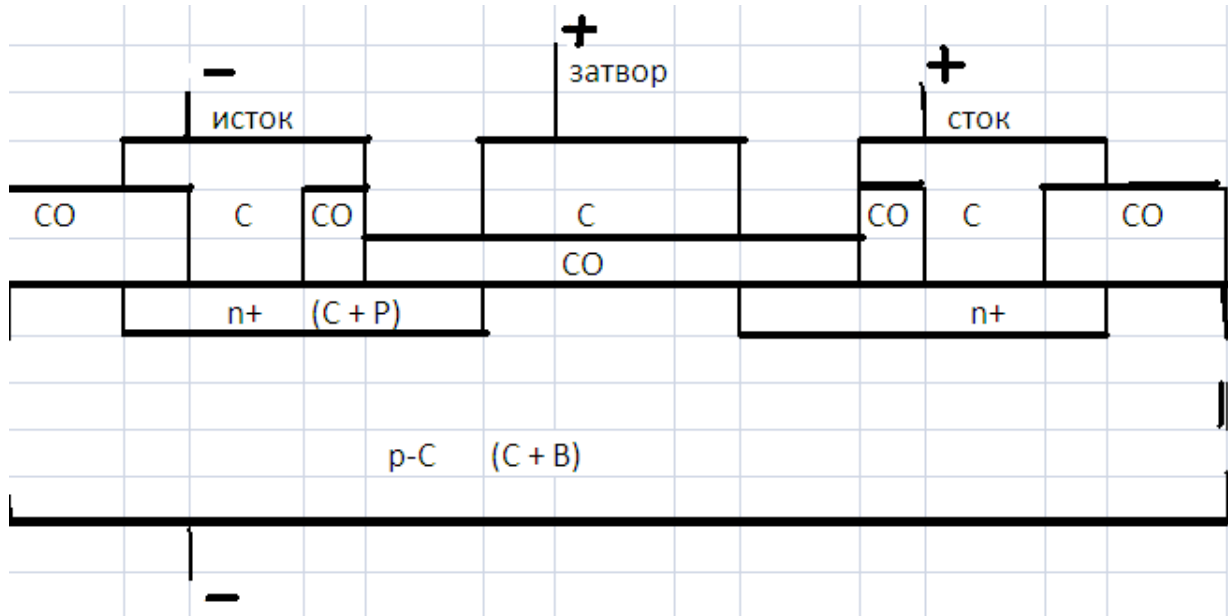


Рис. 1. Транзистор на вуглецевій підкладці

C - провідник, C+O - вуглець, легований киснем - діелектрик

Низьке споживання потужності нинішніх ВІС забезпечується застосуванням схемотехніки КМОП, в якій в структурі логічних вентилів присутні транзистори з обома типами провідності. При цьому транзистори з дірковою провідністю істотно обмежують швидкодію ВІС через низьку рухливість дірок (дірки займають верхні рівні енергії під стелю валентної зони і нижні рівні біля дна забороненої зони), для вуглецю рухливість дірок зазвичай на один-два порядки нижче рухливості електронів, для кремнію всього лише в 2,5 рази, (в InSb це співвідношення - понад 100). Щоб усунути цей недолік, пропонується модифікувати схемотехніку КМОП, виключивши транзистори р-типу, але зберігши основну перевагу КМОП - низьке споживання. У КМОП логічний ventиль будується з двох частин - основного ключа, що реалізує логічну формулу ventиля, і

доповнення (навантаження) у вигляді інверсії формули ключа. Основна і додаткова частини вентиля утворюють послідовний ланцюг від шини живлення до нульової шини. В статистиці одна з частин вентиля не буде пропускати струм, тому не буде пропускати струм і весь ланцюг вентиля. Струм від живлення до нуля можливий тільки в момент переключення і неможливий в статистиці. Інверсія в додатковій частині вентиля реалізується за рахунок використання транзисторів з неосновним типом провідності - дірковим. Злегка ускладнивши вихідну логічну схему можна побудувати і додаткову (так звану двоїсту) частину вентиля також з транзисторів n-типу. Така заміна заснована на логічних тотожностях (закони де Моргана)

$$\neg(a \vee b) = \neg a \wedge \neg b \qquad \neg(a \wedge b) = \neg a \vee \neg b$$

де мінус означає інверсію,  $\vee$  - диз'юнкцію,  $\wedge$  - кон'юнкцію. Ускладнення полягає у введенні після кожного вентиля додаткового вентиля - простого інвертора. Слід зазначити, що значна частина вентилів у звичайній логічній схемі на КМОП вже супроводжується вентилями з простою інверсією, так що для них додаткові інвертори не потрібні. Перевага такої квазіКМОП схемотехніки (ККМОП) наступні:

- висока швидкодія, що визначається тільки рухливістю електронів,
- суттєве спрощення в виготовленні за рахунок зменшення кількості масок і технологічних операцій ,
- не потрібні кишени двох типів, вся підкладка підлягає однорідному легуванню домішкою р-типу.

На рис. 2.а приведена схема вентиля, що реалізує функцію АБО-НЕ вхідних сигналів X і Y в схемотехніці ККМОП, тобто на транзисторах тільки n-типу.

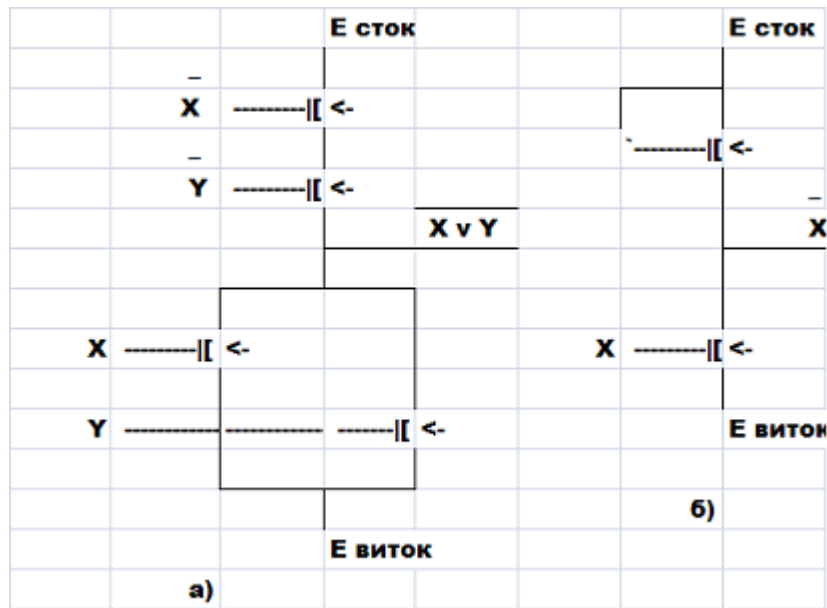


Рис. 2. а) вентиль АБО-НЕ, б) інвертор

На рис. 2.б показаний інвертор (на транзисторах n-типу). Можливо також в якості навантаження використовувати не інверсне доповнення, а транзистор в режимі збіднення (D-навантаження) [3]. Це спрощує логічну схему і топологічне креслення схеми, але збільшує на одиницю комплект шаблонів і споживану потужність. В [4] викладено алгоритм розрахунку ємнісного балансу електричних ланцюгів з транзисторами з одним типом провідності - для забезпечення працездатності ВІС.

Спрощено послідовність виготовлення шарів (без урахування контактних вікон між провідними шарами, травлення, пасивації та ін.) виглядає так:

- 1 - підготовка підкладки (полірування, очищення поверхні), легування всієї підкладки бором (p-тип), 2 - легування фосфором n - областей «дифузних» провідних шин,
- 3 - легування фосфором n<sup>+</sup> - областей витоків і стоків,
- 4 - нанесення вуглецю середньої товщини на області витоків і стоків,
- 5 - нанесення вуглецю малої товщини на області затворів,
- 6 - окислення,
- 7 - нанесення провідних шин - «металізація» чистим вуглецем.

Використання вуглецю в якості основного матеріалу при формуванні транзистора вимагає врахування декількох факторів. Вуглець (і графіт, і графен) має негативний коефіцієнт теплового розширення. (Негативні значення коефіцієнта мають також багато кристалів триклінної та моноклінної сингоній). Робочий діапазон температур ВІС становить близько 100 градусів, що може призвести до руйнування приладів, що містять комбінацію матеріалів з температурними коефіцієнтами, які сильно відрізняються. Є ряд питань, вирішення яких складають предмет відпрацювання технології:

- для забезпечення механічної міцності пластин видається доцільним використати в якості додаткової підкладки пластину товщиною близько 0,1 мм сплаву інвар (сплав 36% нікеля та заліза), який має практично нульовий температурний коефіцієнт. Метал зручно полірувати, і на таку підкладку вже наносити шар вуглецю для наступних операцій;
- ковзання шарів графіту. Легування або інший процес (наприклад, спікання) зміцнить зв'язки між шарами;
- адгезія між різнорідними вуглецевими елементами - оксид, леговані елементи, чистий вуглець з металевою провідністю, між металевою підкладкою та вуглецевим "сендвічем";
- відмінність у температурних коефіцієнтах розширення частин транзисторів, провідників і підкладки не повинно бути значним, - допоміжні процеси і матеріали для них: очищення, травлення, сушка, скрайбування.

Вуглець, як відомо, має кілька структурно-кристалічних модифікацій, кожна з яких володіє відмінним від інших набором властивостей. Одна з модифікацій - двовимірний кристал графен, має специфічну конфігурацію енергетичних зон, що забезпечує унікально високу рухливість електронів. Варіанти конструкції транзистора з

використанням графена розглянуті в роботах [1; 2], де передбачалося використовувати тунелювання електронів через бар'єр за допомогою напруги, що подається на затвор. Той факт, що ця ідея досі не реалізована для схем високої інтеграції (з моменту публікації в 2013 році пройшло 9 років), дає підставу розглядати викладений вище варіант з багатошаровим графітом як паліатив графена. Графен можна «поштучно» розміщувати в дискретних приладах, але для схем з високою інтеграцією технологія графенових транзисторів поки не створена. Більший прогрес досягнутий у використанні вуглецевих нанотрубок в якості набору провідників в каналах транзисторів, побудований демонстраційний процесор на таких транзисторах. Як основа використана відпрацьована кремнієва КМОП технологія [5]. Нещодавно пройшли повідомлення про розробку фірмою PragmatIC технології виготовлення мікросхем на гнучкій підкладці з поліамідного пластику (запит в Мережі – «процесор на гнучкій підкладці»). Зокрема, по цій технології був вироблений 32-розрядний процесор. Для цієї технології не потрібно вирощувати та піддавати складній обробці великі кристали, достатньо нанести на підкладку шар потрібного матеріалу (кремній, вуглець, GaAs, тощо) завтовшки у кілька мікронів шляхом напилення в вакуумі, а далі робити операції легування, травлення, металізації.

### **Література**

1. Britnell L., Gorbachev R. V., Geim A. K., Ponomarenko L. A., Mishchenko A., Greenaway T. M., Fromhold T. M., Novoselov K. S. & Eaves L. Resonant tunneling and negative differential conductance in graphene transistors. *Nature Communications*. 2013. 4-1794. P. 1-5.
2. Свинцов Д.А. и др.. Туннельные полевые транзисторы на основе графена. *Физика и техника полупроводников*. 2013. Том 47. Вып. 2. С. 244-250.



3. Мурога С. Системное проектирование сверхбольших интегральных схем. М. : Мир. 1985. Т.1. 288 с.
4. Рубцов В.П., Захаров В.П., Жижко В.А. Автоматизация проектирования больших интегральных схем. Киев : Техника. 1980. 232 с.
5. Представлен полностью рабочий процессор на транзисторах из углеродных нанотрубок. URL: <https://3dnews.ru/993191/>