

УДК 621.375.4

## Твердотільні підсилювачі с-діапазону

*Ігнатюк А.В., к.т.н. доц. Кобак М.М.*

### Перспективи розвитку твердотільних підсилювачів.

Твердотільні НВЧ підсилювачі потужності та широкосмугові підсилювачі є важливою ланкою апаратури радіолокаційних систем для різного роду застосувань, тому до них пред'являють особливо високі вимоги. СВЧ підсилювачі потужності, побудовані на основі потужних транзисторів або модулів, - це пристрої, що визначають найважливіші параметри системи, такі як випромінювана і споживана потужність, ширина смуги робочих частот, габарити і маса, довговічність, надійність і вартість.

В 90-х роках ХХ століття вирішення вище перерахованих проблем бачили в застосуванні нових типів транзисторів, що дозволили б значно покращити характеристики та параметри підсилювачів НВЧ.

### Транзистор на гарячих електронах з n-базою.

Відрізняється від звичайного планарного біполярного транзистора тим, що тут виключена інжекція неосновних носіїв заряду в n - базу – дірок – з емітера та колектора, останні виготовляються двошаровими n-p<sup>+</sup> та p<sup>+</sup>-n

відповідно. При цьому дуже тонкі p<sup>+</sup> повністю збіднені шари зовсім не мають дірок, а електрони пролітають їх за рахунок балістичного прольоту (Рис. 1.).

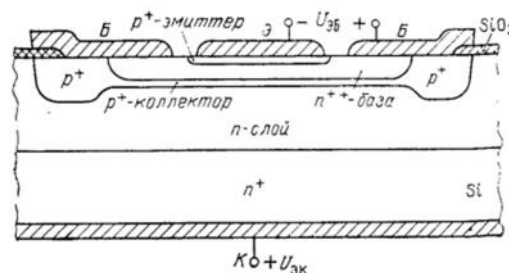


Рис. 1. Структура транзистора на гарячих електронах.

### Гетероструктурний біполярний транзистор.

Відрізняється від звичайного біполярного транзистора тим, що ширина забороненої зони емітера більше ширини забороненої зони бази (Рис. 2.). Саме цим забезпечується близька до ідеальної одностороння інжекція носіїв в базу. Максимальна частота близько 60 ГГц в перспективі до 200ГГц.

### Транзистор з проникною базою.

Має вертикальну структуру. Монокристал GaAsn- типу має омичний контакт колектора та емітера, між ними розміщена база, тонка (0,03 мкм) вольфрамова сітка з

кроком 0,32 мкм, що утворює бар'єр Шотки з напівпровідником.

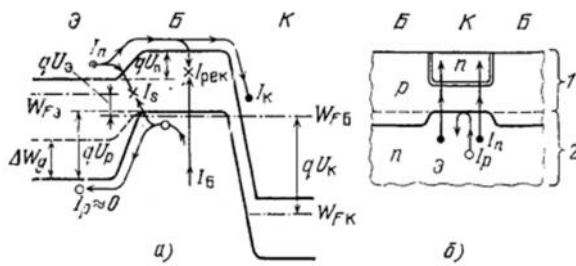


Рис. 2. Гетероструктурний біполярний транзистор. а – діаграма енергетичних зон; б - гетероструктурний біполярний транзистор з оберненою структурою.

Потік електронів що рухається з n-емітера до колектора під дією його позитивного потенціалу, керуються від'ємним потенціалом бази (як у вакуумному тріоді) (Рис. 3.).

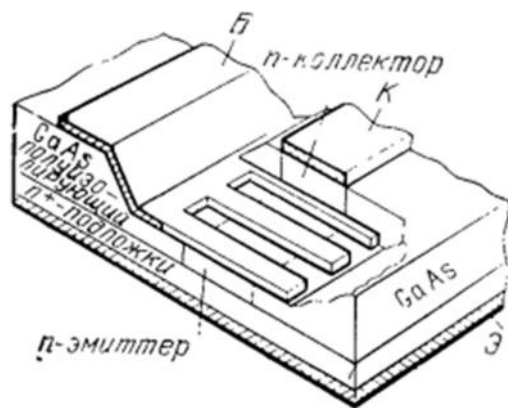


Рис. 3. Транзистор з проникною базою.

Один з найпоширеніших сьогодні типів НВЧ-транзисторів - НВТ-транзистори на основі GaAs. За даними дослідницької фірми iSupply, 47,1% транзисторів, що використовуються в стільникових телефонах, представляли собою

GaAs НВТ. Основні причини цього – одно полярне живлення (у порівнянні з необхідністю в негативній напрузі на затворі для MESFET), а також менша займана площа кристала, оскільки структура транзистора - вертикальна.

Розглянемо типовий GaAs НВТ. Його структура формується на GaAs-підкладці з високим опором (порядку  $10^7$  Ом / см). Колектор утворює n-GaAs-шар з концентрацією домішків  $3 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. База являє собою сильнолегованих p<sup>+</sup>-GaAs область з концентрацією домішків (як правило, берилій або вуглець) близько  $5 \cdot 10^{18}$ - $10^{19}$  см<sup>-3</sup>. Емітер - це слаболегований шар AlGaAs n-типу, ширина забороненої зони якого вища, ніж в GaAs-базі. В області омичних контактів колектора і емітера формують додаткові високолеговані шари. Зрозуміло, наведена структура - максимально спрощена.

Не вдаючись глибоко в фізику роботи приладу, відзначимо, що в силу різної ширини заборонених зон в базі і емітері в районі переходу утворюється розрив кордону валентної зони і зони провідності. В результаті висота потенційного бар'єра для дірок і електронів виявляється різною. Це призводить до збільшення інжекції електронів з емітера в базу і одночасно - до скорочення потоку дірок з бази в емітер. Зростає коефіцієнт ефективності емітера, а разом з ним - і посилення транзистора. Найважливішим наслідком даного ефекту - НВТ-транзистори можна

виготовляти з високолегованої базою і слаболегованим емітером.

Переваги кремнієвих приладів очевидні - це і низька вартість пластин, і відпрацьованість технології, і відносна простота інтеграції аналогових і цифрових схем на одному кристалі. Причому у зв'язку з мінімізацією розмірів елементів частотні характеристики Si-транзисторів в останні 10 років підвищилися настільки, що, володіючи рухливістю електронів (у власному напівпровіднику)  $1350 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{c})$  проти  $8500 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{c})$  для GaAs, вони сьогодні успішно конкурують з останніми в діапазонах до 3 ГГц.

### **Біполярні транзистори з гетеропереходів на основі напівпровідників.**

Одним з найбільш активно освоєваних сьогодні напрямків СВЧ-електроніки - потужні прилади на основі напівпровідникових матеріалів з широкою забороненою зоною. Широка заборонена зона - це великі значення пробивної і робочої напруги, висока робоча температура переходу. У гетероструктурах вона забезпечує значний розрив меж зони провідності.

Перспективними виявились саме пристрої з гетеропереходами, що утворюються на границі розділу двох напівпровідників, що мають різні по ширині заборонені зони. Гетеро переходи дозволяють, наприклад, суттєво підвищити коефіцієнт корисної дії та частотну границю роботи пристрою.

Нітрид галію є найбільш перспективним широкозонним напівпровідниковим матеріалом, як і вся група ІІІ-нітридів. Сукупність властивостей широкозонного матеріалу і можливості формування на основі GaN гетеропереходів дозволяють домогтися унікальних характеристик транзисторів. Як приклад розглянемо параметри транзистора на GaN НЕМТ з вихідною потужністю понад 176 Вт, робочою напругою 63 В, ККД 54% при посиленні 12,9 дБ на частоті 2,1 ГГц. Рекордне на сьогодні значення питомої потужності GaN НЕМТ - 32,2 Вт / мм при ККД 54,8%, робочій напрузі 120 В і частоті 4 ГГц.

В кінці статті наведена таблиця 1 в якій приведені електронні властивості напівпровідникових матеріалів.

Чим більше ширина забороненої зони, тим вище допустима робоча температура і тим більше зсунеться в короткохвильову область спектра робочий діапазон приладів, виготовлених на основі відповідних напівпровідникових матеріалів. Наприклад, максимальна робоча температура для приладів на основі GaN досягає  $350-400^\circ \text{C}$ , для приладів на основі С (алмаз - diamond) досягає  $500-600^\circ \text{C}$  і вище. Ширина забороненої зони добре корелює з температурою плавлення матеріалу. Обидві ці величини зростають із зростанням енергії зв'язку атомів у кристалічній решітці, тому для широкозонних напівпровідникових матеріалів характерні високі температури плавлення, що створює певні

труднощі на шляху створення чистих і структурно досконалих монокристалів таких напівпровідникових матеріалів.

Рухливість носіїв струму значною мірою визначає частотні характеристики напівпровідникових приладів. Для створення приладів НВЧ застосовуються напівпровідникові матеріали, що володіють високими значеннями рухливості носіїв заряду і здатні працювати при високих температурах і високому рівні радіації, що дуже важливо для космічної промисловості.

Таким чином, чим більше ширина забороненої зони, тим стійкіше робота НВЧ транзистора (див. табл. 1) при високих температурах і високому рівні радіації, і чим більше концентрація електронів тим вище щільність струму в перетині каналу

транзистора, що обумовлює високий коефіцієнт його посилення. Чим вище максимальна критична напруженість електричного поля напівпровідникового матеріалу (див. табл. 1), тим вище максимальна напруга стоку НВЧ транзистора (50-100 В) і його пробивна напруга (від 100 до 300 В), що збільшує надійність і термін експлуатації виробу. НВЧ транзистори, виконані по GaN-технології, мають високу питому потужність - до 10 В ті більше на 1 мм ширини затвора, що на порядок підвищує питому вихідну потужність. Все ще проблемними, але поступово вирішуваними завданнями GaN-технології залишаються забезпечення тепловідводу від активної структури кристала і вирощування епітаксійних структур GaN.

Таблиця 1.

Основні електронні параметри напівпровідників.

Властивості матеріала	Одиниці вимірювання	Si	GaAs (AlGaAs/InGaAs)	InP (InAlAs/InGaAs)	3C-SiC*	4H-SiC*	6H-SiC*	GaN (AlGaN/GaN)	C (Diamond)
Ширина забороненої зони, E <sub>g</sub>	еВ при 300К	1,12	1,42	1,34	2,4	3,26	3	3,39	5,47
Рухливість електронів, I <sub>n</sub>	300 К, см <sup>2</sup> /В*с	1500	8500	4600	1000	950	500	2000	2800
Рухливість дірок, I <sub>p</sub>	300 К, см <sup>2</sup> /В*с	600	400	150	40	120	80	200	2100
Швидкість дрейфу електронів при насиченні, v <sub>sat</sub> x 10 <sup>7</sup>	см/с	1,0	2,1	2,3	2,5	2,0	2,0	2,7	1,5-2,0
Критичне електричне поле, E <sub>c</sub>	МВ/см	0,025	0,4	0,5	2,0	2,2	2,5	5,0	20,0
Коефіцієнт теплопровідності, K	Вт/см*К при 300 К	1,5	0,55	0,7	3,0-4,0	3,0-4,0	3,0-4,0	1,3	24,0

Діелектрична проникність, $\epsilon$	-	11,68	12,8	12,5	9,7	10	10	9,5	5,7
CFoM**	-	1	8,5	21	-	250	-	660	75000

\* 3С, 4Н, 6Н – пропоновані кристалічні структури SiC матеріалів;

\*\* CFoM (Combined Figure of Merit) – коефіцієнт якості матеріалу по відношенню до кремнію (Si-Silicon) для потужності та частоти

Раніше для радарів з активною фазованою антенною решіткою АФАР (APAR - Active Phased Array Radars або AESA - Active electronically scanned array) твердотільні підсилювачі виготовлялися на базі GaAs-технології. Алена сьогодні вона має більш низку щільністю потужності (0.5-1.5 Вт /мм, див. табл. 2) у порівнянні з високою щільністю потужності GaNHEMTs технології (4.0-8.0 Вт / мм ширини затвора НВЧ транзистора). Висока щільність потужності НВЧ транзисторів, виконаних за GaN технології дозволяє істотно зменшити габарити і вагу твердотільного підсилювача радара, що дуже важливо для авіаційних і космічних галузей застосувань, де необхідна мінімізація ваги і габаритів радарів, в т. ч. і радарів з АФАР. Наприклад, замість п'яти GaAs LDMOS-підсилювачів можна застосувати тільки один GaN підсилювач, що забезпечує набагато кращі технічні характеристики виробу в цілому. Коефіцієнт теплопровідності матеріалу GaN в 8-

10 разів вище, ніж у GaAs, що дозволяє забезпечити краще і швидке відведення тепла від чіпа ММІСі більш високу щільність потужності, (Див. Табл. 2). Актуальним є вирішення задачі виробництва систем зв'язку і радарів на базі нових продуктів GaN для частотних діапазонів С, Х, Ku.

Твердотільні підсилювачі та інші вироби на базі GaN-технології відкривають широкі перспективи для виробництва новітніх пристроїв і модернізації вже працюючих виробів важливих частотних діапазонах 1-4 ГГц, 2-6 ГГц, 4-12 ГГц, 6-18 ГГц, 2-20 ГГц, які можуть стати конкурентами для ламповим приладів НВЧ (тріоди, тиратрони, магнетрони, клістрони і т. д.). по вихідній потужності, ККД, габаритним розмірам, надійності та ціною. GaN-технологія поступово займає своє місце на ринку військових і космічних систем і зможе замінити частину GaAs ММІС продуктів в прийомно-передаючих модулів АФАР сантиметрового і міліметрового діапазонів.

Таблиця 2.  
 Порівняльна характеристика  
 основних параметрів GaAs та GaN

Параметр	Одиниц і вимірю вання	Ga As	GaN
Густина вихідної потужност і	Вт/мм	0,5 - 1,5	4,0-8,0
Робоча напруга	В/мм	5- 20	28-48
Зворотня напруга	В/мм	20- 40	>100
Максимальна густина напруга	А/мм	~0, 5	~1,0
Коефіцієнт теплопров ідності	Вт/м*К	47	390(z)/49 0(SiC)

### Висновки

Подальше покращення характеристик та параметрів підсилювачів НВЧ можливе тільки за умови використання всіх досягнень напівпровідникової та функціональної електроніки НВЧ.

Досягнення напівпровідникової електроніки пов'язані з покращенням частотних та шумових властивостей дискретних пристроїв, особливо транзисторів. Також як і в будь якій іншій галузі електроніки не припиняється пошук та дослідження нових матеріалів, фізичних ефектів та явищ що значно підвищують ефективність пристроїв

### Література

1. Твердотельные устройства СВЧ в технике связи/ Л.Г. Гассанов, А.А. Липатов, В.В. Марков, Н.А. Могильченко. – М.: Радио и связь, 1988 г.
2. Шахнович И. Твердотельные СВЧ-приборы и технологии. Состояние и перспективы. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2005, №5, с.58–64.
3. Данилин В., Жукова Т. и др. Транзистор на GaN. Пока самый "крепкий орешек". – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2005, №4, с.20–29.
4. Олег Колотун, Усилители СВЧ на основе технологий GaN и GaAs, эволюция технологии Diamond FETs /CHIP NEWS Украина, #2 (122), март, 2013