

Міністерство освіти і науки України
Запорізька державна інженерна академія



Доц. О.П. Головка

МІКРОХВИЛЬОВА ТЕХНІКА

Короткий конспект лекцій

Для студентів ЗДІА

За напрямом підготовки 6.05.08.01 Мікро- та наноелектроніка

Запоріжжя

2014

Зміст

Вступ.....	3
1. Електровакуумні мікрохвильові прилади	7
1.1. Частотні діапазони надвисоких (НВЧ) і вкрай високих (ВВЧ) частот.....	7
1.2. Загальні характеристики високочастотних сигналів і їхнє застосування в медицині.....	7
1.3. Особливості передачі мікрохвильових сигналів.....	8
1.4. Режим хвилі, що біжить, і режим стоячої хвилі.....	11
1.5. Клістриони.....	12
2. Напівпровідникові мікрохвильові прилади.....	18
2.1 Загальні характеристики напівпровідникових мікрохвильових приладів. Негатрони.....	18
2.1 Будова і механізм роботи польового транзистора із затвором Шоткі.....	20
3. Мікросхеми мікрохвильового діапазону.....	26
3.1. Матеріали для інтегральних мікросхем мікрохвильового діапазону.....	26
3.2 Особливості конструкції пасивних елементів НВЧ-мікросхем.....	28
Тести.....	32
Рекомендована література.....	38

Вступ

Курс “Мікрохвильова техніка” є обов’язковим для спеціальностей за спрямуванням “6.05.08.01 Мікро- та наноелектроніка”. Вивчення цього курсу оєнайомлює студентів з фізичними основами роботи та побудовою пристроїв, використувуваних в мікрохвильовій техніці (електроніці надвисоких частот).

Мета дисципліни - надати студентам, що проходять підготовку для кваліфікації бакалавра, необхідні знання і вміння з основ побудови мікрохвильових приладів, особливостей побудови і застосування таких апаратів, з процесів у довгих лініях і мікрополоскових елементах, а також пристроїв генерації і прийому надвисокочастотних сигналів.

В історії розвитку електроніки чітко виражена тенденція підвищення швидкодії електронних пристроїв. Насамперед це пов'язане з потребами радіоелектроніки використання усе більш коротких довжин хвиль. Дійсно, за останні 25-30 років у космічних системах зв'язку й у радіолокації відбувся перехід від метрових до дециметрових, сантиметрових хвиль і інтенсивне освоєння міліметрових хвиль. Цим довжинам хвиль відповідають частоти від 0,3 до 300 ГГц; у радіоелектроніці вони об'єднані в один діапазон – мікрохвильовий діапазон.

Необхідність підвищення частоти електромагнітних коливань і перехід до мікрохвильового діапазону при розробці сучасних радіотехнічних систем визваний тим, що радіохвилі мікрохвильового діапазону мають важливі фізичні особливості. У міру вкорочення довжини хвилі збільшується можливість концентрувати за допомогою антен електромагнітне випромінювання у вузький промінь, що дозволяє створювати дуже економічні системи зв'язку й радіолокаційні станції (РЛС) виявлення й супроводу цілі. При цьому довжина хвилі повинна бути багато менше розмірів об'єкта. Використання гостроспрямованих променів забезпечує зниження взаємних перешкод одночасно працюючих систем, збільшення дальності дії радіосистем і РЛС, високу точність визначення координат об'єктів.

Починаючи із сантиметрових довжин хвиль за рахунок зміни діелектричної проникності повітря з ростом висоти відбувається рефракція хвиль (скривлення траєкторії фронту хвилі). Передача електромагнітної енергії в цьому випадку можлива на відстані, що значно перевищує відстань прямої видимості.

Особливістю є також більша інформативна ємність мікрохвильового діапазону. Це дозволяє значно (до сотень тисяч) збільшити число каналів телефонного й телеграфного зв'язку, організувати багатоканальну передачу широкосмужкових (до 4 МГц) телевізійних сигналів з одночасним підвищенням якості передачі.

Здатність мікрохвильових електромагнітних коливань вільно проходити через іонізовані шари атмосфери дозволяє використовувати їх для систем космічного зв'язку.

Істотною особливістю є зменшення спектральної густини потужності всіх видів перешкод зі збільшенням частоти. Мінімальний рівень прийнятих сигналів у мікрохвильовому діапазоні практично визначається малим рівнем перешкод, що виникають у самих приймаючих пристроях.

Недоліком електромагнітних хвиль короткохвильової частини мікрохвильового діапазону є загасання їх при поширенні в атмосфері через поглинання водяними парами, киснем, а також розсіювання зваженими в атмосфері частками. Це загасання зростає зі збільшенням частоти, і якщо в міліметровому діапазоні є окремі ділянки - «вікна» прозорості - з відносно малим загасанням, то для субміліметрових хвиль сильне поглинання спостерігається у всім діапазоні.

Перераховані фізичні особливості електромагнітних коливань мікрохвильового діапазону, що забезпечують переважне їхнє використання при створенні сучасних радіотехнічних систем, визначають специфіку конструювання мікрохвильових пристроїв. Так, сумірність геометричних розмірів конструкцій елементів і вузлів радіосистем з робочою довжиною хвилі вимагає врахування розподілених параметрів конструкцій

мікрохвильових пристроїв. Оскільки основні характеристики перебувають у прямій залежності від геометричних розмірів конструкції, то часто виникає необхідність застосування жорстких допусків при виготовленні. Крім того, через наявність скін-ефекту (зменшення глибини проникнення струму в провідник зі збільшенням частоти) посилюються вимоги до шорсткості струмонесучої поверхні ліній передачі.

Необхідно також відзначити, що інтенсивність мікрохвильового випромінювання і його шкідливий біологічний вплив вимагають конструктивних заходів для захисту людей від випромінювання.

На першому етапі розвитку радіотехнічних систем мікрохвильового діапазону конструктивно їхня побудова здійснювалася на основі спеціально розроблених генераторних і підсилювальних електровакуумних приладів і хвилеводів. З розвитком напівпровідникового виробництва й розробкою інтегральної технології відбулося становлення мікроелектроніки і її впровадження в перспективні радіотехнічні мікрохвильові пристрої. Насьогодні прогрес у будь-якій області техніки нерозривно пов'язаний з використанням досягнень мікроелектроніки й у першу чергу це стосується мікрохвильової техніки.

Мікрохвильова техніка як засіб зв'язку, одержання, обробки й передачі інформації, виявлення, ідентифікації й супроводу об'єктів, що рухаються, усе більш широко використовується в різних галузях техніки.

Завдяки широкому застосуванню в супутникових, корабельних і авіаційних приймально-передаючих системах мікроелектронних мікрохвильових пристроїв було забезпечене рішення складних завдань: автоматизації процесу прийому й передачі інформації, електронного керування діаграмою спрямованості, створення багатопроменевих антенних решіток і малогабаритної компактної апаратури з виводом інформації на дисплей приймаючого індикатора й друкувальні пристрої. Подальший прогрес мікрохвильової техніки пов'язаний із широким впровадженням цифрових методів передачі інформації, що забезпечують збільшення швидкості її

передачі й інших переваг, а також з освоєнням нових діапазонів частот, зокрема діапазону міліметрових хвиль.

Розвиток мікрохвильової мікроелектроніки йшов в декількох напрямках. Перший - розробка мікросмужкових ліній (МСЛ) передачі. Висока надійність, стійкість до різноманітних впливів, добра відтворюваність параметрів, групові методи виготовлення, малі габарити й маса, можливість автоматизації як розрахунків, так і конструювання й виготовлення визначили широке використання МСЛ і пристроїв на їхній основі при створенні мікрохвильових мікроелектронних пристроїв.

Другий напрямок - мікромініатюризація основних конструктивних вузлів мікрохвильових пристроїв (роз'ємів, з'єднувачів, корпусів і ін.), розробка конструкцій антенних решіток--фазованих (ФАР) і активних фазованих (АФАР). Успіхи в цьому напрямку, наприклад, дозволили виготовити антени діапазону як сантиметрових, так і міліметрових хвиль. При цьому випромінювачі антенних решіток, детектори й підсилювальні каскади виконуються на одній підкладці, тобто антена виходить повністю сумісної із прийомопередатчиком за методами виготовлення й матеріалам, що сприяє зниженню її вартості.

Третій важливий напрямок - розробка напівпровідникових активних приладів, що забезпечують виконання найрізноманітніших функцій: генерування, детектування, посилення мікрохвильових сигналів і ін. Досягнення в розробці інтегральної технології й нових матеріалів для виробництва напівпровідникових приладів дозволили приступити до створення напівпровідникових мікросхем мікрохвильового діапазону. До теперішнього часу досягнуті значні успіхи в розробці й застосуванні напівпровідникових мікросхем на основі арсеніду галію завдяки створенню польових транзисторів із затвором субмікронного розміру, утвореним бар'єром Шотки. При розробці прийомопередатчика на напівпровідникових мікрохвильових мікросхемах ставиться завдання забезпечити виконання максимального числа функцій в одному кристалі.

1 Електровакуумні мікрохвильові прилади

1.1 Частотні діапазони надвисоких (НВЧ) і вкрай високих (ВВЧ) частот

Міжнародний консультативний комітет з радіо в 1975 р. рекомендував наступні частотні границі й назви високих діапазонів частот електромагнітних коливань:

високі частоти (ВЧ) 3 - 30 МГц;

дуже високі частоти (ДВЧ) 30 - 300 МГц;

ультра високі частоти (УВЧ) 300 - 3000 МГц;

надвисокі частоти (НВЧ) 3 - 30 ГГц;

вкрай високі частоти (ВВЧ) 30 - 300 ГГц;

гіпервисокі частоти (ГВЧ) 300 - 3000 ГГц.

До 60-х років до НВЧ відносили ділянку спектра електромагнітних коливань від 30 МГц до 3 000 ГГц, тобто 5 діапазонів: ДВЧ, УВЧ, НВЧ, ВВЧ і ГВЧ. Цим граничним частотам відповідають довжини хвиль від 10 м до 0,1 мм. Сьогодні в радіо- і телевізійній техніці за цими діапазонами збереглася загальна назва надвисоких частот. Однак у медицині ці діапазони називаються строго за рекомендаціями Комісії, щоб уникнути лікарських помилок по застосуванню електромагнітних хвиль у лікуванні й діагностиці.

1.2 Загальні характеристики високочастотних сигналів і їхнє застосування в медицині

У медицині широко застосовуються електромагнітні хвилі діапазонів УВЧ, НВЧ і ВВЧ. У цих діапазонах довжина хвилі ($\lambda = 10 \dots 1 \text{ дм}, 10 \dots 1 \text{ см}, 10 \dots 1 \text{ мм}$) порівнянна з розмірами елементів електричних кіл, тому енергія швидкозмінних струмів у провідниках інтенсивно випромінюється в навколишнє середовище у вигляді електромагнітних хвиль. Таке випромінювання використовується в техніці для передачі інформації (радіо, телебачення, мобільний зв'язок), а в медицині - для різних лікувальних

процедур. Але одночасно неконтрольоване опромінення хвилями цих діапазонів завдає шкоди здоров'ю і його варто уникати. Тому в цих діапазонах конструкції електронних приладів і пристроїв повинні бути такими, щоб їхні електромагнітні поля перебували усередині замкнутих металевих об'ємів.

1.3 Особливості передачі мікрохвильових сигналів

Характер протікання змінного струму змінюється в міру збільшення частоти. Внаслідок збільшення частоти на кілька порядків у порівнянні із частотою струму в електромережі швидкозмінні струми розподіляються по перетині провідника вкрай не рівномірно і витісняються до поверхні провідника. густина струму максимальна на поверхні й експоненційно зменшується вглиб провідника. Поверхневий шар, на товщині якого густина струму убуває в e разів (2,72) називають скин-шаром. Ефект витиснення струму до поверхні провідника пояснюється зростанням індуктивного опору

$$X_L = \omega L = 2\pi f L,$$

де $\omega = 2\pi f$ - кутова частота, s^{-1} ; L - індуктивність провідника, Гн.

Індуктивність тим менше, чим більше радіус провідника. Тому індуктивність і індуктивний опір поверхневого шару провідника менше, ніж внутрішнього шару, і струм протікає саме через поверхневий шар.

Характер передачі енергії електромагнітних коливань також змінюється з ростом частоти. У мікрохвильовому діапазоні енергія поширюється в основному поза провідниками. Провідник або обмежує простір, де поширюється енергія (хвилевід або коаксіальна лінія), або задає напрямок поширення енергії (дводротова або однодротова лінія передачі).

Розглянемо основні типи ліній передачі мікрохвильових сигналів.

Дводротова лінія.

Швидкозмінний струм іде по провідниках, а електромагнітна хвиля поширюється уздовж відкритої дводротової лінії або між провідниками коаксіального кабелю.

Застосування відкритих дводротових ліній і коаксіальних кабелів у діапазоні НВЧ має обмеження. З укороченням довжини хвилі відстань між провідниками дводротової провідної лінії доводиться зменшувати, щоб знизити втрати енергії на випромінювання. У результаті збільшується небезпека електричного пробоя при передачі по лінії великих потужностей. Крім того, посилюються вимоги до точності виготовлення самої лінії. Тому неекранована дводротова провідна лінія звичайно використовується на хвилях, довше за 2...5 м, і обмежено - на дециметрових хвилях (ДВЧ діапазон).

Коаксіальний кабель - це екранована лінія передачі, що широко застосовується в УВЧ і НВЧ діапазонах. Однак тут з підвищенням частоти збільшуються втрати в металевих провідниках, особливо у внутрішній жилі кабелю й у діелектрику, що необхідний для кріплення цієї жили. При вкороченні довжини хвилі доводиться зменшувати відстань між внутрішнім і зовнішнім провідниками кабелю. У результаті, щоб уникнути пробоя, доводиться зменшувати передавану потужність. Тому коаксіальні кабелі застосовують на хвилях, довше за 8...10 см (УВЧ і довгохвильова частина НВЧ діапазонів).

Хвилеводи.

Для передачі хвиль із меншою довжиною хвилі застосовують хвилеводи. Хвилеводи виготовляють у вигляді порожніх металевих труб різного поперечного перерізу: прямокутного, круглого, П-образного, Н-образного.

Струм іде в поверхневому шарі хвилеводу, а електромагнітні хвилі - усередині хвилеводу.

Переваги хвилеводів: простота форми й твердість конструкції, значне зменшення втрат переданої потужності.

Все електричне поле поміщається усередині хвилеводу, тому немає втрат енергії на випромінювання (звідси - зменшення електромагнітного забруднення навколишнього середовища й зниження небезпеки для користувача). На відміну від коаксіального кабелю усередині хвилеводу як діелектрик використовується повітря або вакуум, тому втратами в діелектрику можна знехтувати. Оскільки в них немає ще й центрального провідника, те пробивна міцність хвилеводів набагато вище, ніж коаксіального кабелю. Крім того, у них менше ще й втрати в стінках у порівнянні з коаксіальним кабелем, у якому по внутрішньому провіднику протікає струм великої густини при одній і тій же довжині хвилі й однаковій передаваній потужності. Наприклад, у діапазоні 5...12 см загасання хвилі у хвилеводі становить 0,0005% потужності, а в коаксіальному кабелі - 26%.

Переваги хвилеводів в УВЧ і НВЧ діапазонах очевидні. Однак на ще більш коротких хвилях проявляються їхні недоліки. Поперечний переріз хвилеводу зменшується, тому зменшується пробивна міцність, а отже, доводиться знижувати передану потужність. Втрати в стінках хвилеводу зростають. Істотний недолік хвилеводів - залежність швидкості поширення хвилі від частоти (дисперсія). Це призводить до спотворення сигналу й обмеженню смуги пропускання.

Смужкова лінія передачі мікрохвильового сигналу.

У цей час в якості лінії передачі НВЧ сигналів застосовують смужкові (стрічкові) лінії передачі.

Смужкова лінія складається з металевих стрічок, простір між якими заповнено або повітрям, або твердим діелектриком. Такий хвилевід не є повністю екранованим, однак випромінювання з нього є невеликим.

Переваги смужкових ліній: менші габарити, простота виготовлення й більша ширина смуги пропускання.

1.4 Режим хвилі, що біжить, і режим стоячої хвилі

Для збудження у хвилеводі електромагнітної хвилі необхідно підвести до нього від генератора високочастотну потужність.

Звичайно генератор зв'язується із хвилеводом коаксіальним кабелем. Зовнішній провідник кабелю приєднується до стінки хвилеводу, а центральний провідник кінчається штирем, що розташовують усередині хвилеводу паралельно електричним силовим лініям в області максимуму електричного поля (електричний зв'язок).

Може застосовуватися магнітний зв'язок. Тоді центральний провідник коаксіального кабелю з'єднується з одним кінцем так званої петлі зв'язку, а другий кінець цієї петлі замикають на стінку хвилеводу.

Якщо електромагнітна хвиля поширюється по хвилеводу від генератора до навантаження й повністю поглинається в навантаженні, то такий режим передачі називається *режимом хвилі, що біжить*.

У цьому випадку коефіцієнт відбиття від навантаження дорівнює нулю.

Якщо замість навантаження замкнути хвилевід накоротко, то вся потужність відіб'ється назад і у вигляді відбитої хвилі буде поширюватися по хвилеводу назад до генератора. В результаті у хвилеводі встановлюється *режим стоячої хвилі*.

У цьому випадку коефіцієнт відбиття від навантаження дорівнює одиниці. Довжина хвилі у хвилеводі λ_x відрізняється від довжини хвилі того ж електромагнітного поля λ у вільному просторі, (вона завжди більше). На відстані $\lambda_x/4$ від короткозамикача й далі через кожні півхвилі убік генератора перебувають максимуми електричного поля, рівні подвоєній амплітуді хвилі, що біжить. Біля короткозамикача й через кожні пів хвилі убік генератора перебувають мінімуми електричного поля, що дорівнюють нулю.

У проміжних випадках, коли від навантаження відбивається тільки частина падаючої потужності, у хвилеводі теж утвориться стояча хвиля, але в

мінімумах цієї хвилі поле не дорівнює нулю, а в максимумах воно більше амплітуди хвилі, що біжить, але менше подвоєної амплітуди.

Стоячу хвилю у хвилеводі характеризують коефіцієнтом стоячої хвилі напруги КСХН, що дорівнює відношенню напруг поля в максимумі й мінімумі хвилі.

$$\text{КСХН} = U_{\max} / U_{\min}.$$

КСХН = 1 - для хвилі, що біжить;

КСХН > 1 - для стоячої хвилі.

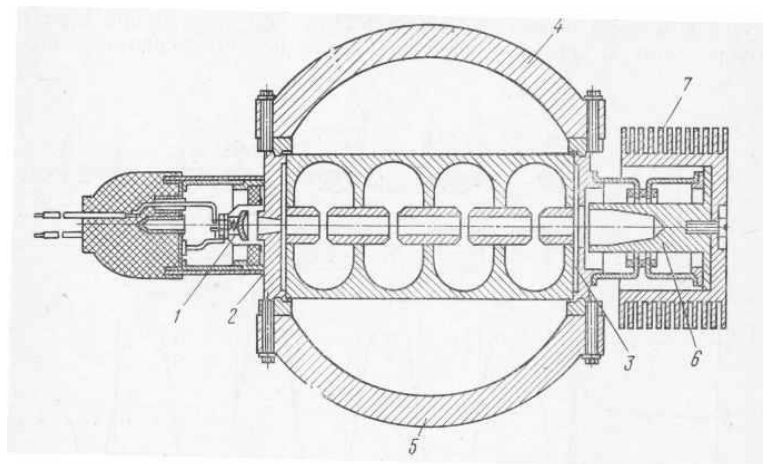
При КСХН = 1 навантаження ідеально погоджене із хвилеводом. Узгодження вважається добрим, коли КСХН = 1,05 - 2,0. При КСХН = 2 від навантаження відбивається тільки 11% падаючої потужності.

1.5 Клістри

В електронних лампах здійснюється електростатичне управління струмом. Використання таких ламп в діапазоні надвисоких частот (НВЧ) обмежується малосигнальним підсилювальним режимом внаслідок зменшення з ростом частоти їх вхідного активного опору та коефіцієнта корисної дії. Тому в діапазоні НВЧ використовують інший спосіб управління струмом – динамічне управління шляхом створення швидкісно-модульованного потоку електронів між катодом та колектором.

Найбільш відомі мікрохвильові прилади, дія яких ґрунтується на явищі швидкісної модуляції електронного потоку – клістри. У сучасному клістрі, крім катода, елементів електронної оптики, що забезпечують фокусування й підтримку електронного потоку, і колектора, що сприймає електронний потік після його використання, важливою частиною є об'ємні резонатори, поле яких необхідно для швидкісної модуляції електронів і відбору

енергії від згрупованого електронного потоку (рис.1.1). Об'ємні резонатори з'єднуються пролітними трубами, у яких потік електронів переміщується від одного резонатора до іншого.



1 - електронна гармата (катод); 2,3 – магнітні диски; 4,5 – постійні магніти; 6 – колектор; 7 – радіатор повітряного охолодження

Рисунок 1.1 – Конструкція пролітного клістрона з чотирма резонаторами

Потік електронів, що виходить з електронної гармати, потрапляє в зазорі вхідного резонатора під дію НВЧ електромагнітного поля. Швидкість електронів, що проходять змінне поле в його прискорюючому напівперіоді, збільшується, а тих, що проходять поле в його гальмуючому напівперіоді – зменшується. Так відбувається модуляція швидкості електронного потоку. При подальшому дрейфі потоку загальмовані електрони відстають, а прискорені – їх наздоганяють. В результаті потік рівномірної густини, що вийшов з катоду, набуває модуляції за густиною внаслідок впливу НВЧ поля. Групи електронів різної густини по чергово досягають вихідного резонатора, на стінках якого індукують електричні заряди. Індуковані заряди випромінюють вихідне електромагнітне поле, частота якого співпадає з частотою вхідного поля, а потужність є збільшеною за рахунок відбору електронами енергії прискорюючого статичного електричного поля між катодом і колектором.

Значна довжина електронного потоку в багаторезонаторних пролітних клістронах, крім первинної електронної оптики біля катода, вимагає

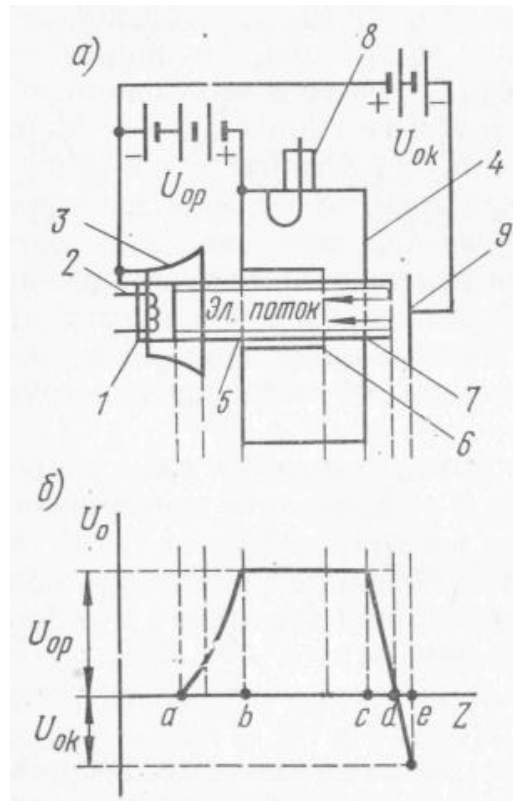
спеціальних мір для подальшого фокусування потоку. Таке фокусування можна здійснювати за допомогою соленоїдів, постійних магнітів або електростатичних лінз. Останнім часом найбільш широко застосовується періодичне (магнітне або електростатичне) фокусування. При магнітному періодичному фокусуванні можна значно знизити вагу й габарити постійних магнітів, а при електростатичному - забезпечити підтримку електронного потоку великої довжини, що неможливо при звичайному електростатичному фокусуванні.

Клістриони насамперед класифікують за їх застосуванням. У прийомних пристроях гетеродинах або в передавальних пристроях збудниках застосовуються так називані малопотужні генераторні клістриони. У передавальних пристроях для введення частот, що модулюють, використовуються перетворювальні клістриони або змішувачі.

Помножувальні клістриони застосовуються в передавальних пристроях при використанні принципу стабілізації частоти в попередніх каскадах, що працюють на більш низькій частоті. Для посилення потужності використовуються клістриони - підсилювачі, які залежно від рівня потужності підрозділяються на малопотужні, середньої потужності й великої потужності або потужні.

Далі клістриони підрозділяють за способами використання електронного потоку. У так званих відбивних клістродах є тільки один резонатор і замість колектора застосований електрод-відбивач із негативним стосовно катода потенціалом, що створює гальмуюче поле для повернення потоку в резонатор.

Схему конструкції відбивного клістрода та розподіл потенціала між його електродами наведено на рис. 1.2. На рис. 1.2, б зазначено: U_{op} — постійна напруга на резонаторі, що прискорює електрони на ділянці ab ; U_{OK} — негативна відносно катода напруга відбивача, що створює гальмуюче поле на ділянці ce . Як видно з рисунка, потенціал у точці d виявляється рівним нулю. У цій точці при відсутності коливань електрони повертаються назад до резонатора.

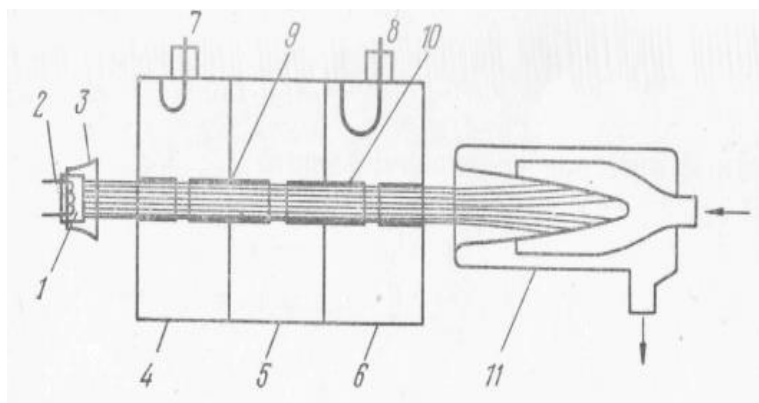


1 — катод; 2 — підігрівник катода; 5 — фокусуєчий електрод;
 4 — об'ємний резонатор; 5 — прискорююча сітка резонатора; 6 і 7 — сітки, що
 обмежують зазор резонатора; 8 — коаксіальний вивід резонатора;
 9 — відбивач
 а — схема конструкції; б — розподіл потенціала між електродами

Рисунок 1.2 - Схема конструкції відбивного клістрона

У пролітних клістронах може бути багато резонаторів і є односпрямований рух електронів. Пролітні клістри розрізняються за кількістю використовуваних резонаторів: дворезонаторні, трирезонаторні, чотирьохрезонаторні і т. д. На рис. 1.3 наведено схему найпростішого багаторезонаторного клістрона - трьохрезонаторного.

На рисунку зображені зазори резонаторів без сіток, тобто так називані безсіткові зазори, звичайно застосовувані в пролітних клістронах значної потужності. Зображена конструкція дозволяє для фокусування потоку використання постійного магнітного поля, спрямованого вздовж вісі електронного потоку. Це поле може створюватися соленоїдом або постійними магнітами, які не показані на рисунку.



1 — катод; 2 — підігрівник; 3 -фокусуючий електрод; 4, 5, 6 - вхідний, проміжний і вихідний резонатори, що становлять резонаторний блок клістрона; 7 — коаксіальний вхід для збудження клістрона; 8 — коаксіальний вихід для виводу генерованої енергії; 9, 10 — перші й друга пролітні труби; 11 — охолоджуваний водою колектор для розсіювання електронного потоку
Рисунок 1.3 - Схема конструкції найпростішого багаторезонаторного клістрона

Основні параметри безсіткового зазору

У безсітковому зазорі виникає радіальна складова електромагнітного поля. Тому окрім корисної модуляції швидкості електронів вздовж вісі електронного потоку відбувається також модуляції швидкості електронів в радіальному напрямку, що призводить до розфокусування потоку. З урахуванням ослаблення поля середню за радіусом величину коефіцієнта взаємодії (зв'язку) електронного потоку з резонатором у безсітковому зазорі, M , можна визначити як

$$M = m \cdot m_{ab}, \quad m = \frac{\sin \frac{\zeta_{d0}}{2}}{\frac{\zeta_{d0}}{2}} \quad (1.1)$$

де m - коефіцієнт зв'язку електронного потоку для сіткового зазору;

m_{ab} — поправочний коефіцієнт, що враховує ослаблення поля внаслідок відсутності сіток;

ζ_{d0} - кут прольоту електронів

$$\zeta_{d0} = \omega \cdot \tau; \quad (1.2)$$

$\omega = 2\pi f$ — кругова частота, s^{-1} ;

τ – час прольоту електронів, с.

Для зручності розрахунків за формулою (2.1) на рис. 1.4 наведено графік функції $m_{ab} = f_2(\zeta_{d0}, b/a)$ для двох різних значень $b/a = 1$ і $b/a = 0,8$.

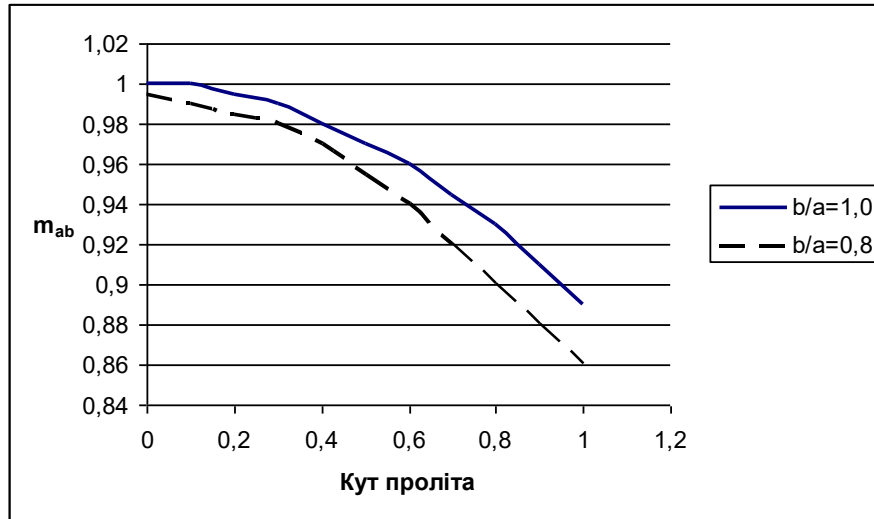


Рисунок 1.4 – Графік функції $m_{ab} = f_2(\zeta_{d0}, b/a)$

Як видно з рис. 1.4, при зменшенні заповнення електронним потоком співвісних труб, що утворюють безсіткову щілину резонатора, коли край потоку віддаляється від поверхні труб, коефіцієнт m_{ab} падає. Цей ефект добре відомий із практики експлуатації пролітних клістронів, у яких збільшення фокусуєчого магнітного поля, що супроводжується стиском діаметра електронного потоку, зменшує посилення клістрона. Він пояснюється ослабленням осьового електричного поля в зазорах резонаторів у міру наближення до осі пролітних труб. В безсітковому зазорі електронний потік шунтує резонатор. Реактивна складова шунтуючої провідності електронного потоку впливає тільки на настройку резонатора. Важливим параметром клістрона є активна складова цієї провідності G_e

$$G_e = \frac{I_0}{U_0} \cdot \Psi(\zeta_{d0}, \zeta_{a0}, \zeta_{b0}), \quad (1.3)$$

$$\text{де } \Psi(\zeta_{d0}, \zeta_{a0}, \zeta_{b0}) = \frac{M^2}{2} \left[\left(1 - \frac{\zeta_{d0}}{2} \operatorname{ctg} \frac{\zeta_{d0}}{2} \right) + \left(\frac{\zeta_{a0}^2}{\sqrt{4 + \zeta_{a0}^2}} - \frac{\zeta_{b0}^2}{4} \right) \right]; \quad (1.4)$$

I_0 – струм, А;

U_0 напруга, що прискорює електрони, В;

ζ - відповідний кут проліту електронів.

Активний шунтуючий опір

$$R_e = \frac{1}{G_e}, \text{ Ом.}$$

2 Напівпровідникові мікрохвильові прилади

2.1 Загальні характеристики напівпровідникових мікрохвильових приладів. Негатрони

Напівпровідникові діоди й тріоди виконують у пристроях НВЧ різноманітні функції, включаючи детектування, генерування, посилення коливань НВЧ, множення й змішання частот, складення й розподіл потужності НВЧ.

Розроблено кілька типів діодів і тріодів, що працюють на різних фізичних принципах. Більшість напівпровідникових НВЧ діодів та інших пристроїв мають падаючу ділянку ВАХ, тобто в певних межах величини електричної напруги такі пристрої характеризуються негативною величиною опору v або провідності. За цією ознакою їх часто називають «негатронами» (табл. 2.1).

Використання напівпровідникових діодів дозволяє створювати електронні пристрої, що працюють у діапазоні частот до 300 ГГц.

З огляду на особливості функціонування й робочих діапазонів частот, конструктивне оформлення діодів НВЧ повинно забезпечити мінімальні паразитні ємності корпусів C_k , індуктивності виводів L_s і зручний монтаж у смужковій конструкції.

Частіше використовуються металокерамічні й металоскляні корпуса патронного й таблеткового типу. Широке застосування одержали безкорпусні

конструкції діодів з поверхнею, захищеною плівкою оксиду або органічного захисного покриття, із планарними балковими виводами. Такі діоди встановлюються безпосередньо на МСЛ.

Таблица 2.1 – Класифікація негатронів



2.1 Будова і механізм роботи польового транзистора із затвором Шоткі

Розроблено польові й біполярні транзистори НВЧ.

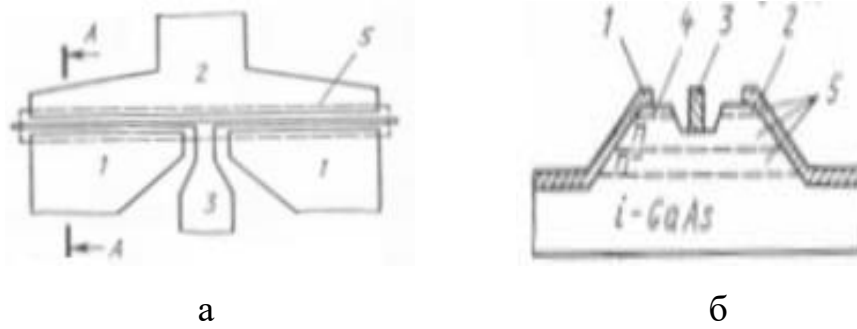
Найпоширенішими є польові транзистори з бар'єром Шоткі.

Транзистор із затвором на основі бар'єра Шоткі є надшвидкодiючим польовим транзистором. Як і в польових транзисторах інших типiв, у його роботi використовуються тiльки основнi носiї заряду, тобто це - унiполярний транзистор. Створення й удосконалювання польових транзисторiв iз затвором Шоткi (ПТШ), тобто iз затвором на основi контакту метал- напiвпровiдник, зiграло вирiшальну роль у появі й розвитку iнтегральних мiкросхем НВЧ-дiапазону. ПТШ є основним активним елементом надшвидкодiючих напiвпровiдникових мiкросхем i найбільш складним з погляду технологiї.

Спроби використання кремнiєвих структур для реалiзацiї мiкросхем НВЧ-дiапазону не привели до позитивних результатiв внаслiдок того, що питомий опiр пiдкладок напiвiзольюючого кремнiю становить не бiльше 10^4 Ом·см i в сформованих на них погоджуванiх ланцюгах мають мiсце занадто великi втрати у дiапазонi НВЧ. У цей час ПТШ виготовляють переважно на монокристалiчному арсенiдi галiю. Вибiр арсенiду галiю обумовлений тим, що в порiвняннi iз кремнiєм вiн має високу якисть напiвiзольюючої пiдкладки ($\rho = 10^6 \dots 10^8$ Ом·см), в 5...6 разiв бiльш велику рухливiсть електронiв, бiльшу ширину забороненої зони. Це дає можливiсть його використання в широкому iнтервалi робочих температур та значно бiльшу стiйкiсть до дiї iонiзуючих випромiнювань, а також можливiсть працювати практично у всьому дiапазонi частот, включно з оптичним.

Порiвняно з iншими напiвпровiдниковими сполуками, такими, як фосфiд iндiю InP, антимоунд iндiю InSb, арсенiд-фосфiд галiю $GaAs_xP_y$, $Ga_x In_y As$, що мають хорошi електрофiзичнi параметри та є придатними для реалiзацiї мiкросхем НВЧ, арсенiд галiю вигiдно вiдрiзняється тим, що вже в цей час налагоджений промисловий випуск структур великого дiаметра, що задовольняють вимогам серiйного виробництва iнтегральних мiкросхем НВЧ.

На рисунку 2.1 представлена найпоширеніша конструкція ПТШ.



1 - витік; 2 - стік; 3 - затвор; 4 - контактний n^+ -шар GaAs; 5 — активна область

а — топологія ПТШ; б — меза-структура ПТШ із повітряною ізоляцією

Рисунок 2.1 - Топологія польового транзистора Шоткі й перетин області його каналу

При виготовленні транзистора із затвором Шоткі на напівізолюючу підкладку арсеніду галію осаджують епітаксійну плівку n-GaAs (активний шар з концентрацією донорів $n \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$) товщиною близько 0,2 мкм, що служить каналом польового транзистора (рис. 2.2).



В – витік, З – затвор, С - стік

Рисунок 2.2 - Структура польового транзистора із затвором Шоткі

Іноді між напівпровідниковою підкладкою й епітаксійним шаром вводиться буферний шар з концентрацією донорів $n_d \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Буферний шар

обмежує дифузію домішки з підкладки. На активний епітаксійний шар за допомогою фотолітографії наносять три металевих контакти (рис. 1.2): витік В, стік С. Між витоком і стоком розташований інший електрод - З, називаний затвором. Звичайно довжина затвора L становить $0,5...0,7$ мкм, а проміжок витік - стік становить 2 мкм.

Звичайно в підсилювачі транзистор включають за схемою із загальним джерелом. На рисунку 2.3 показано включення ПТШ по постійному струму.

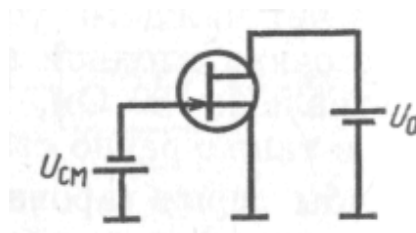


Рисунок 2.3 - Схема включення польового транзистора по постійному струму

Принцип дії транзистора із затвором Шоткі трохи відрізняється від принципу дії польових транзисторів інших типів. Як видно з рисунка 1.3, між витоком і стоком ПТШ включене джерело постійної напруги U_0 . В результаті в активному шарі транзистора створюється електричне поле, що викликає дрейф електронів по каналу від витока до стоку. Між затвором і витоком включене джерело постійної напруги $U_{зм}$, що замикає бар'єр Шоткі, тому в області бар'єра утворюється подвійний заряджений шар: позитивний у напівпровіднику, негативний у металі. Позитивно заряджений шар створюється іонізованими донорами, тут середня концентрація електронів істотно менша за концентрацію донорів. Негативно заряджений шар утворюється в результаті нагромадження електронів в електроді затвора. Картина тут приблизно така ж, як у випадку різкого р-п-переходу.

Шар під затвором, збіднений електронами, зменшує висоту каналу.

Струм, що протікає через канал у напрямку від витоку до електрода стоку, створює спадання напруги вздовж каналу, у результаті чого частина бар'єра

Шоткі, розташована ближче до стоку, виявляється сильніше зміщеною у зворотному напрямку, чим інша частина (рис.2.4).

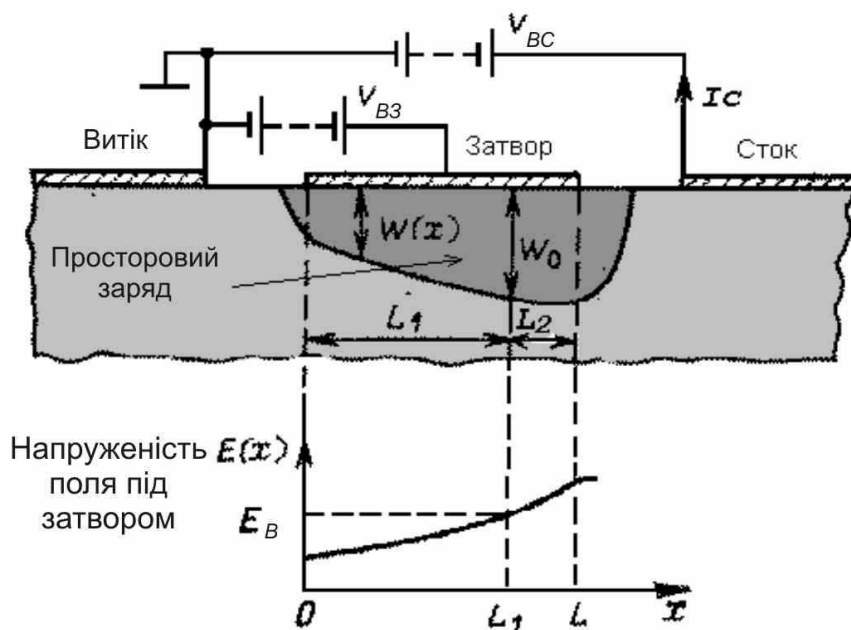


Рисунок 2.4 – Схема поперечного переріза ідеального польового транзистора із затвором Шоткі із просторовим зарядом $E(x)$, що управляє струмом стоку.

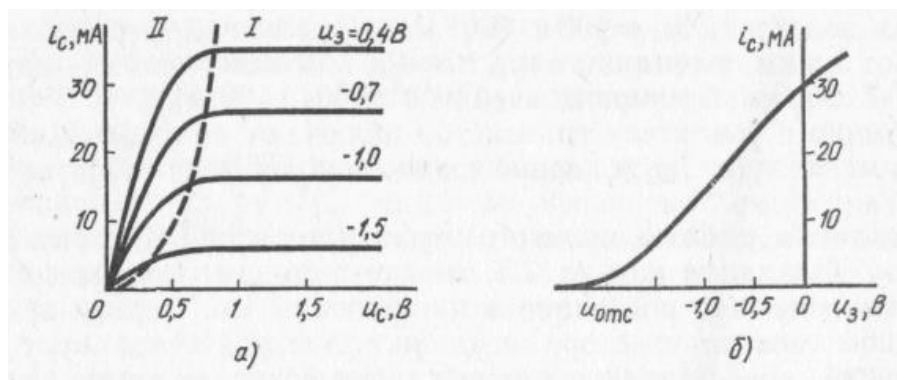
Це призводить у цій частині каналу до зміни товщини шару об'ємного заряду. Навіть при нульовому потенціалі на затворі при відповідному збільшенні струму в каналі внаслідок розширення області об'ємного заряду поблизу електрода витіка може перекривати весь канал і досягти ізолюючої підкладки. При цьому відбудеться насичення струму, що потім залишається незмінним при подальшому збільшенні напруги стоку U_{BC} . Зі збільшенням зворотного зміщення на електроді затвора буде відбуватися додаткове збільшення ширини області просторового заряду в напрямку до стоку, що призведе до збільшення опору каналу. Після захоплення об'ємним зарядом усього каналу, що відбувається при певній нарузі на затворі $U_{B3} = U_3$, струм у приладі буде відсутній - транзистор зачиняється.

Якщо крім постійної напруги $U_{зм}$ до затвора прикласти змінну напругу $U_3(t)$, то відповідно до зміни цієї напруги змінюється ефективна висота каналу $h_{еф}$, а отже, і струм стоку:

$$i_c = j_c h_{еф} W, \quad (2.1)$$

де j_c - густина струму стоку, А/м²;

W – ширина структури ПТШ, м (дивись рисунок 2.2).



а – вихідна, б - перехідна

Рисунок 2.5 - Статичні вольт-амперні характеристики ПТШ

Як і у випадку біполярних транзисторів, на вихідних характеристиках ПТШ $i_c(U_c)$ виділяють дві ділянки — зі слабкою (I) і сильною (II) залежністю струму стоку i_c від U_c . З перехідної характеристики $i_c(U_3)$ видно, що робочим діапазоном зміни напруги на затворі є ділянка негативних напруг u_3 : від напруги відсікання $U_{відс}$ до напруги відкриття бар'єра Шоткі.

Хід залежностей, зображених на рис. 2.5, а, пояснюється в такий спосіб. При малих напругах на стоці (ділянка II) канал подібний до опору $R_{кн}$, що не залежить від u_c , але є функцією u_3 . Дійсно, зі зростанням модуля u_3 зменшується площа перетину каналу й, отже, зростає $R_{кн}$.

При досить великих U_c опір $R_{кн}$ стає залежним від u_c внаслідок нелінійності характеристики дрейфової швидкості електронів $v(E)$ (рис. 2.6), оскільки

$$R_{\text{KH}} = l_{\text{KH}} / (q_0 n \mu_n(E) \cdot h_{\text{эфф}} \cdot W),$$

де l_{KH} - довжина каналу, м; q_0 - заряд електрона Кл; n - концентрація електронів, м^{-3} ; $\mu_n(E)$ - рухливість електронів, $\text{м}^2 / \text{В} \cdot \text{с}$.

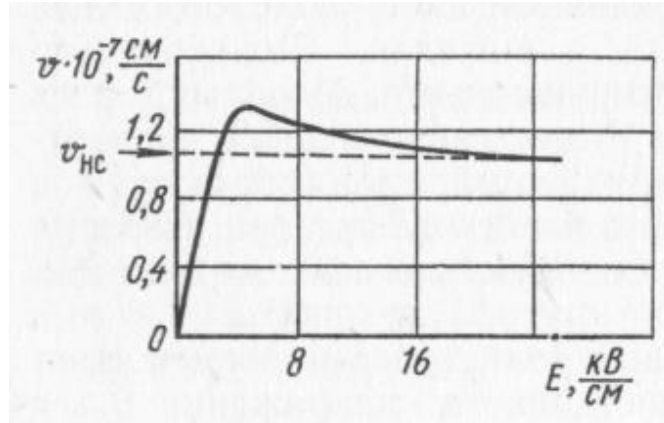


Рисунок 2.6 - Залежність середньої дрейфової швидкості електронів від напруженості електричного поля в каналі польового транзистора

Зі збільшенням u_c зростає напруженість поля E в каналі й падає рухливість електронів $\mu_n = v/E$. В області I струм стоку практично не залежить від u_c , але є функцією u_z . Зростання i_c зі зменшенням модуля u_z пояснюється збільшенням $h_{\text{эфф}}$, що впливає з виразу (1.1). Миттєва напруга на стоці $u_c(t)$ може змінюватися від нуля до напруги пробою $U_{\text{пр}}$. При негативній нарузі на затворі струм затвора малий (десятки - сотні мікроампер).

Залежності струму польового транзистора від напруги нагадують вольтамперні характеристики біполярних транзисторів. Сімейство вихідних кривих, параметром яких є напруга на затворі $U_{\text{вз}}$, аналогічна сімейству кривих колекторного струму I_k при різних значеннях струму емітера (у біполярних транзисторах управління приладом здійснюється струмом, у польових - полем).

Об'ємна тривимірна збіднена носіями заряду область, керована напругами на електродах, визначає еквівалентну схему транзистора (рис. 2.7), а також залежності елементів еквівалентної схеми від напруг.

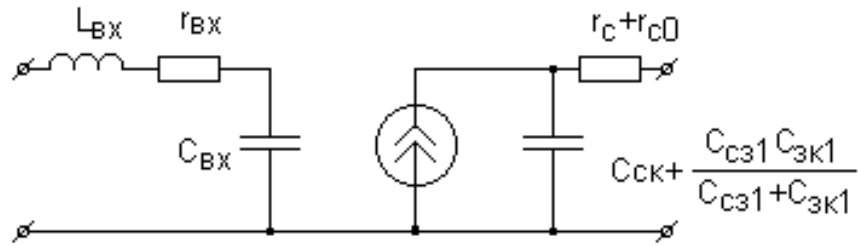


Рисунок 2.7 – Еквівалентна електрична схема вхідного ланцюга польового транзистора із затвором Шоткі

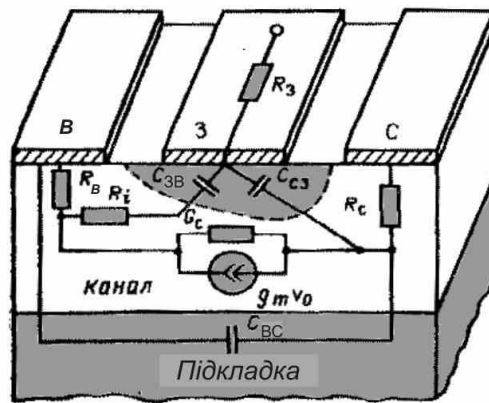


Рисунок 2.8 - Розташування елементів еквівалентної схеми польового транзистора із затвором Шоткі у фізичній конструкції

3 Мікросхеми мікрохвильового діапазону

3.1 Матеріали для інтегральних мікросхем мікрохвильового діапазону

У розробці гібридних мікросхем мікрохвильового діапазону із використанням навісних активних елементів, у тому числі у вигляді безкорпусних кристалів, досягнуті досить високі результати.

Однак незважаючи на це в останні роки їх витісняють інтегральні мікросхеми мікрохвильового діапазону.

Цей напрямок електроніки відрізняється тим, що усі компоненти мікросхем і погоджувальні ланцюги формуються на поверхні й в об'ємі напівпровідникового кристала в єдиному технологічному циклі за допомогою інтегральної технології. Підвищений інтерес до напівпровідникових мікрохвильових мікросхем обумовлений такими їхніми перевагами, як мінімальні розміри й маса, більш висока надійність, ніж гібридних мікросхем, добрі характеристики мікрохвильових мікросхем при мінімальній матеріалоемності, трудомісткості й вартості в умовах масового виробництва.

Спроби використання кремнієвих структур для реалізації мікрохвильових мікросхем не привели до позитивних результатів внаслідок того, що питомий опір підкладок напівізолюючого кремнію становить не більше 10^4 Ом·см, внаслідок чого в сформованих на них погоджувальних ланцюгах у мікрохвильовому діапазоні мають місце занадто великі втрати.

Насьогодні найбільше поширення мають інтегральні арсенід-галієві мікросхеми мікрохвильового діапазону. Інтерес до арсеніду галію обумовлений тим, що в порівнянні із кремнієм він має високу якість напівізолюючої підкладки ($\rho = 10^6 \dots 10^8$ Ом·см), в 5...6 разів більшу рухливість електронів, більшу ширину забороненої зони. Це обумовлює можливість його використання в широкому інтервалі робочих температур та значно більшу стійкість до дії іонізуючих випромінювань, а також можливість працювати практично в усьому діапазоні частот, включно з оптичним.

У порівнянні з іншими напівпровідниковими сполуками, такими, як фосфід індію InP, антимонід індію InSb, арсенід-фосфіди галію $GaAs_xP_y$ та індію Ga_xIn_yAs , що мають добрі електрофізичні параметри й придатні для реалізації мікрохвильових мікросхем, арсенід галію вигідно відрізняється тим, що вже в цей час налагоджений промисловий випуск структур великого діаметра, що задовольняють вимогам серійного виробництва мікрохвильових мікросхем.

Вирішальне значення для появи й розвитку мікрохвильових мікросхем мало створення й удосконалювання польових транзисторів із затвором Шоткі (ПТШ) на арсеніді галію, тобто із затвором на основі контакту метал - напівпровідник. ПТШ є основним активним елементом напівпровідникових мікросхем і найбільш складним з погляду технології. На рис. 3.1 представлено найпоширенішу конструкцію ПТШ.

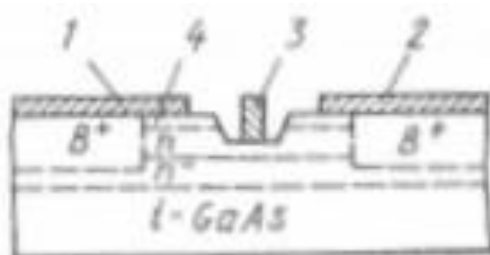


Рисунок 3.1 – Приклад конструкції польового транзистора із затвором Шоткі

Як пасивні елементи мікросхем найчастіше використовуються діоди Шоткі, конденсатори типу метал - діелектрик - метал і резистори; погоджувальні ланцюги звичайно реалізуються у вигляді несиметричних мікросмужкових ліній на основі гальванічно нанесених плівок золота.

3.2 Особливості конструкції пасивних елементів мікрохвильових мікросхем

Конструктивно й технологічно більша частина пасивних елементів інтегральних схем пов'язані з міжелементними з'єднаннями - мікросмужковими лініями.

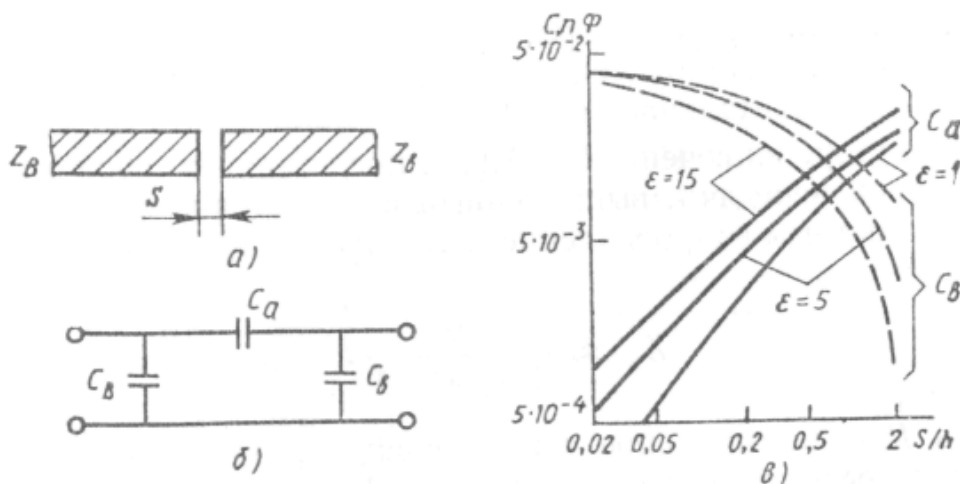
Мікросмужкова лінія передачі (МСЛ) – це провідник стрічкового типу прямокутного перетину, розташований на підкладці з високою діелектричною проникністю, на звороті якої розташований заземлений металевий екран.

МСЛ широко використовується в якості таких пристроїв, як відгалужувачі, дільники потужності, фільтри, фазообертачі. Вона характеризується рядом

параметрів: хвильовим опором, коефіцієнтом втрат, граничною переданою потужністю, довжиною хвилі і її дисперсією.

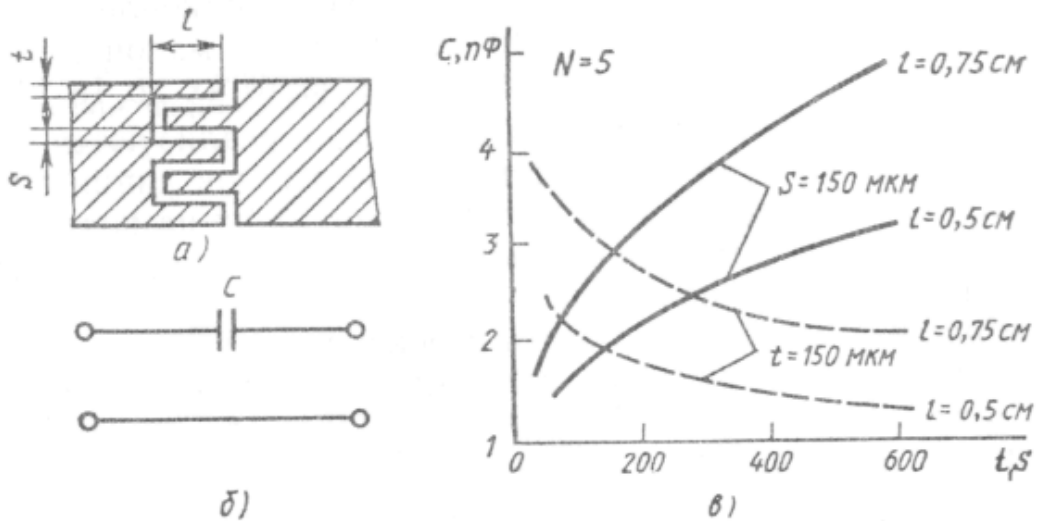
Резистори знаходять широке застосування в мікросхемах мікрохвильового діапазону: дільниках, формувачах фаз, підсилювачах, детекторах, як схемні елементи, кінцевих навантажень. Залежно від призначення мікросхеми резистори можуть мати широкий діапазон номіналів: від десятків ом до десятків мегом. Залежно від номіналу й величини розсіюваної потужності, змінюється конструктивне виконання резисторів.

Конденсатори. У мікросхемах мікрохвильового діапазону широке поширення мають конденсатори із зосередженими параметрами, використовувані в якості блокувальних, перехідних, а також у складі ряду пристроїв, наприклад фільтрів. Залежно від призначення і ємності конденсатори виконуються у вигляді планарної або багат шарової конструкції. Найпростішим видом планарної конструкції конденсатора для мікрохвильового діапазону є розрив МСЛ (рис. 3.2).



a — конструктивне виконання; *б* — еквівалентна схема;
в — залежність ємності від конструктивних параметрів

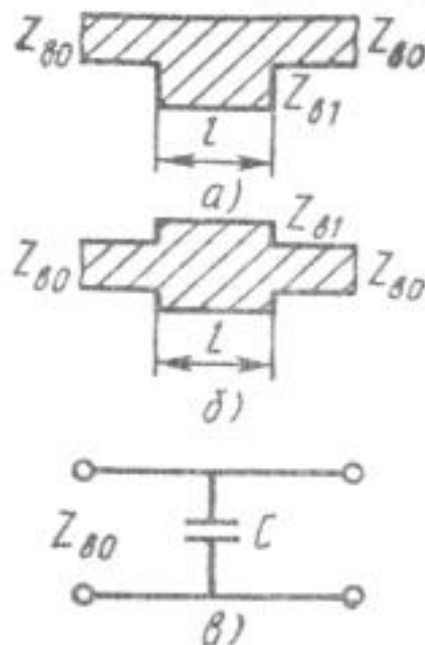
Рисунок - 3.2 - Розрив мікросмужкової лінії передачі



а – перетин; б - еквівалентна схема; в - залежність ємності від конструктивних параметрів

Рисунок - 3.3 - Гребінчастий конденсатор

Ємність такого конденсатора мала й становить частки пікофаради. Ємність 1...10 пФ можна одержати за допомогою гребінчатих конденсаторів (рис. 3.3), або шлейфової конструкції (рис. 3.4).



а, б – у вигляді одиночного та здвоєного шлейфів з низьким хвильовим опором; в - еквівалентна схема

Рисунок 3.4 - Паралельно включені ємності

Індуктивність у мікрохвильових пристроях застосовують як елемент резонансного контуру, високочастотних дроселів, елементів настроювання, що компенсують елементів.

Найпростішим індуктивним елементом у мікрохвильовому діапазоні є прямокутний відрізок МСЛ. Його індуктивність становить від 0,5 до декількох наногенрі.

Для одержання паралельно включеної в ланцюг індуктивності використовується конструкція у вигляді короткозамкненого шлейфа довжиною $l < \lambda/8$ (рис. 3.5).

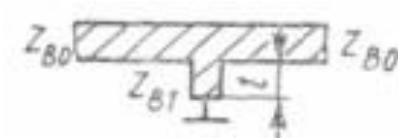


Рисунок 3.5 - Паралельно включена індуктивність у вигляді короткозамкненого шлейфа довжиною $l = \lambda/8$

У всіх наведених конструкціях індуктивність мала.

Тести

1. За рекомендацією Міжнародного консультативного комітету по радіо 1975 року до надвисоких частот (НВЧ) відносять діапазон частот:

- 3 ... 30 МГц;
- 30... 300 МГц;
- 3...30 ГГц;
- 30...300 ГГц.

2. Частотний діапазон НВЧ:

- 300...3000 МГц;
- 3...30 ГГц;
- 30...300 ГГц;
- 300...3000 ГГц.

3. Найменший розмір об'єкта, що може встановити промінь радіолокатора, визначається:

- відстанню до об'єкта;
- ступенем фокусування променя;
- потужністю електромагнітної хвилі;
- довжиною електромагнітної хвилі.

4. Хвильовід – це:

- металевий дріт;
- два паралельних металевих дрота;
- металева труба з заданою формою перетину;
- полоскова лінія.

5. Довжина хвилі у хвильоводі:

- більше, ніж в відкритому просторі;
- менше, ніж в відкритому просторі;
- така ж сама, як і в відкритому просторі;
- така ж сама, як і в вакуумі.

6. Зі збільшенням частоти густина струму розподіляється в перерезі провідника:

- рівномірно;
- лінійно зростає по діаметру провідника;
- в центрі вона більша, ніж ближче до поверхні;
- в центрі вона менша, ніж ближче до поверхні.

7. НВЧ-сигнал розповсюджується переважно в формі:

- електричного струму вздовж провідника;
- електромагнітної хвилі всередині провідника;
- електромагнітної хвилі зовні провідника вздовж його напрямку;
- електромагнітної хвилі зовні провідника поперек його напрямку.

8. В коаксиальному кабелі електромагнітна хвиля розповсюджується:

- по внутрішньому металевому дроту;
- по діелектрику всередині кабелю, що кріпить металевий дріт;

по зовнішньому металевому екрануванню;
зовні кабелю.

9. В хвильоводі в формі металевої труби НВЧ-сигнал розповсюджується в формі:
електричного струму по поверхні хвильовода;
електромагнітної хвилі всередині хвильовода;
електричного струму по поверхні хвильовода та електромагнітної хвилі в його
середині;
електричного струму по поверхні хвильовода та електромагнітної хвилі зовні кабеля.

10. Сигнал найбільшої частоти мікрохвильового діапазону найкраще передавати по:
двохпровідній лінії;
коаксиальному кабелю;
хвильоводу в формі металевої труби;
полосковій лінії.

11. Режим хвилі, що біжить, встановлюється в хвильоводі, якщо коефіцієнт відбиття
хвилі від навантаження:
= 0;
= 1;
> 1;
< 1.

12. Режим ідеальної стоячої хвилі встановлюється в хвильоводі, якщо коефіцієнт
відбиття хвилі від навантаження:
= 0;
= 1;
> 1;
< 1.

13. В режимі ідеальної хвилі, що біжить, в фіксованій точці хвильовода напруженість
електричного поля:
не змінюється з часом;
змінюється за лінійним законом;
змінюється за синусоїдальним законом;
змінюється за параболічним законом;

14. В режимі ідеальної стоячої хвилі в фіксованій точці хвильовода напруженість
електричного поля:
не змінюється з часом;
змінюється за лінійним законом;
змінюється за синусоїдальним законом;
змінюється за параболічним законом;

15. Максимальна напруженість електричного поля ідеальної стоячої хвилі в хвильоводі
за інших рівних умов:
така ж сама, як і у ідеальної хвилі, що біжить;
менше, ніж у ідеальної хвилі, що біжить;
більше, ніж у ідеальної хвилі, що біжить, в 2 рази;
більше, ніж у ідеальної хвилі, що біжить, в 4 рази.

16. Мінімальна напруженість електричного поля ідеальної стоячої хвилі в хвильоводі за інших рівних умов:

- така ж сама, як і у ідеальної хвилі, що біжить;
- дорівнює нулю;
- більше нуля;
- менше нуля.

17. Коефіцієнт стоячої хвилі в хвильоводі в режимі не ідеальної стоячої хвилі:

- = 0;
- = 1;
- = 1...∞;
- = ∞.

18. Узгодження хвильовода з навантаженням вважається хорошим, якщо коефіцієнт стоячої хвилі:

- = 0;
- = 1;
- = 1,05...2;
- = 2...∞.

19. Швидкість електромагнітної хвилі в хвильоводі:

- дорівнює нулю;
- дорівнює швидкості світла;
- менша за швидкість світла;
- більша за швидкість світла.

20. Довжина електромагнітної хвилі в хвильоводі при заданій частоті:

- така сама, як в вакуумі;
- менша ніж в вакуумі;
- більша ніж в вакуумі;
- така сама, як в повітрі.

21. Фактори, що обмежують використання вакуумних триодів в діапазоні НВЧ:

- збільшення реактивного ємнісного опору міжелектродних проміжків;
- зменшення реактивного ємнісного опору проміжку між анодом і сіткою;
- зменшення реактивного ємнісного опору проміжку між катодом і сіткою;
- зменшення реактивного ємнісного опору проміжків між анодом і сіткою та катодом і сіткою.

22. Фактори, що обмежують використання вакуумних триодів в діапазоні НВЧ:

- збільшення реактивного індуктивного опору виводів лампи;
- зменшення реактивного індуктивного опору виводів лампи;
- збільшення потужності лампи;
- зменшення потужності лампи.

23. Фактори, що обмежують використання вакуумних триодів в діапазоні НВЧ:

- збільшення потужності лампи;
- зменшення потужності лампи;
- збільшення електромагнітного випромінювання лампи;
- зменшення електромагнітного випромінювання лампи.

24. Вакуумний триод розміщують в конструкції з резонаторів для:

збільшення потужності лампи;
захисту від електромагнітного випромінювання лампи;
зменшення втрат енергії;
захисту від електромагнітного випромінювання лампи та зменшення втрат енергії.

25. Принцип дії клістронів заснований на модуляції:
амплітуди електромагнітної хвилі;
електронного потоку за швидкістю;
електронного потоку за густиною;
електронного потоку за швидкістю та густиною.

26. Траєкторія електронів в клістронах:
прямолінійна;
параболічна;
синусоїдальна;
спіралеподібна.

27. Траєкторія електронів в магнітронах:
прямолінійна;
параболічна;
синусоїдальна;
спіралеподібна.

28. Мінімально необхідна кількість резонаторів в прямопролітному клістріні:
1.
2.
3.
4.

29. Мінімально необхідна кількість резонаторів в відбиваючому клістріні:
1.
2.
3.
4.

30. Мінімально необхідна кількість резонаторів в магнітроні:
1.
2.
3.
4.

31. Принцип дії діода Ганна заснований на:
тепловому пробі при зворотному включенні р-n-переходу внаслідок ударної іонізації;
лавинному пробі при зворотному включенні р-n-переходу внаслідок ударної іонізації;
тунельному ефекті при прямому включенні р-n-переходу в сильно легуваному напівпровіднику;
міждолинному переході електронів під дією статичного електричного поля.

32. Принцип дії лавино-пролітного діода заснований на:
тепловому пробі при зворотному включенні р-n-переходу внаслідок ударної іонізації;
лавинному пробі при зворотному включенні р-n-переходу внаслідок ударної іонізації;

тунельному ефекті при прямому включенні р-п-переходу в сильно легованому напівпровіднику;
 міждолинному переході електронів під дією статичного електричного поля.

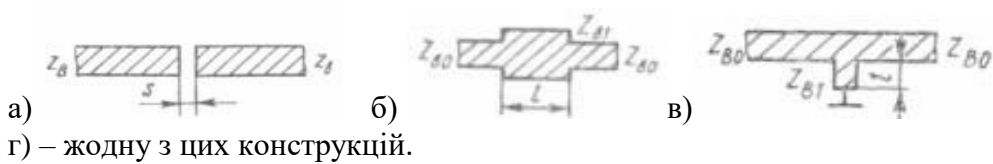
33. Принцип дії тунельного діода заснований на:
 тепловому пробі внаслідок ударної іонізації при зворотному включенні р-п-переходу;
 лавинному пробі внаслідок ударної іонізації при зворотному включенні р-п-переходу;
 тунельному ефекті при прямому включенні р-п-переходу в сильно легованому напівпровіднику;
 міждолинному переході електронів під дією статичного електричного поля.

34. Кількість р-п-переходів в діоді Ганна:
 0;
 1;
 2;
 3.

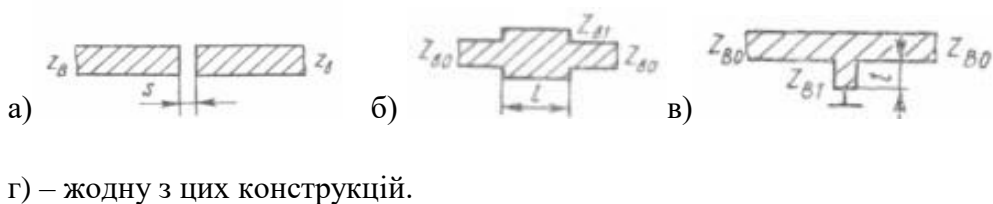
35. Кількість р-п-переходів в лавино-пролітному діоді:
 0;
 1;
 2;
 3.

36. Кількість р-п-переходів в тунельному діоді:
 0;
 1;
 2;
 3.

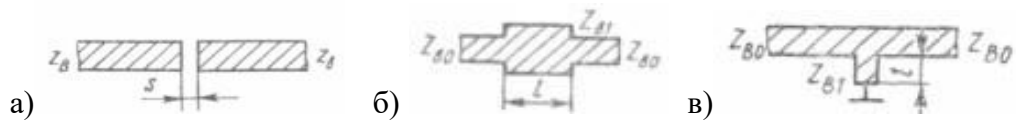
37. В мікросхемах НВЧ послідовно включений конденсатор може мати таку конструкцію:



38. В мікросхемах НВЧ паралельно включений конденсатор може мати таку конструкцію:

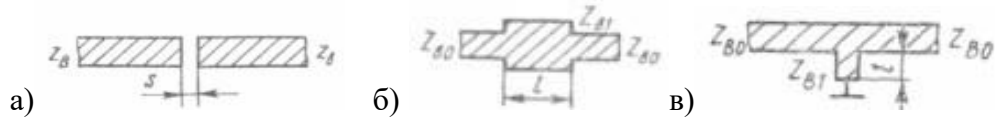


39. В мікросхемах НВЧ послідовно включена індуктивність може мати таку конструкцію:



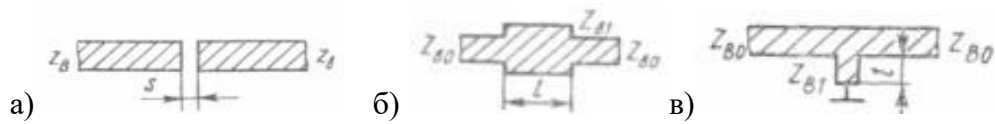
г) – жодну з цих конструкцій.

40. В мікросхемах НВЧ послідовно включений резистор може мати таку конструкцію:



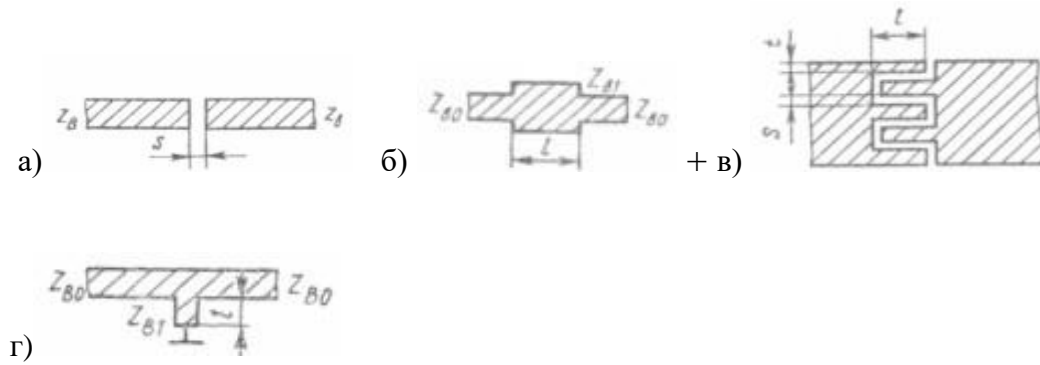
г) – жодну з цих конструкцій.

41. В мікросхемах НВЧ паралельно включений резистор може мати таку конструкцію:



г) жодну з цих конструкцій.

42. В мікросхемах НВЧ найбільшу ємність має конденсатор такої конструкції:



Рекомендована література

1. Левитский С.М., Кошечая С.В. Вакуумная и твердотельная электроника СВЧ. – К.: Вища шк. Головн. изд., 1986. - 272 с.
2. Пчельников Ю.Н. Электроника сверхвысоких частот. - М.: Радио и связь, 1981. – 95 с.
3. Кукарин С.В. Электронные СВЧ приборы. - М.: Радио и связь, 1981. - 271 с.
4. Кацман Ю.А. Приборы сверхвысоких частот. Том II - М.: Высшая школа, 1973. – 384. с.
5. Шахгильдян В.В. Проектирование радиопередающих устройств. – М.: Радио и связь, 1993. - 512 с.
6. Петухов В.М. Полупроводниковые приборы. Транзисторы. - М.: Радио и связь, 1995. – 322 с.
7. Шварц Н.З. Усилители СВЧ на полевых транзисторах. - М.: Радио и связь, 1987. – 202 с.
8. Дьяконов В.П. Схемотехника устройств на мощных полевых транзисторах: справочник. –М.: Высшая школа, 1993.- 232 с.