**Зоренко Олександр Вольтович. Розробка методів підвищення ефективності і розширення функціональних можливостей ЛПД у короткохвильовій частині міліметрового діапазону : дис... канд. техн. наук: 05.27.01 / Національний технічний ун-т "Київський політехнічний ін-т". - К., 2005.**

|  |  |
| --- | --- |
| |  | | --- | | **Зоренко О.В.** **Розробка методів підвищення ефективності і розширення функціональних можливостей ЛПД в короткохвильовій частині міліметрового діапазону.** – Рукопис.  Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.27.01 – твердотільна електроніка. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, 2005.  У дисертаційній роботі теоретично обґрунтовані і проаналізовані результати наукових досліджень, запропоновані і реалізовані на основі науково-технічних досягнень рішення, спрямовані на розширення частотного діапазону твердотільних джерел НВЧ випромінювання високого рівня потужності в короткохвильовій частині міліметрового діапазону.  Показана ефективність використовування ЛПД двоміліметрового діапазону в основі генераторів-перетворювачів частоти: помножувача-перетворювача високої кратності і перетворювача зі зсувом частоти вгору. Показано теоретично і експериментально, що вони дозволяють формувати сигнал в сантиметровому діапазоні, а потім переносити його в міліметровий діапазон зі збереженням якісних спектральних характеристик низької частоти при малих енергетичних втратах вхідних (низькочастотного і проміжного) сигналів.  Теоретично і експериментально показано, що потенційні можливості SiC-ЛПД забезпечують подальший розвиток потужних НВЧ приладів у плані істотного поліпшення їх енергетичних характеристик і підвищення робочої частоти. Вперше виготовлені і експериментально досліджені 4H-SiC p+-n-n+-ЛПД в імпульсному режимі. | |
| |  | | --- | | Основні результати і висновки дисертаційної роботи полягають в наступному:  1. Для двопрольотних кремнієвих р+-р-n-n+ ЛПД двоміліметрового діапазону на основі локально-польової моделі з урахуванням досягнень вітчизняної технології проведено теоретичне дослідження високочастотних процесів. Визначені значення структури кристала (довжина, рівень легування, діаметр) і режими роботи, що дозволяють оптимізувати вихідні характеристики генераторних і інших пристроїв.  Теоретично показано, що оптимальне легування n- і р- області перебуває в межах від 2,01017 до 2,51017 см-3 при довжині області відповідно від 0,22 до 0,2 мкм. При цьому максимальний *КПД*досягає 3%, а питома потужність – 4104 Вт/см2 при температурі р-n переходу 250С. Максимальне значення активної складової провідності перебуває на частоті близько 100 ГГц при *J*0 = 43 кА/см2 і на 120 ГГц при *J*0 = 65 кА/см2. Оптимальна вихідна потужність ЛПД з мідним або алмазним тепловідводом визначається діаметром мезаструктури:  – з тепловідводом зі щільної міді – 0,25 0,28 Вт при діаметрі мезаструктури – 25 мкм;  – з алмазним тепловідводом – 0,7 Вт при діаметрі мезаструктури – 40 мкм.  2. Експериментальне дослідження статичних і динамічних характеристик ЛПД визначеної структури, виготовлених в НДІ «Оріон», показало ефективну роботу діодів в діапазоні 100 – 140 ГГц, при досить жорстких конструктивних вимогах до мезаструктури.  3. Для двопрольотних кремнієвих р+-р-n-n+ ЛПД двоміліметрового діапазону на основі локально-польової моделі проведено теоретичне дослідження високочастотних процесів в автоколивальному бігармонічному режимі і бігармонічному режимі з підкачкою потужності з метою зниження пускових токів і теплових обмежень.  Теоретично показано, що в бігармонічному режимі максимальна вихідна потужність на частоті другої гармоніки досягається при фазі напруги другої гармоніки j = –/2. На частоті 140ГГц максимально досяжна вихідна потужність в 2,8 рази, а *КПД*в 2,5 рази вищі, ніж в моногармонічному режимі. Зниження пускового струму можливе до 40 мА, тобто більш, ніж в 2 рази, в порівнянні з моногармонійним режимом. В неперервному режимі роботи діоду з мідним тепловідводом *КПД*по другій гармоніці зростає аж до струму живлення 200 мА, що відповідає густині струму 40 кА/см2 і досягає 2%, при легуванні *NA* = *ND =* 2,251017см-З. Максимальна вихідна потужність досягає 50 мВт .  4. Для двопрольотних кремнієвих р+-р-n-n+ ЛПД двоміліметрового діапазону на основі локально-польової моделі проведено теоретичне дослідження імпедансних характеристик діодів в режимах множення-перетворення частоти і перетворення частоти зі зсувом вгору.  Теоретично показано, що в режимі множення-перетворення втрати складають 10 – 15 дБ при перетворенні частоти в 15 разів з вихідною частотою в короткохвильовій частині міліметрового діапазону; 20 – 25 дБ при перетворенні в 20 і більше разів в субміліметровому діапазоні.  Максимальна потужність на вихідній частоті 140 ГГц складає 30 мВт і відповідає опору вихідного контуру *R*3 » 150 Ом, *L*3 = 2,7310-12 Гн, *L*2 = 4,010-12 Гн, *L*1 = 1,810-11Гн. В режимі перетворювача частоти зі зсувом вгору розрахунки проводилися для кристала з рівнем легування *NA*=*ND =* 1,51017см-З і двох значень низької частоти: *f*1 = 7 ГГц і *f*1 = 1,75 ГГц. Показано, що перетворювачі частоти зі зсувом вгору на основі кремнієвих двопрольотних ЛПД дозволяють забезпечити перетворення сигналів з втратами близько 1 дБ щодо вхідної ВЧ частоти. Вихідна потужність може досягати 10 мВт в безперервному режимі роботи на частоті 140 ГГц, при *КПД*, щодо потужності, що підводиться, по постійному струму, близько 0,4% із збереженням на виході перетворювача частоти зі зсувом вгору спектральних характеристик сигналу ПЧ (проміжної частоти).  5. Експериментальні дослідження макетів НВЧ модулів, виготовлених для приймаючо-передаючого вузла у рамках проекту 1056 УНТЦ, показали хорошу відповідність з розрахунковими даними. Одержані:  вихідна потужність задаючого генератора *Pout*= 1520 мВт на частоті 140 ГГц при температурі активного шару менш за 200C;  вихідна потужність помножувача-перетворювача частоти високої кратності *Pout*= 1517 мВт на частоті 140 ГГц при температурі активного шару менш за 130С і якісних спектральних характеристиках сигналу;  вихідна потужність, на частоті *fp*= 140 ГГц (верхня бічна смуга) склала *Pout*= 10 мВт з втратами перетворення, при урахуванні втрат в смугово-пропускаючому фільтрі, менш за 1 дБ. Вхідна потужність перетворювача частоти зі зсувом вгору на частоті *f*1 = 1,5 ГГц склала до 70 мВт і на частоті *f*2*=* 138,5 ГГц – до 12 мВт.  6. За результатами експериментальних досліджень в НДІ «Оріон» під керівництвом здобувача розроблена конструкторська документація, технологія складання НВЧ модулів, методики настроювання та випробувань, що дозволяє налагодити за наявності замовлень виробництво модулів.  7. Відповідно до поточної ситуації в дослідженні і розробці напівпровідникового карбіду кремнію (SiC) проведений чисельний розрахунок динамічних характеристик ЛПД на эпитаксиальній структурі p-n типу, вирощеній на грані {0001} політипу 6H-SiC для імпульсного режиму роботи на частоті 140 ГГц. Знайдено, що структура n+-n-p+-типу з довжиною активної області *wn*= 0,65 мкм і легуванням *ND*= 41017 см-3 повинна забезпечувати густину вихідної НВЧ потужності *Pout*~ 1,5 МВт/см2 з *КПД* ~ 7 % при *J*0= 150 кА/см2 і *Pin* = 25 МВт/см2. Для густини струму 90 кА/см2 і питомої вхідної потужності 10 МВт/см2 максимальна ефективність генерації НВЧ потужності (*КПД*), дорівнює 6 %. Густина пускового струму, при якому з'являється від’ємний опір, дорівнює 40 кА/см2 для оптимальної структури. Питома від’ємна провідність діода має місце в широкому діапазоні густини зворотного струму живлення (25 – 220 кА/см2). Робоча частота такого діода повинна бути в діапазоні 90-250 ГГц.  Знайдене експериментально значення швидкості дрейфу електронів виявилося приблизно в 3 рази нижче за розрахункові значення, використані для чисельного моделювання SiC-ЛПД. Переоцінка частоти генерації SiC-ЛПД (*fТ* = JS/2*wn*) показала, що максимальна робоча частота SiC ЛПД повинна бути набагато нижче, ніж вважалося раніше, а частота 94 ГГц близька до верхньої межі. Це означає, що SiC-ЛПД не перевершуватимуть Si-ЛПД в частині максимальної робочої частоти, проте застосування SiC дуже перспективне для виготовлення потужних ЛПД.  8. Виготовлення і експериментальне дослідження електричних характеристик 4H-SiC p-+-n-n+- ЛПД проведено в НДІ «Оріон» під керівництвом здобувача у рамках міжнародної програми INTASCNES 97. Вперше SiC діоди показали стабільну роботу в стані лавинного пробою при лавинному струмі до 20 мA, середньої потужності розсіяння 5,5 Вт і питомої вхідної потужності 200 кВт/cм2. Напруга пробою *Uout*= 287 В була близькою до розрахункового значення. Показано, що 4H-SiC p+-n-n+ діоди здатні розсіяти імпульсну питому потужність приблизно в 3,7 мВт/cм2при лавинному пробої.  Вперше температурна залежність напруги пробою b була виміряна при високому значенні густини струму *J*0 = 37 кА/см2. Показано, що значення b змінює знак в районі 750 К з від’ємної величини на позитивну.  Вперше зроблена експериментальна оцінка швидкості дрейфу електронів JS по С-вісі в 4H-SiC. Швидкість дрейфу електронів по С-вісі в 4H-SiC була оцінена з аналізу форми імпульсу напруги в лавинному режимі роботи. Визначено JS = 0,8107 см/с для кімнатної температури і JS = 0,75l07 см/с для 460 К.  Вперше експериментально зафіксовані НВЧ коливання, вироблені SiC-ЛПД. НВЧ коливання з'явилися при пороговому струмі вхідного імпульсу 0,3 А. Частота коливань, приблизно 10 ГГц (Х-діапазон) та імпульсна НВЧ потужність, приблизно 300 мВт, були виміряні при імпульсному струмі 0,35 А і тривалості імпульсу 40 нс. Коефіцієнт перетворення потужності склав приблизно 0,3 %. Відносно малий КПД можна пояснити роботою діодів на частотах дуже близьких до лавинної.  Перші експериментальні вимірювання робочої частоти SiC ЛПД з простим профілем легування, проведені в даному дослідженні, забезпечують основу для точного чисельного конструювання SiC-ЛПД і розрахунку найбільшої вихідної потужності, яка може очікуватися в середньому частотному діапазоні. | |