**Лавинно – прогонні діоди**

Лавинно – прогонні діоди (ЛПГ) являють собою конструкцію напівпроводникових діодів, принцип роботи яких засновано на виникненні від’ємного опору в діапазоні надвисоких частот, який утворюється внаслідок лавинного помноження носіїв заряду та їх проходження через структуру напівпроводника. Утворення від’ємного опору пов’язано з запізненням в часі цих двох процесів, що приводить до фазового зсуву між струмом і напругою. Дійсно, лавина носіїв заряду формується не миттєво, а впродовж певного проміжку часу, так само як і дрейф лавини носіїв заряду через напівпрвідник. Від’ємний опір виникає на тій частоті, коли полуперіод коливань дорівнюватиме сумі часу утворення лавини носіїв заряду та їх дрейфу через напівпровідник.

Процеси утворення від’ємного опору в діодних та транзисторних структурах за рахунок прогонного механізму вперше були розглянуті в 1954 році німецьким вченим В. Шотткі. В 1959 році група вчених під керівництвом О.С. Тагера розробила лавинно-прогонні діоди в Російській Федерації.

Основні конструкції лавинно-прогонних діодів, які одержали практичне застосування, мають структуру: р+ -п-і-п+ (діод Ріда), р+ -п-п+ (різкий несиметричний р-п перехід), р+ -р-п-п+ (діод з двома дрейфовими областями), р+ -п-п1-п+ (діод з двошаровою базою), р+ -п-п1-п+ (діод з трьохшаровою базою), р-і-п-діод.

Принцип роботи ЛПГ на прикладі простої структури р+-п-і-п+ можна пояснити слідуючим чином. При подачі на діод постійної зворотної напруги, трохи меншої напруги лавинного пробою Uпроб і малої амплітуди змінного сигналу, носії заряду помножуються в дуже вузькому п-шарі біля границі р+ -п переходу і потім дрейфують через і-область, яка заповнена шаром об’ємного заряду. Цей процес проходить в той момент, коли спільна напруга на діоді буде більшою Uпроб, а напруженість електричного поля в шарі помноження перевищуватиме значення, необхідне для лавинного утворення електронно-діркових пар.

На мал. 1 показано розподіл домішок і напруженості електричного поля в структурі р+ -п-і-п+. Існуюче в п-області електричне поле сприяє швидкому переходу дірок із шару лавинного помноження в р+ -область та дрейфу електронів через область об’ємного заряду в п+ -область. В той момент, коли починається наступний максимум позитивного полуперіоду, утворюється нова лавина з електронів і дірок, причому пакет електронів знову дрейфує в п+ -область, а дірки миттєво перекидаються в р+ -область, після чого цикл повторюється. Таким чином, струм, що проходить через діод, змінюється з частотою прикладеної змінної напруги і відстає від неї на час прогону електронів через область об’ємного заряду.

Мал. 1. Розподіл домішок (а) і напруженості електричного поля (б) в структурі р+ -п-і-п+.

Розглянемо фізичні процеси обмінуенергією між постійним і змінним електричними полями за допомогою носіїв заряду, що має місце в лавинно-прогонному діоді. Коли носії заряду рухаються в напрямку, в якому їх переміщує електричне поле, то поле здійснює роботу над носіями заряду і віддає їм енергію. Якщо носії заряду рухаються в напрямку протилежному тому, в якому їх прагне переміщувати електричне поле, то вони віддають енергію електричному полю. Головний принцип роботи ЛПГ полягає в тому, що в них створюються такі умови, за якими постійне поле переміщує носіїв заряду в напрямку протилежному тому, в якому їх переміщує змінне поле. Отже, енергія постійногоь електричного поля за допомогою носіїв заряду поглинається полем змінного струму.

Нехай в момент часу t = 0 носії заряду, які в невеликій кількості присутні у вузькій лавинній області, починають помножуватись і їх кількість зростає по експоненті. Коли минає чверть періоду, розподіл щільності носіїв заряду буде таким, як подано на мал. 2, а. Якк видно, концентрація носіїв заряду в лавинній області зросла і по мірі ії зростання все більше електоронів надходить в область дрейфу. Протягом цього проміжку часу електрони отримають енергію від змінного поля, що небажано. Ідеальним був би випадок, коли б електронів взагалі не було в області дрейфу, хоча в дійсності вони там є в невеликій кількості.

Мал. 2. Залежність напруженості електричного поля і щільності заряду від координати в різні проміжки часу.

Після додаткової чверті періоду (мал. 2, б) спостерігається подальше зростання струму в лавинній області і в цей момент змінне поле має напрямок проти постійного (електрони повинні віддавати енергію змінному полю), тому існує велике нагромадження носіїв заряду. Ця лавинна носіїв заряду є кінцевим результатом експоненціального зростання, який миттєво закінчується, бо напруженість електричного поля в лавинній області стає нижче критичної. Розподіл щільності заряду і напруженості електричного поля ще через чверть періоду подано на мал. 2, в.

Нарешті, при повному завершенні періоду, електрони залишають область об’ємного заряду раніш ніж змінне поле почне віддавати їм енергію (мал. 2, г). Якщо процес лавиноутворення відбувається із запіздненням, то це позволяє підняти значення диференціального від’ємного опору. При запіздненні, яке дорівнює чверті періоду, електрони відразу потрапляють у затримуюче змінне поле і знаходяться в ньому протягом всього часу прогону, що дорівнює половині періоду. В цих умовах виникає максимальне значення від’ємного опору.

Використання диференціального від’ємного опору лавинно-прогонних діодів сприяє реалізації підсилювачів і генераторів на надвисоких частотах, тому що час прогону електронів і дірок через область об’ємногоь заряду досить малий. Лавинно-прогонний режим роботи приладу отримав назву IMPATT-режиму (скорочення від англ. Impact Avalanche Transit Time). Робота ЛПД в області надвисоких частот потребує малих значень бар’єрних ємностей, що відповідає малим площам перетинів р-п переходів.

Стабільність роботи НВЧ-приладів на основі ЛПД залежить від стабільності значень від’ємного опору. З физичної точки зору це означає, що швидкість руху носіїв заряду в області дрейфу не повинна залежати від напруженості електричного поля. Виконати цю умову можливо при великих напруженостях електричного поля. Значення диференціального від’ємного опору в цьому випадку стає незалежним від зміни зовнішньої напруги.

В цьому відношенні перспективна р+ -п-і-п+-структура, в якій тонка п-область, єшаром помноження, а область дрейфу служить і-шар. Виконання умови Ел > Еі < Енас забезпечує сталість швидкості дрейфу електронів. В структурах з двома дрейфовими областями (р+ -р-п-п+) одночасно існує синфазний дрейф електронів в п-області і дрейф дірок в р-оюласті, що дає можливість підвищити потужність таких приладів. Це пов’язано із зростанням площі переходів, так і з зростанням області об’ємного заряду при збереженні іх відношення, що не приводить до зростання ємності діода.

Існує ще один режим роботи лавинно-прогонних діодів із захопленою плазмою, який називається TRAPATT-режимом (скорочено від англ. Traped Plasma Avalanche Triggeret Transit). Такий режим роботи забезпечується при великих струмаз через діод. В наступний момент після подачі на діод напруги, яка перевищує пробивну, у вузькій області п-шару структури р+ -п-п+ біля р+ -п переходу концентрація електронів і дірок швидко зростає за рахунок лавинного помноження, а напруженість електричного поля зменшується. Це сприяє перерозподілу напруги між п-областю і дрейфовим шаром помноження. Фронт хвилі іонізації рухається швидше ніж електрони в електричному полі, тому п-область заповнюється електронно-дірковою плазмою швидше, ніж остання залишає ії. В результаті напруга на діоді швидко зменьшується, що затримує дрейф носіїв заряду з області об’ємного заряду. Отже, в діоді виникає стан, який отримав назву режиму із захопленою плазмою. Частота коливань при роботі діода в такому режимі менша, ніж в лавинно-прогонному, тому що швидкість витягання носіїв заряду з області від’ємного заряду значно менша швидкості насичення, хоча амплітуда коливань і коефіцієнт корисної дії зростають. Повний опір діода дорівнює сумі повних опорів області лавинного помноження, області дрейфу і опору пасивної області:

Де d – розміри області, яка включає області дрейфу і лавинного помноження, С = S/d – ємність області об’ємного заряду, Xл = довжина оюласті лавинного помноження, Vнас – дрейфова швидкість насичення носіїв заряду, - кругова частота, р – резонансна частота діода, Rп – омічний опір контактів приладу.

Мал. 3 Еквівалентна схемалавинно-прогонного діода

Вираз (1) дійсний для кутів прогону носіїв заряду в області дрейфу

= (d-x)/Vнас = < /4. Перша складова – активний опір, який стає від’ємним при > р. Третя складова являє собою реактивний опір паралельного резонансного кола, в якому ємність діода зашунтована індуктивністю (мал.3). Реактивний опір має індуктивний характер при > р і ємнісний при < р.

Лавинно-прогонні діоди мають високий рівень шумів, значно вищий ніж у інших НВЧ- приладах. Основною причиною шумів є ЛПД-генерація електронно-діркових пар в області лавинного помноження. Найбільш низький рівень шумів мають діоди на основі арсеніду галію (25 дБ) порівняно з кремнійовими (40 дБ) і германійовими (30 дБ). ЛПД знайшли широке застосування в генераторах НВЧ коливань в діапазоні 1 – 100 ГГц. Наприклад, кремнійовий ЛПД, створений за допомогою іонної імплантації з двома дрейфовими областями, в неперервному режимі генерує потужність 1 Вт на частоті 50 ГГц при максимальному ККД 14%.