

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки,
загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота магістра

**Польові транзистори як підсилювальні та логічні
елементи інтегрованої електроніки**

спеціальності 171 Електроніка

Здобувач вищої освіти гр. гр.ЕП.м-01н

С.О.Пушкар

Науковий керівник

канд. фіз.-мат. наук старший викладач

О.В. Пилипенко

Завідувач кафедри ЕЗПФ

д-р фіз.-мат. наук, професор

І. Ю. Проценко

Суми – 2022

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики
Спеціальність 171 – Електроніка, освітньо-наукова програма
«Електронні інформаційні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри ЕЗПФ
І.Ю. Проценко
«02» травня 2022 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Пушкаря Сергія Олександровича

Тема роботи **Польові транзистори як підсилювальні та логічні елементи інтегрованої електроніки**

затверджена наказом по університету від «18» квітня 2022 р., № 0270-VI _____

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 17 травня 2022 року _____

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета) Польовий транзистор - напівпровідниковий прилад, в якому струм змінюється в результаті дії перпендикулярного струму електричного поля, що створюється вхідним сигналом. За фізичною структурою і механізмом роботи польові транзистори умовно ділять на 2 групи. Першу утворюють транзистори з керуючим р-п перехо-дом або переходом метал - напівпровідник (бар'єр Шоттки), другу - транзистори з управлінням за допомогою ізольованого електроду (затвора), т. зв. транзистори МДП (метал - діелектрик - напівпровідник). Перспективним напрямком розвитку польових транзисторів є їх виробництво на основі нанотрубок, що суттєво підвищує їх швидкодію. Мета кваліфікаційної роботи магістра полягає у вивченні фізичних та конструктивно-технологічних принципів функціонування польових транзисторів різного функціонального призначення та проведенні розрахунків їх робочих параметрів.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить їх розробити)

1. Характеристики польових транзисторів.

2. Фізичні принципи роботи та класифікація польових транзисторів.

3. Підсилювачі та логічні елементи на польових транзисторах.

4. Сучасні польові транзистори, особливості конструкції та перспективи розвитку.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Слайди № 1-3. Актуальність роботи, мета, фізичні принципи роботи польових транзисторів.

Слайди № 4-8. Конструктивно-технологічні особливості польових транзисторів.

Слайди № 9-10. Логічні елементи та підсилювачі на польових транзисторах.

Слайд №11. Сучасні польові транзистори.

Слайд №12. Висновки, публікації.

6. Дата видачі завдання 02.05.2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літературних даних	до 02.05.2022 р.	<i>вик.</i>
2.	Проведення експерименту, моделювання, розрахунків, обробка результатів	до 12.05.2022 р.	<i>вик.</i>
4.	Оформлення тексту кваліфікаційної роботи.	до 17.05.2022 р.	<i>вик.</i>
5.	Попередній захист роботи	18.05.2022 р., онлайн	<i>вик.</i>
6.	Захист роботи в екзаменаційній комісії	24.05.2022 р., онлайн	<i>вик.</i>

Здобувач вищої освіти

Пушкар С.О.

Науковий керівник

Пилипенко О.В.

РЕФЕРАТ

Мета кваліфікаційної роботи магістра полягала в ознайомленні з принципом роботи та використанням польових транзисторів у підсилювальних схемах та логічних елементах.

Під час виконання кваліфікаційної роботи було проведено літературний аналіз типів польових транзисторів, принципів їх роботи. Проаналізовано роботу підсилювальних каскадів на польовому транзисторі. Розглянуто властивості нанотранзисторів.

У висновках наведена інформація про розглянуті види польових транзисторів з їх перевагами та недоліками, а також приведені перспективи застосування польових транзисторів на основі нанотрубок.

Робота викладена на 25 сторінках, зокрема, містить 8 рисунків, список використаних джерел із 13 найменувань.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ПОЛЬОВІ ТРАНЗИСТОРИ, ПРОВІДНІСТЬ, ПІДСИЛЮВАЛЬНИЙ КАСКАД, ЛОГІЧНИЙ ЕЛЕМЕНТ, НАНОТРАНЗИСТОРИ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ІСТОРІЯ СТВОРЕННЯ.....	7
1.1 Будова польового транзистора.....	8
1.2 Принцип дії польового транзистора.....	9
1.3 Типи польових транзисторів	10
1.4 Схеми підключення польових транзисторів.....	12
1.5 Застосування польових транзисторів	14
1.6 Підсилювальний каскад на польовому транзисторі	14
1.7 Логічні елементи на польових транзисторах.....	15
РОЗДІЛ 2 ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ	18
2.1 Покоління IGBT-транзисторів	19
2.2 Властивості нанотранзисторів та їх застосування	22
ВИСНОВКИ.....	26
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	27

ВСТУП

Польовий транзистор - це напівпровідниковий прилад, що має три електроди: витік, стік і затвор. Між витоком і стоком в кристалі напівпровідника, з якого виконаний польовий транзистор, розташований канал, через який тече струм транзистора. Канал виконується з напівпровідника одного типу - п або р. [2] Управління струмом, поточним через канал, здійснюється шляхом зміни провідності каналу, яка залежить від напруги між затвором і витоком. На відміну від біполярних транзисторів, в яких струм транзистора від емітера до колектора тече послідовно через два р-п-переходу, в польових транзисторах струм тече через канал, який утворюється в напівпровіднику одного типу провідності, і через р-п-переходи не тече. Оскільки напрям струму в польовому транзисторі - від витоку - через канал - до стоку, а управління струмом здійснюється напругою між затвором і витоком, то витік відповідає емітера біполярного транзистора: сток - колектору, а затвор - базі. [4]

Зміна провідності каналу може здійснюватися двома способами. В залежності від цього польові транзистори діляться на два основних види: транзистори з керуючим р-п-переходом і транзистори з ізольованим затвором.

РОЗДІЛ 1 ІСТОРІЯ СТВОРЕННЯ

Ідея створення транзисторів з використанням ефекту поля сягає ще у далекий 25 рік минулого століття. До речі, самий перший лабораторний прототип транзистора, створений Шеклі у 1946 році, належав до сімейства польових. І лише розвиток технології дав можливість у 60-х роках минулого століття виготовити практичні зразки придатні для широкого використання. Примітно те, що у польовому транзисторі працюють лише основні носії зарядів і саме завдяки цьому їх ще інколи називають – *уніполярними*. [5] Як і будь-який напівпровідник вони можуть бути **p**- або **n**-типу. Провідний канал таких транзисторів має *омічну* характеристику (що це таке, перечитайте попередні дописи стосовно опорів), тож його опір залежить від напруги управління.

Польові транзистори, при схожих силових характеристиках, менші за розмірами від *біполярних* та мають високий вхідний опір. Вони не такі чутливі до температури, саме тому схильність до теплового пробоя у них суттєво менша. [5, 6] Слід звернути увагу на більш простішу схемотехніку, завдяки чому конструктивні вироби на польових транзисторах мають, як правило, менше додаткових компонентів. І зовсім неможливо обійти увагою простішу технологію їхнього виготовлення, що й стало базовою основою використання такої технології при виготовленні мікросхем.

Польові транзистори поділяються на два основні види – транзистори із суцільним та ізольованим затвором, які, у свою чергу, бувають із вмонтованим, чи то індукованим каналом.

Тоді як у біполярних транзисторів управління потоком струму відбувається за рахунок введення додаткових носіїв струму (електронів чи дірок) із іншого прошарку, тобто основа роботи такого транзистору – *підсилення струму*. [6] Принцип роботи уніполярного транзистора зовсім інший. У будь-якому типі польового транзистора *провідний канал* є матеріалом одного типу, а його провідність (більше-менше) визначається *потенціалом* керуючого електричного поля.

Польові транзистори (*FET Field Effect Transistor*) не мають ніякого переходу на основному шляху струму між електродами *витоком* та *стоком*, які функціонально відповідають емітеру та колектору біполярного транзистора відповідно. Шлях між цими електродами називається **каналом** і може бути виготовлений із кремнію Р-типу або N-типу. Тому FET транзистори можна класифікувати як **Р-каналні** або **N-каналні**. Управління струмом у каналі відбувається *шляхом зміни напруги* на третьому електроді – *затворі*. Тож для таких транзисторів справедливе твердження стосовно того, що вони – *підсилюють напругу*.

1.1 Будова польового транзистора

На рисунку 1.1 праворуч схематично зображена будова одного з типів польового транзистора: метал-оксидного (MOSFET), або МОН (метал-оксид-напівпровідник). Усі транзистори такого типу мають витік, стік та затвор, яким відповідають емітер, колектор та база. Струм в транзисторі протікає через канал, що утворено легованою областю напівпровідника, розташованою між підкладкою і затвором. До каналу під'єднані два електроди — витік, що є джерелом носіїв заряду й стік, до якого носії заряду стікаються. Контакти між витоком та стоком і каналом робляться омичними. Для цього приконтактні області сильно легують. Ці області позначені на рисунку n^+ . [4]

Під шириною транзистора розуміють розміри транзистора у напрямку, перпендикулярному до перерізу зображеному на діаграмі (тобто, в/від екрану). Типова ширина набагато більша за довжину каналу. Довжина каналу 1 мкм обмежує значення верхньої частоти до 5 ГГц, 0.2 мкм — до приблизно 30 ГГц.

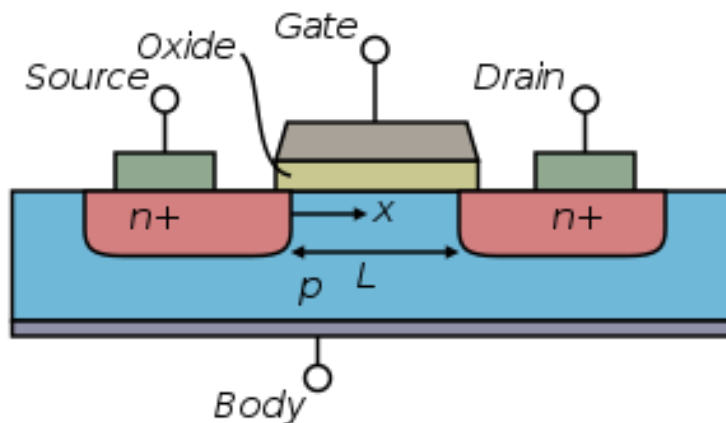


Рисунок 1.1 – Схема будови метал-оксидного польового транзистора: source — витік, gate — затвор, drain — стік. [2]

1.2 Принцип дії польового транзистора

Польовий транзистор з керуючим р-n- переходом - це польовий транзистор, затвор якого відокремлений в електричному відношенні від каналу р-n-переходом, зміщеним у зворотному напрямку.

Каналом польового транзистора називають область в напівпровіднику, в якій струм основних носіїв заряду регулюється зміною її поперечного перерізу.

Електрод через який в канал входять основні носії заряду, називають витіком. Електрод, через який з каналу йдуть основні носії заряду, називають стоком. Електрод, службовець для регулювання поперечного перерізу каналу за рахунок керуючого напруги, називають затвором. [5]

Як правило, випускаються кремнієві польові транзистори. Кремній застосовується тому, що струм затвора, тобто зворотний струм р-n-переходу, виходить у багато разів менше, ніж у германію.

Ширина р-n- переходів, а, отже, ефективна площа поперечного перерізу каналу, його опір і струм в каналі залежать від цієї напруги. З його зростанням розширюються р-n- переходи, зменшується площа перетину токопроводящего каналу, збільшується його опір, а, отже, зменшується струм в каналі. Отже, якщо між витіком і стоком включити джерело напруги $U_{си}$, то силою струму стоку I_c , що протікає через канал, можна управляти шляхом зміни опору

(перетину) каналу за допомогою напруги, що подається на затвор. На цьому принципі і заснована робота польового транзистора з керуючим р-n- переходом.

При напрузі $U_{зи} = 0$ перетин каналу найбільше, його опір найменше і ток I_c виходить найбільшим.

Струм стоку I_c поч при $U_{зи} = 0$ називають початковим струмом стоку.

Напруга $U_{зи}$, при якому канал повністю перекривається, а струм стоку I_c стає дуже малим (десяті частки мікроампер), називають напругою відсічення $U_{зиотс}$.

1.3 Типи польових транзисторів

Серед різновидів польових транзисторів можна виділити два основні класи: польові транзистори із затвором у виді р-n переходу та польові транзистори із затвором, який ізольований від робочого напівпровідникового об'єму діелектриком. Прилади другого класу часто також називають МДН транзисторами (від словосполучення метал — діелектрик — напівпровідник) та МОН транзисторами (від словосполучення метал — оксид — напівпровідник), оскільки як діелектрик найчастіше використовується діоксид кремнію.

В свою чергу транзистори з ізольованим каналом поділяються на транзистори з вбудованим каналом та індукованим каналом. Транзистори з вбудованим каналом (у них канал відкритий при нульовій напрузі витік-затвор) зустрічаються набагато рідше.

Також польові транзистори підрозділяються на транзистори з каналом провідності n-типу або р-типу. [8]

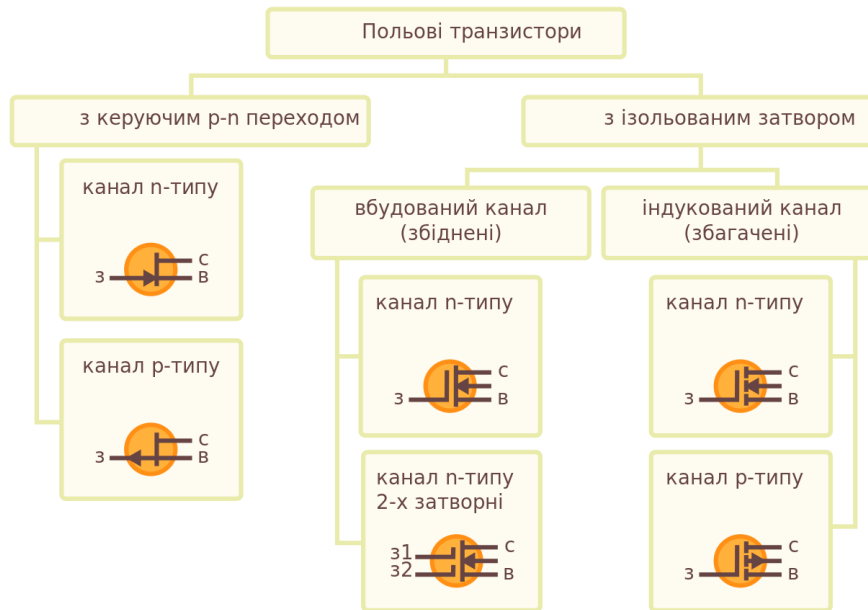


Рисунок 1.2 – Види польових транзисторів та їх позначення на принципових схемах. [1]

В фізиці напівпровідників термін обернений затвор позначає сильно леговану підкладку, яка є хорошим провідником. Використовується як звичайний затвор для регулювання концентрації носіїв струму в гетероструктурах з двохвимірним електронним газом (або двохвимірним дірковим газом). Використовується в тих випадках, коли важко створити звичайний затвор. Якщо підкладка достатньо тонка і поле не екранується в непровідному матеріалі, то поле проникає до електронного газу. [10] В цьому випадку можна обійтися без легування та використовувати металічну пластину, котра також буде називатися оберненим затвором. Фактично, якщо поле не екранується, то концентрація ДЕГ (який можна вважати другою обкладкою конденсатора) залежить тільки від ємності системи.

В МДН-транзисторах четвертий електрод має назву «підкладка». Проте слід розрізняти дискретні МДН-транзистори, в яких електрод підкладки (bulk) працює нарівні з іншими електродами (тобто жорстко індивідуалізований), та інтегральні схеми на МДН-транзисторах в яких електрод підкладки (substrate) є спільний для всіх МДН транзисторів одного типу. Правда у випадку технології

кремній на сапфірі, електроди підкладки є також індивідуалізовані для кожного інтегрального МДН- транзистора. [12]

1.4 Схеми підключення польових транзисторів

Польовий транзистор може бути увімкнений за трьома основними схемами:

- Із загальним витоком (ЗВ) (Рисунок 1.3);
- Із загальним стоком (ЗС) (Рисунок 1.4);
- Із загальним затвором (ЗЗ) (Рисунок 1.5).

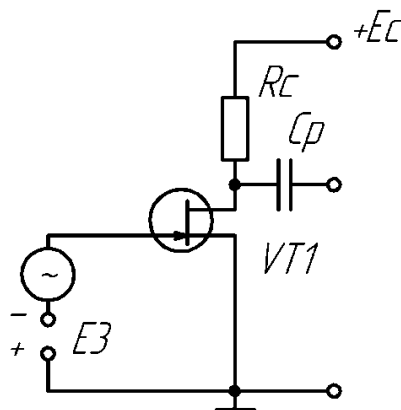


Рисунок 1.3 – Схема підключення польового транзистора з керуючим рп-переходом із загальним витоком. [3]

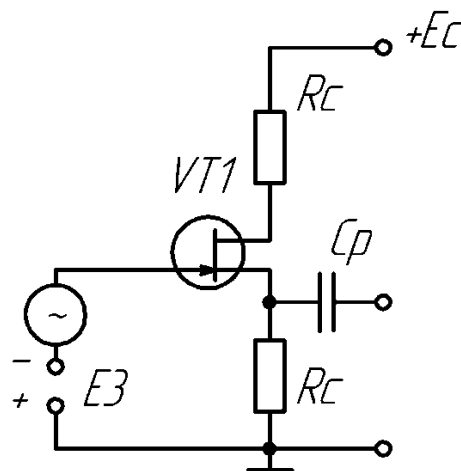


Рисунок 1.4 – Схема підключення польового транзистора з керуючим рп-переходом із загальним стоком. [3]

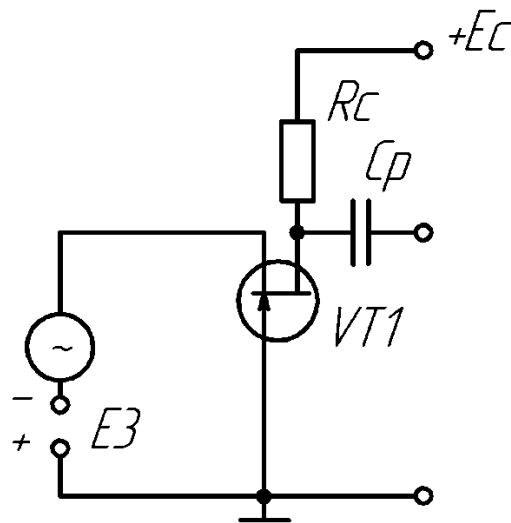


Рисунок. 1.5 – Схема підключення польового транзистора з керуючим рп-переходом із загальним затвором. [3]

На практиці найчастіше застосовується схема із загальним витоком (ЗВ), аналогічна схемі на біполярному транзисторі із загальним емітером (ЗЕ). Каскад із загальним витоком дає дуже велике підсилення струму і потужності. Схема із загальним затвором (ЗЗ) аналогічна схемі із загальною базою (ЗБ). Вона не дає підсилення за струмом, і тому підсилення потужності в ній у багато разів менше, ніж у схемі з ЗВ. Каскад із загальним затвором має низький вхідний опір, і тому рідко застосовується у підсилювальній техніці. [8]

Каскад з загальним стоком (ЗС) аналогічний каскаду з загальним колектором (ЗК) для біполярного транзистора - емітерним повторювачем. Такий каскад часто називають витоковим повторювачем. Коефіцієнт посилення по напрузі в цій схемі завжди трохи менше 1, а коефіцієнт посилення за проектною потужністю займає проміжне значення між ЗЗ і ЗВ. Перевага цього каскаду - дуже низька вхідна паразитна ємність і його часто використовують в якості буферного розділового каскаду між високоомним джерелом сигналу, наприклад, пьезодатчиком і подальшими каскадами підсилення. За широкосмуговим властивостям цей каскад також займає проміжне положення між ЗЗ і ЗВ. [11]

1.5 Застосування польових транзисторів

Польові транзистори знайшли широке застосування в радіоелектроніці. МДП-транзистори мають дуже високий вхідний опір ($R_{BX} > 10^{14}$ Ом, іноді до 10^{17} Ом). Параметри МДП-транзисторів менше залежать від температури, ніж біполярних. Польові транзистори можуть працювати при низьких температурах. Їх параметри досить стабільні в часі навіть при негативних зовнішніх впливах, включаючи радіацію, тому вони можуть бути використані в бортової апаратури космічних апаратів. Технологія виготовлення польових транзисторів вельми проста, тому при їх виготовленні відсоток браку істотно менше, ніж при виготовленні біполярних транзисторів. При виготовленні інтегральних схем на основі польових транзисторів можна домогтися високої щільності розташування елементів, значно вище (приблизно на порядок), ніж для біполярних транзисторів. На основі МДП-транзисторів можуть бути виготовлені резистори для монолітних інтегральних мікросхем. Вони також можуть використовуватися в логічних схемах, їх застосовують в обчислювальній техніці. [7] При всіх своїх перевагах польові транзистори володіють такими недоліками, як малий коефіцієнт посилення і менший, ніж у біполярних частотний діапазон, тому їх використовують в пристроях з частотами до декількох мегагерц. Створення гібридних мікросхем з поліпшеними характеристиками можливо при спільному застосуванні польових і біполярних транзисторів. Польові транзистори застосовують у схемах підсилювачів, генераторів, перемикачів.

1.6 Підсилювальний каскад на польовому транзисторі

Підсилювальні каскади на польових транзисторах мають істотно більший вхідний опір у порівнянні з підсилювальними каскадами на біполярних транзисторах. Найбільше застосування знаходять підсилювальні каскади із загальним витоком (Рисунок 1.6).

У цьому каскаді резистор R_c , за допомогою якого здійснюється посилення, включений в ланцюг стоку. У ланцюг витоку включений резистор R_B , що створює необхідне падіння напруги в режимі спокою $U_{зо}$, що є напругою зсуву між затвором і витоком.

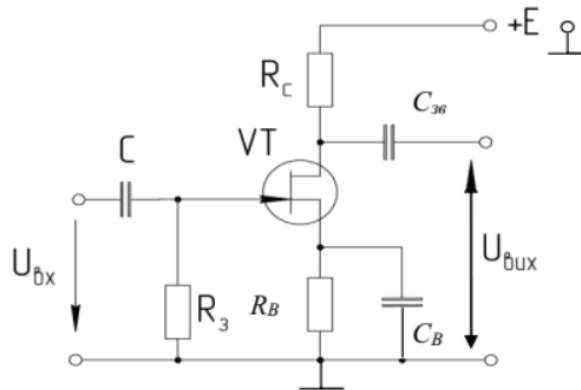


Рисунок 1.6 – Підсилювальний каскад із загальним джерелом [6]

Резистор у ланцюзі затвора $R_з$ забезпечує в режимі спокою рівність потенціалів затвора й загальної точки підсилювального каскаду. Таким чином, потенціал затвора є негативним щодо потенціалу.

1.7 Логічні елементи на польових транзисторах

Дуже великий вхідний опір МДП-транзисторів дозволяє створювати ЛЕ динамічного типу з малою площею на кристалі і малою споживаною потужністю при відносно низькому швидкодії. ЛЕ арсенід-галієвих ІС на МЕН-транзисторах (транзисторах з контактом метал-напівпровідник) з каналами л-типу мають надвисоким швидкодією. В основі ЛЕ на ПТ лежать інвертори (ключі) на л-канальних МДП-транзисторах і комплементарних транзисторах. Розглянемо логічні елементи І-НЕ і АБО-НЕ на л-канальних і комплементарних транзисторах.

На відміну від елементарного інвертора (ключа) в ЛЕ І-НЕ замість одного включено т активних транзисторів, які при тій же структурі і напружених дають в т разів менший струм. ЛЕ І-НЕ з двома послідовно включеними активними транзисторами $УТ_{01}$ і $УТ_{02}$ і один пасивний $УТ_{II}$ [6]. Якщо на вхід 1 або вхід 2,

або на обидва входу одночасно подати напругу низького рівня $C / ^\circ$, то або один з відповідних транзисторів, або обидва транзистора $УТ_{01}$ і $УТ_{02}$ закриті, струм через пасивний транзистор $УТ_{п}$ не протікає і на виході встановлюється напруга високого рівня $i^1 = C /_{III}$. Якщо ж на входи надходить напруга i^1 у той же активні транзистори відкриті і на виході встановлюється напруга i^0 .

Передавальні характеристики, напруга і стійкість ЛЕ визначаються відношенням $До_{п} / K_{a}$ зф ($K_{п}$ - ефективна питома крутість пасивного транзистора). Щоб зберегти ці характеристики незмінними, ЛЕ повинен мати параметр $K_{п} / K_{п}$ в t разів менше, ніж у інвертора.

Для реалізації логічної операції АБО-НЕ застосовується паралельне включення активних транзисторів. Якщо хоча б на один з входів подається напруга $C / ^1$, то відповідний активний транзистор відкритий і на виході встановлюється потенціал i^0 . При $C /_{вих} = Ц^\circ$ на всіх виходах всі активні транзистори закриті і на виході встановлюється напруга $C / ^1$, що дорівнює напрузі харчування.

Передатна характеристика, напруги $\xi 7^\circ$, $\xi 7^1$ і стійкість перед перешкодами будуть такими ж, як у інвертора при $\xi /_{вх} = \xi 7^\circ$ на одному з входів і змінюється напрузі на іншому. Якщо на обох входах напруга івменяється одночасно, то $\xi 7^\circ$ зменшується і стійкість зростає.

ЛЕ на комплементарних транзисторах І-НЕ з послідовним і паралельним включенням відповідно л-канальних і р-канальних транзисторів відповідно мають характеристики і параметри, близькі до інвертору, а ефективна питома крутість транзисторів якого $До_{п}^{\wedge} = K_{п} / t > До_{РЕФ} = ТК_{р}$ (індекс p відноситься до л-канального, а p - до р-канального МДП-транзистора). [7]

При тих же геометричних розмірах транзисторів, що і в інверторі, струм, що задається л-канальними транзисторами у відкритому стані, зменшується в t разів, а струм, що задається р-канальними транзисторами, збільшується в t разів. З ростом t відношення $До_{паф} / K_{РЕФ}$ зменшується і стійкість перед перешкодами i^* падає. Зі зміною t середня тимчасова затримка змінюється

порівняно мало в порівнянні з елементом на л-канальних транзисторах. Для $t > 5$ середня затримка зростає пропорційно t .

Функція АБО-НЕ реалізується за допомогою паралельного включення л-канальних і послідовного включення р-канальних транзисторів. У цьому логічному елементі параметри D_{0n} і K_p в порівнянні з інвертором рівні $D_{0n} = T_{K_{г}} D_{0pe} \phi = K_p / t$. З ростом t зменшується стійкість перед перешкодами логічному нулю і[®], на протипагу попередньому випадку, коли зменшується стійкість перед перешкодами і по логічній одиниці. Середня тимчасова затримка збільшується пропорційно t , т. Е. Сильніший у порівнянні з елементом І-НЕ. Останні з точки зору швидкодії є кращими, ніж ЛЕ АБО-НЕ.

Крім розглянутих ЛЕ на МДП-транзисторах використовуються також так звані динамічні схеми, в яких відбувається короткочасне запам'ятовування інформації з використанням конденсаторів, сформованих ємностями самих транзисторів з індивідуальними каналами.

У логічних елементах надшвидкодуючих ІС використовуються МЕР-транзистори на основі СААВ.

РОЗДІЛ 2 ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Світловипромінювальний органічний польовий транзистор. Винахід відноситься до області оптики, зокрема до електролюмінесціруючим наноструктур, і може бути використано при створенні пристроїв для відображення алфавітно-цифрової і графічної інформації. Суть винаходу полягає в тому, що активний шар виконаний у вигляді органічної матриці з впровадженими в неї двокомпонентними (ядро-оболонка) напівпровідниковими наночастинками. [8] Діаметр напівпровідникового ядра наночастинок може змінюватися в межах 2.0-6.0 нм а товщина напівпровідникової оболонки може змінюватися в межах 1.0-3.0 нм для перебудови довжини хвилі випромінювання в межах 400-650 нм видимого спектра. Винахід може бути використано для створення світловипромінюючих органічних польових транзисторів з високим квантовим виходом люмінесценції і регульованим спектром випромінювання у видимому діапазоні довжин хвиль, що важливо для створення алфавітно-цифрових дисплеїв нового покоління.

Створення графенових транзисторів. Дослідники з HRL Laboratories оголосили про створення графенових польових транзисторів, в яких рухливість зарядів в 6 - 8 разів перевищує можливості сучасних кремнієвих технологій. Для кремнію експериментально виміряна рухливість зарядів в кремнії складає близько 1400 квадратних сантиметрів на вольт в секунду, для в графена рухливість може досягати 200 тисяч см² В/С при кімнатній температурі (правда, на практиці поки був досягнутий рівень лише в 15 тисяч см², що, більш ніж в 10 разів перевершує кремній). [11] Дослідники з HRL Laboratories оголосили про те, що їм вдалося створити пристрої з одиничного шару графену на підкладці з карбїду кремнію діаметром 2 дюйми. У транзисторах даного типу рухливість зарядів становить порядку 6000 см², що в 6 - 8 разів вище, ніж у найбільш досконалою на сьогоднішній день кремнієвої технології n-MOSFET.

Нанометрпова технологія FinFET від Intel. Вперше були запущені в серійне виробництво транзистори з тривимірною структурою. Про початок

виробництва об'ємної транзисторної структури Tri-Gate компанія Intel сповістила громадськість ще в 2002 р. Проте кристали з такими транзисторами корпорація почала продавати тільки в квітні: нові процесори Intel носять кодове ім'я Ivy Bridge.

У 3D-транзисторі Tri-Gate використовуються три затвора, розташованих навколо кремнієвого каналу в об'ємній структурі, що забезпечує унікальне поєднання продуктивності і дуже малого споживання - переваг, затребуваних як у смартфонах і планшетах, так і для потужних процесорів для ПК і серверів . [9] Висока ефективність нових транзисторів при низькій напрузі живлення дозволяє створювати нові мікроархітектури на базі 22-нм процесорів Intel Atom. Тут повною мірою використовуються можливості технології 3D Tri-Gate, що забезпечує дуже мале споживання.

2.1 Покоління IGBT-транзисторів

Покоління IGBT-транзисторів Технологія виготовлення кристалів IGBT-транзисторів налічує кілька поколінь. Для кожного покоління характерні свої виробничі процеси і у готових транзисторів кожного з поколінь є свої сильні сторони. Головним цільовим показником, на який орієнтувалося вдосконалення технологічних процесів, було зниження втрат в IGBT-транзисторі. Дана мета вимагає зниження напруги насичення між емітером і колектором повністю відкритого транзистора, що, в свою чергу, тягне за собою необхідність зниження напруги відсічки в структурі польового транзистора і зменшення диференціального опору. Для цього від покоління до покоління товщину структури IGBT-транзистора намагалися зменшувати. В даний час склалася унікальна для електроніки ситуація - на ринку присутні відразу п'ять поколінь IGBT-транзисторів IR. [9] В дві лінійки з них - Gen4 і Gen5 - складаються з планарних транзисторів, дві інших - Gen6 і Gen7 - з Trench-транзисторів, а новітнє покоління Gen8 розроблено на базі нового матеріалу GaN. При цьому різні покоління взаємно доповнюють один одного, і попередні покоління не

збираються поки сходити з дистанції. Найстаршим, яке нині випускаються, є четверте покоління IGBT. Воно розроблялося для нескладних індустріальних застосувань, електрозварювання та керування моторами. Найбільш універсальні IGBT-компоненти п'ятого покоління. У цьому поколінні представлені транзистори, розраховані, як на великі напруги, так і на високі частоти. Це покоління IGBT міцно влаштувалося в деяких побутових застосуваннях, таких як системи кондиціонування, джерела безперебійного живлення. Впровадження IGBT-модулів в побутову техніку вело до зниження втрат, при цьому вимоги до максимального значення напруги і частоти перемикавання знижувалися. Це знайшло втілення в шостому поколінні IGBT. Виготовлені за даною технологією транзистори перемикаються з напругою не вище 600 В, при цьому частота перемикавання не перевищує 30 кГц. Шосте покоління відрізняється тим, що витримує великі пікові навантаження, що важливо для зварювання, а також для використання в системах електроприводу. [9] На момент створення сьомого покоління IGBT на піку актуальності набула альтернативна енергетика - головним чином, використання енергії сонця. Вимагалось підвищити ККД перетворювача, для чого в транзисторах були зменшені втрати провідності та перемикавання. Крім цього, верхня межа напруги була підвищена до 1200 В. Найновіше, восьме покоління IGBT було представлено компанією IR в 2014 році. При щільності струму 150 A/cm^2 напруга між емітером і колектором повністю відкритого транзистора восьмого покоління становить 1,95 В проти приблизно 2,7 В у транзисторів попереднього покоління. Основна мета, заради якої були покращені параметри транзисторів - це їх застосування в потужних перетворювачах і джерелах безперебійного живлення, що використовуються в промисловості. Для промислового обладнання важливим є підвищення ККД перетворювача навіть на кілька відсотків. А ось максимальна частота перемикавання може бути менше 10 кГц. Тому восьме покоління IGBT має мале падіння напруги між колектором і емітером, здатне комутувати високі напруги, але програє трьом попереднім поколінням у швидкодії. Менші втрати - це не тільки більш високий ККД системи електроживлення, менше нагрівання

модуля. А це означає, що інверторні перетворювачі можна зробити компактніше і дешевше за рахунок спрощення системи тепловідведення. Класифікація параметрів поколінь IGBT-транзисторів наведена на рис. 4. З рис. 4 видно, що перехід від 4-покоління (G4), що виготовляється за Punch-Through (PT) технологією, до 5-покоління (G5), що виготовляється за Non-Punch-Through (NPT) технологією, супроводжується дев'ятикратним зменшенням втрат на перемикання (параметр E_{ts}) і збільшенням втрат на провідність в 1,5 рази. Таким чином, покоління G5 більше підходить для застосування в схемах з більш високими робочими частотами, ніж G4. Перехід до нових технологій FS Trench (6-покоління, G6) і Epi-Trench (7-покоління, G7), дозволив створити IGBT, які поєднують в собі переваги попередніх поколінь і володіють низькими значеннями E_{ts} без збільшення втрат провідності. Крім того, падіння робочого струму транзистора зі збільшенням частоти у нового покоління G7 виражено не так яскраво, як у транзисторів попередніх поколінь або у IGBT-транзисторів інших виробників. Восьме покоління IGBT (G8) здатне комутувати високі напруги (1400 В), але програє трьом попереднім поколінням у швидкодії. Таким чином, перехід до технологій восьмого покоління дозволяє значно знизити втрати при комутації і встановити втрати провідності на рівні кращих зразків попередніх поколінь. При цьому втрати при виключенні виявляються на рівні попереднього покоління. У результаті сумарні втрати знижуються.

На сьогоднішній день IGBT і MOSFET широко використовуються в силовій електроніці. На частотах до 30 кГц при великих струмах та напругах очевидна перевага IGBT-транзисторів, якщо потрібна вища частота перемикання розробникам РЕА слід звернути свою увагу на MOSFET-транзистори. Транзистори IGBT, як клас приладів силової електроніки, займає домінуюче становище для діапазону потужностей від одиниць до сотень кВт. Причому вибір, яке покоління IGBT використати, залежить від сфери застосування. Подальший розвиток IGBT буде йти шляхом: підвищення діапазону граничних комутованих струмів і напруг; підвищення швидкодії; підвищення стійкості до перевантажень і аварійних режимів; зниження прямого

падіння напруги; розробки нових структур з густиною струмів, що наближаються до тиристорних; розвитку "інтелектуальних" IGBT (з вбудованими функціями діагностики та захисту) і модулів на їх основі.

2.2 Властивості нанотранзисторів та їх застосування

Польові нанотранзистори мають менші розміри порівняно із кремнієвими, для яких теоретична межа мініатюризації компонент становить 12 нм, і виготовляють методом нанесення на кремнієву пластину двох електродів (стік і витік транзистора), між якими розміщують нанотрубку, що виконує роль затвора. Швидкодія такого транзистора набагато перевищує швидкодію кремнієвих транзисторів. [8] За деякими оцінками, нанотрубка може працювати на частоті в 1 ТГц, що в сотні разів більше від швидкості сучасних комп'ютерів. В даний час вже створені пристрої на основі нанотрубок, що працюють на частотах до 30 ГГц. Це досягається за рахунок високої рухливості електронів в нанотрубках (в кремнії цей параметр становить $1400 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, а в нанотрубках - близько $10^5 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$).

У транзисторах на основі ВНТ висока рухливість носіїв заряду, але й великий гістерезис на залежності струм стоку від напруги на затворі (Рисунок 2.1). Ця особливість була врахована авторами, які на основі польового транзистора створили елемент пам'яті, що здатен витримувати більше 10 000 циклів запису/видалення з часом доступу до 100 нс. [9]

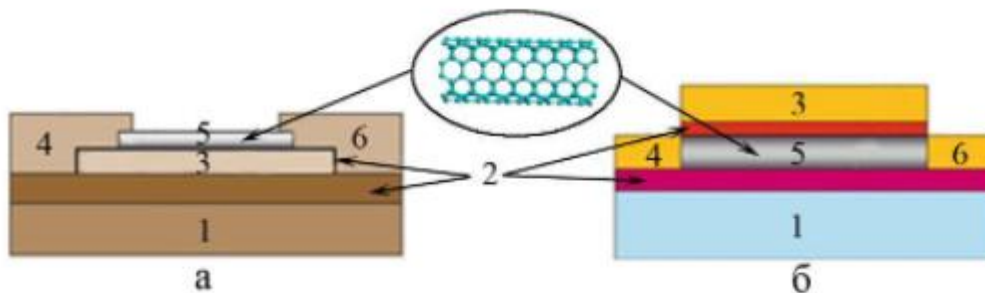


Рисунок 2.1 – Схематичне зображення польового транзистора на основі нанотрубки, з різним положенням затвора (а, б): 1 – підкладка (Si); 2 – ізолюючий шар; 3 – керуючий затвор; 4 – стік; 5 – нанотрубка; 6 – витік [8]

Процес виробництва транзисторів на основі ВНТ можна значно спростити завдяки технології друку транзисторів фарбою, що складається з вуглецевих нанотрубок. Крім того, можливий синтез Y-подібних нанотрубок, які самі по собі вже можуть виконувати функції транзистора, без будь-яких додаткових елементів.

Ідеальною в плані геометрії є циліндрична форма транзистора. Один циліндр, виконує функції каналу провідності, області стоку і витоку, який оточений співвісним порожнистим циліндром з діелектричного матеріалу, а зверху розміщений ще один співвісний металевий циліндр, що виконує функції затвора. Таким чином, у моделі ідеального транзистора передбачено використання поєднання діелектрика з металевим затвором. Ця геометрія дозволяє мінімізувати струми витоку і поліпшити всі характеристики транзистора.

Маніпулювати окремими ОВНТ досить складно, оскільки виникає проблема їх розміщення в потрібному місці з необхідною орієнтацією, ці фактори стають істотною перешкодою при масовому виготовленні приладів. Проте у деяких випадках можна використовувати пучки нанотрубок у вигляді тонкої плівки. [9] Однорідність властивостей плівки з ОВНТ досягається шляхом статистичного усереднення властивостей окремих нанотрубок із пучка. За рахунок цього відбувається більша повторюваність результатів порівняно з окремими ОВНТ, властивості яких залежать від їх хіральності. Використовуючи такий підхід створюються діоди, транзистори, елементи логічних схем, сонячні батареї, дисплеї та інші датчики.

Японськими дослідниками запропоновано для відведення тепла із середини кристала мікросхеми використовувати ВНТ, теоретична теплопровідність яких становить від 3000 до 3500 Вт/м·К, що приблизно в десять разів вище, ніж теплопровідність Cu (400 Вт/м·К). При цьому коефіцієнт теплового розширення ВНТ менший, ніж у Cu, тому нанотрубки будуть

створювати менші механічні напруження в кристалі Si внаслідок теплового розширення.

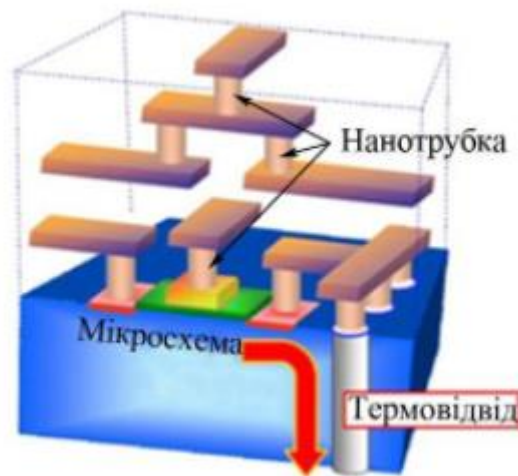


Рисунок 2.2 – Відведення тепла від Si кристалу за допомогою нанотрубок. [10]

Але експериментально отримані значення теплопровідності нанотрубок становлять 170–260 Вт/м·К. Для вирощування ВНТ використовувалася методика під назвою «STEP», що дозволила отримати графен при відносно низькій температурі, а за рахунок зміни її показники за спеціальною схемою створити умови для зникнення дефектів у сформованій плівці, щоб на виході отримати графен із заданими властивостями. [11]

Нанотрубки з великою питомою поверхнею використовуються як електроди для електролітичних конденсаторів із великою питомою потужністю.

Електрофізичні параметри нанотрубок дуже чутливі до наявності різних газів. Авторами був розроблений макетний зразок наносенсору на основі БВНТ як чутливого елемента для аналізу багатокomпонентних газових сумішей, що може розпізнавати: H_2 з концентрацією 0,001–1 %; CO – 0,0001–1 %; CO_2 – 0,0001–1 %; CH_4 – 0,001–1 %. Сенсор являє собою мікросхему розміром 10 x 10 мм, що включає в себе чотири модулі: резистивний, терморезистивний, ємнісний та іонізаційний. Такий підхід дозволяє фіксувати одразу чотири електрофізичні параметри, що підвищує точність і час спрацювання датчика.

Завдяки своїй ефективності, економічності та дешевизні напівпровідникові плівки SnO_2 знайшли широке застосування як твердотільні датчики газу. [12] Їх принцип роботи базується на модуляції поверхневої провідності полікристалічного напівпровідника при взаємодії з газами. Експериментальні дослідження показали, що додавання невеликої кількості (1,72 %) БВНТ приводить до покращення газової чутливості ($S = R_a/R_g$, де R_a, R_g – електричний опір на повітрі та при напущеному газі відповідно) датчиків газу на основі SnO_2 .

Нанотрубку можна заповнювати різними речовинами, при цьому вона може бути носієм матеріалу або ізольованою оболонкою, з метою запобігання електричного контакту з речовиною та її хімічної взаємодії з оточуючими об'єктами. Капілярні властивості зберігають свою природу та у випадку трубок з манометровим діаметром. За рахунок капілярного ефекту нанотрубки можна заповнювати легувальними матеріалами, для цього необхідно, щоб один її кінець був «відкритий» (видалити одну з півсфер). Розплавлений метал при змочуванні внутрішньої поверхні легко проникає в нанотрубку, наприклад, діаметр найтоншого дроту зі свинцю становить 1,5 нм .

ВИСНОВКИ

Розвиток напівпровідникових приладів відбувається досить швидкими темпами. Розробляються прилади для роботи в області високих частот, потужностей і температур при мінімізації їх розмірів. Особлива увага приділяється підвищенню надійності, стабільності і довговічності роботи транзисторів в різних режимах і умовах експлуатації. Найбільш важливим напрямком розвитку електроніки є мініатюризація приладів. Це пов'язано з тим, бурхливим розвитком мікроелектроніки та обчислювальної техніки з цифровою обробкою різної інформації.

У роботі представлена історія створення польових транзисторів, розглянуті фізичні процеси в польових транзисторах, наведено їх класифікацію, наведені основні їх характеристики та режими роботи в різних схемах включення, розглянуто застосування польових транзисторів, перспективи їх розвитку.

Проаналізовано роботу підсилювальних каскадів з різним типом включення транзистора у схему. Розглянуті логічні елементи на польових транзисторах, що використовуються також як динамічні схеми, в яких відбувається короткочасне запам'ятовування інформації з використанням конденсаторів, сформованих ємностями самих транзисторів з індивідуальними каналами. Створення гібридних мікросхем з поліпшеними характеристиками можливо при спільному застосуванні польових і біполярних транзисторів.

Розглянуто будову польового транзистора на основі нанотрубки. Швидкодія такого транзистора набагато перевищує швидкодію кремнієвих транзисторів. За деякими оцінками, нанотрубка може працювати на частоті в 1 ТГц, що в сотні разів більше від швидкості сучасних комп'ютерів. Також нанотрубку можна заповнювати різними речовинами, що в свою чергу може ще більше розширити області застосування нанотранзисторів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Джессі Рассел Польовий транзистор, VSD, 2012. - 80 стор
2. Р. Куей Електроніка на основі нітриду галію / Пер.с англ. / Під ред. д.ф.- м.н. А.Г. Васильєва, М.: Техносфера, 2011. - 592с.
3. Старосольський В.І. Фізика напівпровідникових приладів мікроелектроніки: навч. посібник, М.: Вища освіта, Юрайт-Издат. 2009. - 463 стор
4. Горбацевич А.А. Напівпровідникові гетероструктури та прилади на їх основі / А.А. Горбацевич та ін // Нанотехнології в електроніці / під ред. Ю.А. Чаплигіна.- М. Техносфера, 2005. - С. 172 - 242.
5. Моськатов Е. А. Електронна техніка. Спеціальна редакція для журналу Радіо.- Таганрог, 2004. - 121 стор
6. Walker G.R., Sernia P.C. Cascaded DC-DC converter connection of photovoltaic modules // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2004. – Vol. 19. No. 4. July 2004. – С. 1130-1139.
7. Технічні засоби автоматизації і управління Колосов О. С.2018.– 289 с.
8. Осадчий Е.П., Тихонов В. І. та ін. проектування датчиків для вимірювання механічних величин / під ред. Е. П. Осадчого. - М.: Машинобудування, 1979. – 480 с.
9. https://jnep.sumdu.edu.ua/uk/full_article/3105
10. <https://electric-guide.com/imported-field-effect-transistors-of-the-irf-series-field-effect-transistor-mosfet.html>
11. І.Д. ВОЙТОВИЧ* , В.М. КОРСУНСЬКИЙ** , Ф.Т. ЛАВРИК***
ВУГЛЕЦЕВА НАНОЕЛЕКТРОННА ЕЛЕМЕНТНА БАЗА ІНФОРМАТИКИ
12. Мікропроцесорна техніка [Електронний ресурс] : підручник для студентів спеціальності «Електроніка» / В. Я. Жуйков, Т. О. Терещенко, Ю. С. Ямненко, А. В. Заграничний ; НТУУ «КПІ» ; ред. О. В. Борисов.
13. Ниткоподібні кристали кремнію, германію та їхніх твердих розчинів у сенсорній електроніці [монографія] / А.О.Дружинін, І.П. Островський, Ю.Р. Когут ; Нац. ун-т «Львів. політехніка».