

Частотні залежності КСХ вхідного плеча та втрат в каналах дуплекера наведені на рис.6 а і б, відповідно.

Висновки

Запропонована конструкція хвилеводного дуплекера з плечима в *H*-площині та *E*-площинними фільтрами, для якої створена комп'ютерна програма електродинамічного аналізу та оптимізації. Побудована методика синтезу апробована при проектуванні дуплекера з чотирьохрезонаторними фільтрами для смуги частот 7912...7996 МГц та 8178...8262 МГц і може використовуватись при конструюванні дуплексерів сантиметрового та міліметрового діапазонів довжин хвиль даної та схожих конструкцій.

Література

1. Yu Rong, Hui-wen Yao, K.A. Zaki and T. Dolan. Millimeter wave H-plane diplexers // 1999 Vol. III [MWSYM] – PP. 1347-1350.
2. Dittloff J., Arndt F. Rigorous Field Theory Design of Millimeter-Wave E-Plane Integrated Circuit Multiplexers // IEEE Trans.: V. MTT-37.– 1989.– No. 2.– PP. 340-350.
3. Dittloff J., Arndt F. Computer-Aided Design of Slit-Coupled H-Plane T-Junction Diplexers with E-Plane Insert Filters//IEEE Trans. MTT-36. 1988. No.12. PP.1833-1840.
4. Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи – М: Связь, 1972
5. Омеляненко М.Ю., Цымбал В.И. Синтез интегральных фильтров на основе частично заполненных волноводов // Радиоэлектроника.– 1984.– № 5.– С.65-67.

Ежов А.В., Омеляненко М.Ю., Туреева О.В. Дуплекеры сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн на основе продольных индуктивных диафрагм Представлена конструкция волноводного дуплекера с плечами, расположенными в <i>H</i> -плоскости, и <i>E</i> -плоскостными фильтрами. Разработана программа анализа, синтеза и оптимизации размеров дуплекера.	Iezhov A., Omelianenko M., Turieieva O. Centimeter and millimeter wavelength diplexers based on longitude inductive septa The new design of H-plane waveguide diplexer with E-plane filters is proposed. A program for electromagnetic simulation of the proposed design was developed as well as synthesis principles and diplexer's dimensions optimization program.
--	---

УДК 621.382.2.029.64

АНАЛІЗ ІМПЕДАНСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЛПД

Березюк Ф.Б., Зоренко О.В.

Наведена модель потужних твердотільних генераторів міліметрового діапазону, що враховує нестационарний імпеданс імпульсних генераторних лавинно-пролітних діодів.

Вступ

Розробка імпульсного твердотільного генератора із заданими електричними характеристиками вимагає розгляду його стаціонарного режиму [1], включаючи: вибір моделі генератора, яка дозволяє зв'язати його вихідні параметри з характеристиками активного елемента і ВЧ навантаження, що визначається геометрією електродинамічної системи; визначення імпедансних характеристик активного двополюсника в діапазоні частот, амплітуд, температур і густини струмів живлення з метою проведення оптимального узгодження з навантаженням. Розв'язання цих задач дозволяє побудувати

генератори з характеристиками, близькими до оптимальних [2].

Постановка задачі

Для зразка лавино-пролітного діоду (ЛПД) структури $p^+ - p - n - n^+$ необхідно визначити опір діодного кристалу Z_d на заданій частоті, його залежність від розподілення температури кристалу $\theta_{\text{крист}}$ та локального перегріву $p - n$ переходу $\Delta\theta_{p-n}$ по профілю, якщо відомі довжини його областей L_n, L_p , концентрації областей N_n, N_p , ввімкнений послідовно питомий опір втрат ρ_s , та питомий струм живлення j_s . Розрахунки проведені для $L_n = L_p = 0,35$ мкм, $N_n = N_p = 1,8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $\omega_0 = 94 \text{ ГГц}$, $j_s = 100 \text{ кА/см}^2$.

Аналіз моделі генератора

Генератор на ЛПД (ГЛПД) володіє низкою специфічних особливостей, які необхідно враховувати при розробці потужних генераторів. Для цього скористаємося узагальненою еквівалентною схемою генератора [3], наведеною на рис. 1, де введені позначення: $Z_H(\omega)$ – частотно залежний імпеданс фідерної системи генератора, приведений до клем 1-1 напівпровідникового кристала; $Z_d(a, \theta)$ – від’ємний імпеданс діодної структури, залежний переважно від амплітуди a високочастотного сигналу і температури θ кристалу. Z_d – слабо залежить від частоти, тому для спрощення аналізу частотною залежністю $Z_d(\omega)$ можна нехтувати, оскільки $Z_H(\omega)$ звичайно є швидко змінною функцією частоти ω . Умова стаціонарного режиму в такій схемі можна записати як $\dot{Z}_H(\omega) + \dot{Z}_d(a, \theta) = 0$. Геометрична

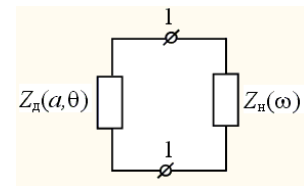


Рис. 1

від амплітуди a

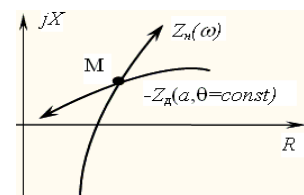


Рис.2

інтерпретація цього рівняння на комплексній площині (R, jX) при $\theta = const$ представлена на рис.2, де імпеданс діода Z_d побудований зі знаком мінус. В такому зображенні перетин ліній імпедансів діоду та генератора $Z_H(\omega) = -Z_d(a, \theta)$ вказує на точку стаціонарного режиму коливань M . Стрілками вказано напрям збільшення амплітуди a і частоти ω . M - стійка точка стаціонарного режиму з частотою ω_0 і амплітудою a_0 при фіксованій температурі діода θ_0 . Проте температура діода при роботі в імпульсному режимі є функцією часу протягом всієї тривалості імпульсу, а отже частота та амплітуда НВЧ імпульсу є величина, залежна від часу. На рис. 3 для ілюстрації, по-

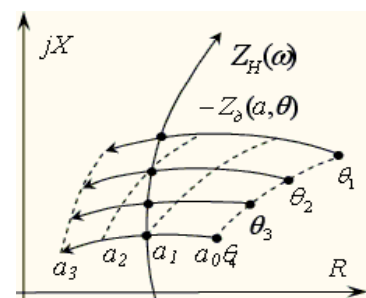


Рис.3

будовано імпеданс високочастотного (ВЧ) навантаження та імпедансу діода для фіксованих температур $\theta_1 - \theta_4$, ($\theta_1 < \theta_2 < \theta_3 < \theta_4$). Штриховими лініями показана еквіамплітудна залежність ($a_0 < a_1 < a_2 < a_3$). З рисунку видно, що при зміні температури діода точка стаціонарного режиму переміщується таким чином, що змінюється і амплітуда і частота коливань. Деякі явища,

важливі для практичної реалізації потужних імпульсних ГЛПД, вивчені недостатньо. Це, зокрема, особливості температурної залежності імпедансних характеристик ГЛПД, що працюють за великої густини струму живлення, при розподіленій температурі кристалу, а також вплив параметрів активного шару (області p і n) на температурну залежність динамічних характеристик діодів.

Оптимізація характеристик імпульсних ЛПД

Однією з основних задач, що вирішуються при розробці ГЛПД, є визначення оптимальних параметрів активного шару (довжини L_p , L_n і рівня легування N_n , N_p) та площі кристалу діода $S_{\text{ЛПД}}$, за яких досягається максимальна вихідна потужність $P_{\text{вих}}$ в заданому діапазоні частот. Для імпульсних ГЛПД має практичний інтерес визначення вказаних параметрів, що забезпечують генерацію гранично великої вихідної потужності, оскільки в цьому режимі роботи густина струму, обмеженого розігріванням активного шару діода, і струму, при якому вихідна потужність досягає свого граничного значення, виявляються сумірними. При роботі імпульсних ЛПД в діапазоні температур на зміни повної провідності діода, обумовлені внутрішньоімпульсним розігріванням, накладаються додаткові відхилення, спричинені зміною $T_{\text{довк}}$. До важливих питань, також відносяться особливості поведінки комплексної провідності ЛПД, що працюють за великої густини струму живлення, в діапазоні температур навколишнього середовища і дослідження способів її стабілізації.

Залежність граничної вихідної потужності від умов експлуатації

Дослідження впливу параметрів активного шару дводрейфових ГЛПД $p^+ - p - n - n^+$ -типу на динамічні характеристики здійснювалося методом математичного моделювання на ЕОМ, використовуючи локально-польову модель роботи ЛПД, яка достатньо точно описує нелінійні процеси в ЛПД і дозволяє дослідити динамічні характеристики діодів з різною структурою активного шару в широкому діапазоні частот, густини струму живлення, амплітуди змінної напруги і температури активного шару. Розраховувалися значення активної R і реактивної X складових повного опору, вихідної потужності P і ККД діодів з різними довжинами p - і n - шарів L_n , L_p та рівнем їх легування N_n , N_p . Розрахунки виконані при температурі активного шару $0 \dots 200$ °С в інтервалі значень густини робочого струму j_s , амплітуди змінної напруги на діоді U_s ($U_s \approx a$) і питомого опору втрат ρ_s . В розрахунках довжина p - і n -шарів варіювалася від 0,3 до 0,5 мкм, що на частоті 94 ГГц при $\theta_{\text{крист}} = 150$ °С відповідає оптимальному куту прольоту електронів і дірок. Рівень легування активного шару вибирався так, щоб збіднена область за робочих умов займала приблизно всю його довжину. Для вибраних довжин p - і n -шарів необхідний інтервал значень (визначених за результатами розрахунків залежності товщини збідненого шару від концентрації домішок) рівня легування складає $(1,2 \dots 2,0) \cdot 10^{17}$ см⁻³.

Дослідження впливу опору втрат на динамічні характеристики проводилися при зміні ρ_S від $1 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-5}$ Ом/см, що приблизно відповідає досяжним значенням для діодів короткохвильової частини мм-діапазону. Для всіх досліджених моделей діодів з різними параметрами активного шару густина струму j_s , при якій досягається гранична вихідна потужність $P_{гр}$, знаходилася в межах 80...120 кА/см². Меншим граничним струмам відповідає модель з меншими рівнями легування N_n і N_p і більшими довжинами прольотів L_n і L_p . Амплітуда напруги U_{\sim} , за якої досягалася $P_{гр}$, змінювалася в залежності від параметрів активного шару в діапазоні 6...12 В. Менші оптимальні амплітуди відповідали слабколегованим моделям і зростали зі збільшенням струму j_s . Зміна ρ_S мало впливала на частотні та імпедансні характеристики. Визначене співвідношення напруг $U_{\sim}/U_0 \approx 0.6...0.65$ (U_0 - постійна напруга на діоді), при якому отримувалась потужність $P_{гр}$.

Результати досліджень

Результатом роботи програми є чисельні значення параметрів робочої точки ЛПД, геометричне місце точок (ГМТ) яких зображене на рис. 4, 5.

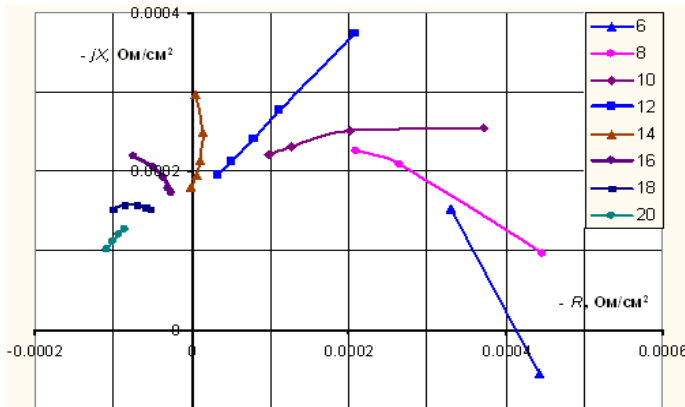


Рис.4 Температурна залежність імпедансу діода на комплексній площині при різних значеннях U_{\sim} , В

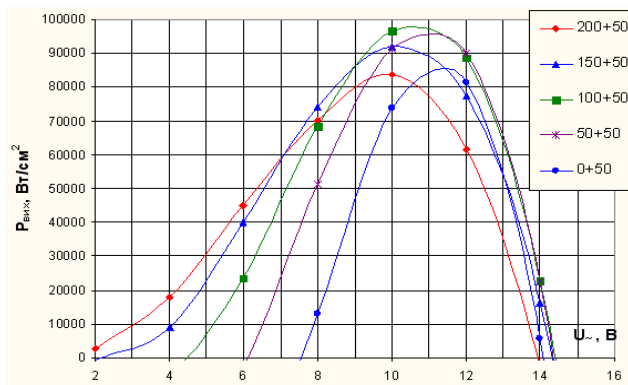


Рис.5 Залежність вихідної потужності $P_{вих}$, Вт/см² від вхідної напруги U_{\sim} при різних значеннях температури $\theta_{крисст} + \Delta\theta_{p-n}$, °С

значачає частоту генерації, тому остання є швидкозмінною у часі і знаходиться значно вище робочої. Зі зменшенням амплітуди сигналу температурна зале-

На рис. 4 показана залежність питомого опору діода Z_d на комплексній площині від температури $T_{довк}$ при різних величинах напруги U_{\sim} , В. Температурний крок між точками для кожної лінії складає 50⁰С і змінюється від 0 до 200⁰С. Для ліній при малих величинах U_{\sim} кількість точок зменшується з боку менших температур.

З ростом температури модуль опору $|Z_d|$ зменшується. При великих значеннях U_{\sim} (≥ 14 В) спостерігається виродження активної складової опору ($Re(Z_d) + \rho_S > 0$), при якій зникає від'ємна провідність, а отже, й умови генерації НВЧ- сигналу. В області малих значень напруги U_{\sim} спостерігається виродження реактивної складової опору ($-jX_d \rightarrow +jX_d$), при якому Z_d набуває чисто активного характеру. Реактивність jX_d ви-

жність зростає, хоча одночасно при цьому зменшується тепловий розігрів діода. Даний ефект пояснює нестабільність роботи ГЛПД при струмах, значно менших за робочі. З ростом температури спостерігається значна зміна нахилу лінії імпедансу $dZ_d/d\theta$ та dZ_d/da , що необхідно враховувати при синтезі системи узгодження опорів Z_d та навантаження. Крім того, для мінімізації внутрішньоімпульсного температурного та частотного дрейфу слід виконати умови ортогонального перетину ліній Z_d та Z_n . Цю операцію неможливо виконати для обох дестабілізуючих чинників, бо вектор відхилення в них різний. Перспективним є дослідження можливості амплітудного або/і частотного компенсування за рахунок використання змінного у часі імпульсу струму живлення j_s . На рис.5 зображені криві питомої вихідної потужності $P_{вих}$ при різних температурах кристалу та перегріву в області $p-n$ переходу $\Delta\theta_{p-n}$. Температура локального перегріву $\Delta\theta_{p-n}$ задана і рівна розрахунковому значенню. З рисунку видно, що максимум потужності $P_{вих}$ знаходиться в межах 90...100 кВт/см², що близько до практично досяжних результатів. Залежність екстремуму $P_{вих}$ від температури виражена слабо і дає максимум при робочих температурах $\theta_{крисст} \approx 150^\circ\text{C}$. При цьому очікується дзвоноподібна форма НВЧ сигналу при оптимальному енергетичному налаштуванні ГЛПД. Генерація НВЧ потужності спостерігається у широкому діапазоні амплітуд U_{\sim} . З ростом температури напруга U_{\sim} , що відповідає максимальній $P_{вих}$ зменшується. Перехід від питомих параметрів до еквівалентних здійснюється через площу кристалу $S_{лпд}$. Великі значення $S_{лпд}$ потенційно можуть дати більшу вихідну потужність, але потребують складного механізму узгодження і трансформації опору, який складає одиниці і долі омів на робочій частоті.

Висновки

Врахування приведених особливостей роботи імпульсних ГЛПД дозволяє апріорно проектувати твердотільні генератори з параметрами, близькими до оптимальних. Перспективним є проведення оптимізації структури активного шару для менших питомих струмів, дослідження впливу похибки виготовлення та розробка універсальних методик розрахунку і проектування генератора під конкретний НВЧ параметр.

Література

1. Касаткин Л.В., Чайка В.Е. Полупроводниковые устройства миллиметровых волн. - Севастополь: Вебер, 2006, с.31-47.
2. Б.А. Коцержинский, В.П. Тараненко, В.А. Трапезон. Импульсные генераторы миллиметрового диапазона волн на лавинно-пролетных диодах. - Изв. Вузов СССР. Радиоэлектроника. №10. 1982, с. 56-64.
3. Новожилов У.В., Чайка В.Е. Импедансные характеристики ЛПД мм-диапазона.// Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ - 1989 - Вып. 2. с. 36-41.

Березюк Ф.Б., Зоренко А.В. Анализ импедансных характеристик ГЛПД Приведена модель мощных твердотельных генераторов миллиметрового диапазона, учитывающая нестационарный импеданс импульсных генераторных лавинно-пролетных диодов	Berezuk F.B., Zorenko A.V. Analysis of impedance characteristics of IMPATT-generators Model of power solid-state oscillators in a millimeter wave band is presented. This model based on non-stationary impedance characteristics of pulse oscillating impact avalanche transit time diodes.
--	---