

прогресивних методів інтегральної технології.

Література

1. Makimoto M. Varactor tuned bandpass filters using microstrip line ring resonators.// IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., 1986, p. 411-414.
2. Sagawa M. Dielectric split ring resonators and their application to filters and oscillators.//IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., 1988, p. 605-608.
3. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р. Синтез четырехполосников и восьмиполосников на СВЧ. М., Связь, 1971.

Маслюк Т.В., Омеляненко М.Ю., Туреева О.В. Микрополосковые фильтры на кольцевых резонаторах дециметрового диапазона длин волн Приведены результаты теоретического и экспериментального исследования микрополосковых фильтров на кольцевых резонаторах, которые позволяют уменьшить габариты устройств в коротковолновой части дециметрового диапазона длин волн и улучшить их электрические и технологические характеристики.	Maslyuk T.V., Omelianenko M.Y., Turieieva O.V. Microstrip filters, based on ring resonators, in the short part of decimeter wavelength band The results of an design of theoretic and experimental research of a microstrip filters, based on ring resonators, which enable to reduce their dimensions in the short part of decimeter wavelength, have the improved electrical and technological characteristics are given.
--	--

УДК 615.471:616

**ЧИСЕЛЬНО-АНАЛІТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
ГЕНЕРАТОРА ШУМУ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ
НА КОРПУСНИХ ЛАВИННО-ПРОЛІТНИХ ДІОДАХ**

Перегудов С.М.

Розглянута чисельно-аналітична модель генератора шуму міліметрового діапазону на лавинно-пролітних діодах. Характеристики генератора розраховуються на підставі чисельно – аналітичного методу.

Вступ. Постановка задачі

Генератори шуму на лавинно-пролітних діодах (ГШЛПД) знайшли широке застосування в техніці СВЧ та метрології [1]. Освоєння діапазону міліметрових хвиль і використання їх властивостей в медико-біологічній практиці підвищили вимоги до таких пристроїв - як складова частина медичної апаратури [2] вони повинні мати достатньо низьку собівартість виробництва при високій відтворності основних параметрів. В результаті зростає значення моделювання при проектуванні і модернізації ГШЛПД.

В дециметровом і сантиметровому діапазонах довжин хвиль побудова моделей подібних генераторів базується на методах еквівалентних схем і иммитансних матриць [3]. При цьому еквівалентні схеми дають спроможність визначити частотну залежність, а иммитансні матриці – використовувати результати вимірювань. Однак в міліметровому (мм-) діапазоні такий підхід неприйнятний, оскільки розміри пристроїв стають сумірними з робочою довжиною хвилі, і поняття еквівалентної схеми і иммитансної матриці втрачають сенс [4]. Практично у вказаному діапазоні можна вимірювати рівні потужності, а не струми та напруги. Становище ускладнюється-

ся й тим, що підвищені вимоги по радіогерметичності до апаратури медичного призначення вимагають використання хвилеводних конструкцій, а для забезпечення ремонтпридатності бажано застосовувати корпусні напівпровідникові прилади. Введення при розрахунку генераторів поняття ємності або індуктивності корпусу не завжди обгрунтоване, оскільки в тій або іншій частині пристрою можливе існування двох або більше мод, тоді як саме поняття еквівалентних ємності та індуктивності припускає існування одномодового режиму [5]. Якщо остання умова не виконується, слід застосовувати методи електродинаміки, що часто-густо веде до математичних складностей [6]. З урахуванням особливостей конструкції ЛПД розрахунок ГШЛПД зручно проводити за допомогою програм трьохмірного моделювання *Agilent HFSS v.5.6* [7] або *Ansoft HFSS v.8-10* [8], які дозволяють обчислити параметри хвильової матриці розсіяння (*S-матриці*). Їх недоліком є неможливість моделювання активних приладів, хоча врахувавши, що розміри напівпровідникової структури діода мм-діапазону багато менші довжини хвилі, можливо застосування еквівалентної схеми ЛПД для розрахунку його імпедансу [1,2,9]. При подальшому моделюванні генератора застосовується пакет *HFSS* з урахуванням отриманих значень імпедансу і метод сигнальних графів [10] для врахування умов експлуатації.

Опис моделі генератора шуму

При моделюванні ГШЛПД його зручно розглядати не як двополіусник з чотирьохполіусником, що узгоджує, а як шестиполіусник (рис.1а), що характеризує з'єднання прямокутного хвилеводу довжиною $(l_1 + l_2)$ і радіальної лінії. До плечей (портів) 1-1 і 2-2, які мають прямокутний перетин, підключені відповідно двополіусник *M*, який служить елементом настройки генератора, і зовнішнє навантаження *L*. Γ_M і Γ_L – відповідні коефіцієнти відбиття. ЛПД (Z_D) включений до плеча 3-3, що представляє вхід радіальної лінії, утвореної основами циліндрових утримувачів діода.

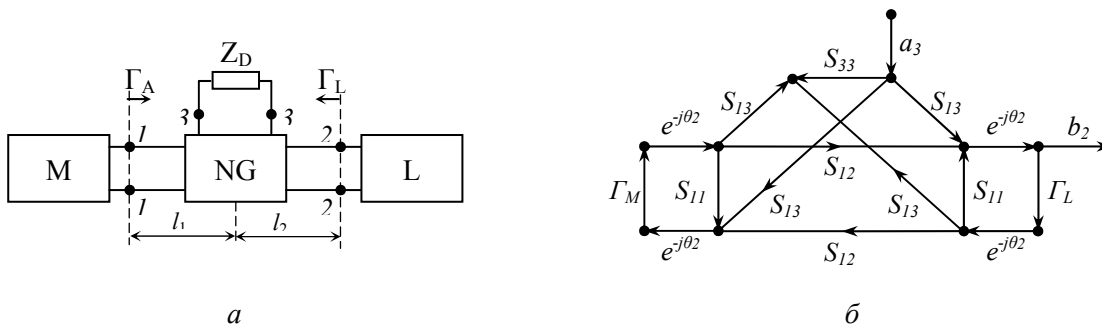


Рис.1. Структурна схема (а) і сигнальний граф (б) ГШЛПД

На рис. 1б показаний сигнальний граф навантаженого шестиполіусника. Коефіцієнтами передачі його гілок є елементи *S-матриці*, розрахованої для пасивної частини ГШЛПД з урахуванням Z_D , а також Γ_M , Γ_L та для Γ_M , Γ_L , і $e^{-j\theta_1}$, $e^{-j\theta_2}$, де: $\theta_{1,2} = \frac{2\pi}{\Lambda}$, (Λ – довжина хвилі в хвилеводі). З боку ЛПД в шес-

типолюсник поступає сигнал $a_3 = \sqrt{kT_0 N \Delta f}$ (k – стала Больцмана, $T_0 = 300$ К, N – коефіцієнт шуму ЛПД, Δf – смуга робочих частот. З виходу ГШЛПД (перетин 2-2) в навантаження поступає сигнал b_2 .

Таким чином, для аналізу роботи генератора необхідно знати коефіцієнт передачі сигнального графа з плеча 3-3 до плеча 2-2. Моделювання здійснюється за алгоритмом, що реалізує описаний комбінований підхід: 1) задаються початкові дані моделі - параметри ЛПД мм-діапазону, Γ_M , Γ_L , відстані l_1 і l_2 від центру шестиполусника до 1-1, 2-2; 2) розраховується імпедансу діода згідно [1,9]; 3) визначається S -матриця пасивної частини конструкції за умови, що напівпровідникова структура підключена до зосередженого порту 3-3; 4) за наслідками розрахунку складається сигнальний граф (рис. 1б); 5) розраховується коефіцієнт передачі потужності від джерела шуму в навантаження; 6) проводиться аналіз впливу Γ_M і положення діода в хвилеводі на характеристики генератора.

Розрахунок імпедансу діодної структури

Для збільшення рівня шуму в ГШЛПД доцільно застосовувати ЛПД з двохпролітною структурою, імпеданс якої визначається як [1,9]:

$$R(\omega) = - \sum_{i=n,p} \frac{\beta_{ia}^2}{1 - \beta_{ia}^2} \cdot \frac{1}{\omega C_i} \chi(\vartheta_i), \quad (1)$$

$$X(\omega) = - \frac{1}{\omega C} - \sum_{i=n,p} \frac{\beta_{ai}^2}{1 - \beta_{ai}^2} \cdot \frac{1}{\omega C_i} \lambda(\vartheta_i), \quad (2)$$

де $\omega = 2\pi f$ – робоча частота, C – ємність p - n -переходу; $C_{n,p}$ – ємності збіднених шарів n - і p -областей; $\lambda(\vartheta_{n,p})$, $\chi(\vartheta_{n,p})$ – функції кутів прольоту носіїв заряду; $\beta_{a n,p}$ – відношення лавинної частоти $\Omega_{a n,p}$ до робочої ω . Для визначення $\Omega_{a n,p}$ можна використати [11,12]. При струмі ЛПД 50 мА отримуємо:

$$\Omega_{a n} \approx \Omega_{a p} = \Omega_a \approx 5,8 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1} \quad (3)$$

З урахуванням (1-3) і наведених в літературі значень, що входять у формули параметрів, був проведений розрахунок для типового двохпролітного ЛПД мм-діапазону (див.рис. 2) Видно, що як активна, так і реактивна складові імпедансу різко зростають при частотах, близьких до лавинної. Тому при проектуванні ГШЛПД бажано вибирати структури, в яких Ω_a більше, ніж верхня частота робочого діапазону, що підвищує і стійкість генератора.

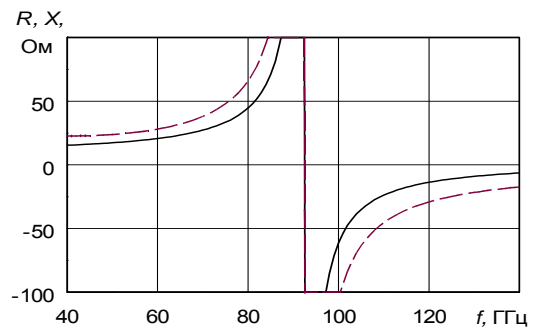


Рис.2.

Розрахунок S - параметрів ГШЛПД

Розрахунок S -параметрів шестиполусника проводився за допомогою програми Ansoft HFSS v.9.2, особливістю якої є можливість завдання зосе-

реджених внутрішніх портів визначеного імпедансу. Спрощений ескіз побудованої геометричної моделі генератора наведений на рис. 3. Корпус діода 5 -діелектрична втулка висотою h , внутрішнім радіусом r_0 і зовнішнім $2r_0$. Електричний контакт напівпровідникової структури з утримувачем 2 здійснювався за допомогою двох

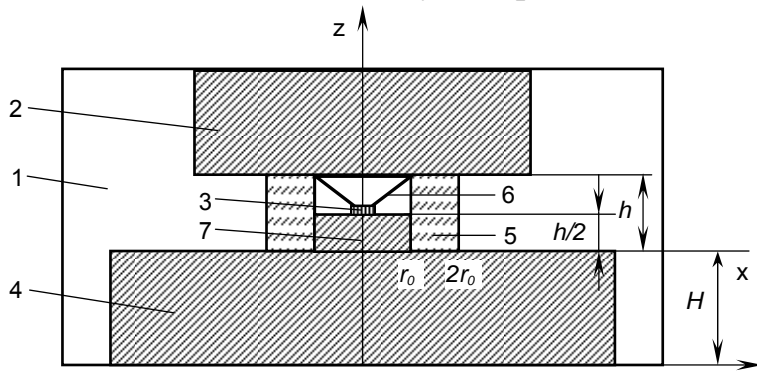


Рис.3. Ескіз конструкції ГШЛПД

плоских провідників 6, розташованих хрест навхрест, і металевого п'єдесталу 7 висотою $h/2$. Припускалося, що утримувач 2 з'єднаний з позитивним полюсом джерела живлення і ізолюваний від корпусу генератора. Розміри діода: $h=0,4$ мм; $r_0=0,2$ мм; діелектрична проникність корпусу $\epsilon = 9,8$; діаметри утримувачів 2 і 4 - відповідно 1,7 і 3,0 мм; провідники 6 – ширина 120 мкм, товщина 10 мкм. Порту 3 призначалися отримані значення імпедансу діода $Z(\omega)=R(\omega)+jX(\omega)$, а положення H діода варіювалося. Кінцевий результат розрахунку - S -параметри. На рис. 4 наведена частотна залежність одного з них – параметра S_{13} .

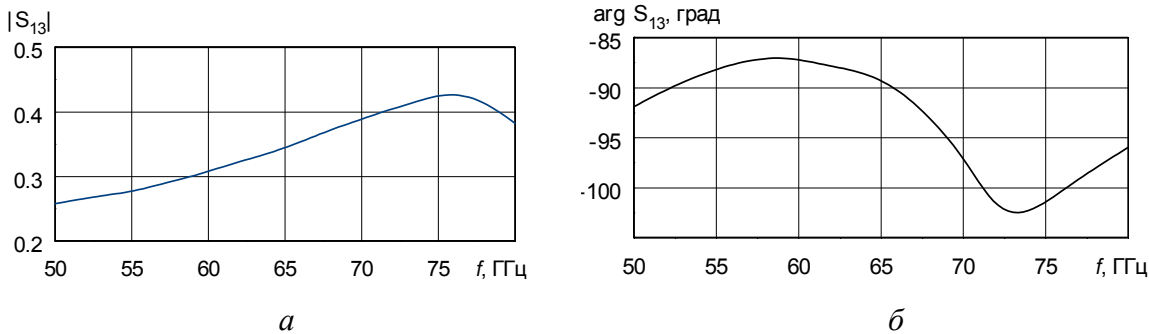


Рис.4. Залежність модуля (а) і аргументу (б) від частоти

Розрахунок амплітудно-частотної характеристики ГШЛПД

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) генератора шуму - залежність коефіцієнта передачі потужності з порту 3 шестиполіусника в навантаження L (рис.1), може розраховуватись за програмою HFSS. Проте технічно це не завжди виправдано, оскільки модель пристрою ускладнюється, і час розрахунку збільшується. Зручніше подальше моделювання ГШЛПД проводити, використовуючи аналітичні вирази, які отримані методом сигнальних графів [10]. Застосовуючи правило Мезона до графа (рис.1б),

отримуємо
$$K = \frac{b_2}{a_3} = \frac{S_{13}e^{-j\theta_2} (1 - S_{11}\Gamma_M e^{-j2\theta_1}) + S_{12}S_{13}\Gamma_M e^{-j(2\theta_1+\theta_2)}}{1 - S_{11}(\Gamma_M e^{-j2\theta_1} + \Gamma_L e^{-j2\theta_2}) + S_{11}^2\Gamma_M\Gamma_L e^{-j2(\theta_1+\theta_2)}}.$$
 Якщо генератор

працює на злагожене навантаження то:
$$K = \left(S_{13} + \frac{S_{12}S_{13}\Gamma_M e^{-j2\theta_1}}{1 - S_{11}\Gamma_M e^{-j2\theta_1}} \right) e^{-j\theta_2}$$

Звідси коефіцієнт передачі потужності:

$$K_p = KK^* = |S_{13}|^2 \left[1 + 2 \operatorname{Re} \left(\frac{S_{12} \Gamma_M e^{-j2\theta_1}}{1 - S_{11} \Gamma_M e^{-j2\theta_1}} \right) + \frac{|S_{11}|^2 |\Gamma_M|^2}{1 + |S_{11}|^2 |\Gamma_M|^2 - 2 \operatorname{Re} (S_{11} \Gamma_M e^{-j2\theta_1})} \right]$$

Якщо M є злягодженим навантаженням, то $K_p = |S_{13}|^2$. На рис. 5а наведена частотна залежність приведенного коефіцієнта передачі K_p/K_{pmax} : експериментальна (для $|\Gamma_M| \approx 0,25$ і $H = 0,75$ мм) - крива 1 і розрахункові для $|\Gamma_M| = 0$, $H = 1$ мм - крива 2 та $H = 0,65$ мм - крива 3. Видно, що збільшення H приводить до підйому АЧХ на високих частотах, і розрахункова крива наближається до експериментальної. У разі, коли $\Gamma_M = -1$, K_p визначається як $K_p = |S_{13}|^2 \left[1 - 2 \operatorname{Re} \left(\frac{S_{12} e^{-j2\theta_1}}{1 + S_{11} e^{-j2\theta_1}} \right) + \frac{|S_{11}|^2}{1 + |S_{11}|^2 + 2 \operatorname{Re} (S_{11} e^{-j2\theta_1})} \right]$ і сильно залежить від положення l_1 двополюсника M (в даному випадку – короткозамикача).

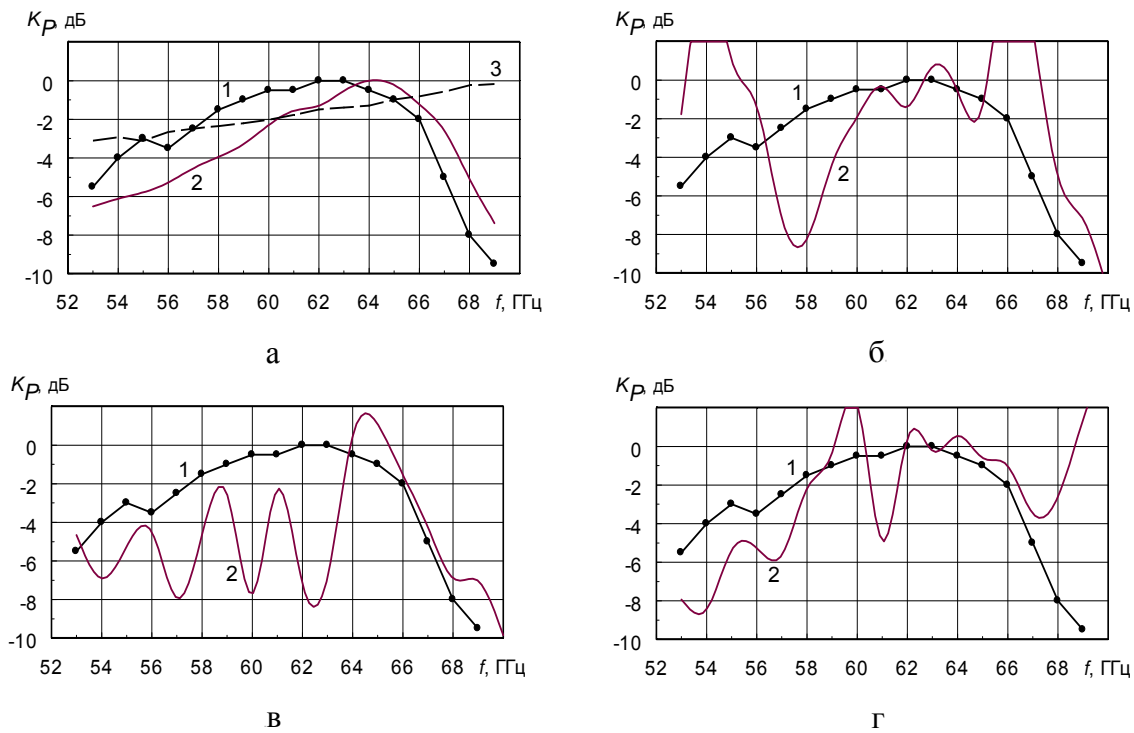


Рис.5. Амплітудно-частотна характеристика ГШЛПД.

Експеримент при $H = 0,75$ мм (1); розрахунок при $H = 1$ мм (2) и $H = 0,65$ мм (3).

До плеча 1 підключені: злягоджене навантаження (а); короткозамикач на відстані l_1 - 5 мм (б), 6 мм (в), 7 мм (г).

Розрахована частотна залежність коефіцієнта передачі K_p : для трьох положень короткозамикача наведена на рис. 5б-г. Там же для порівняння наведена, як і раніше, експериментальна крива. Як впливає з рисунка, ладнання генератора можна здійснювати переміщенням короткозамикача, добиваючись розширення смуги робочих частот. Але при цьому АЧХ має істотну нерівномірність (більше 8 дБ), а для деяких частот K_p сягає значень, більших за 1 (нестійкість генератора). Аналіз результатів показує, що реа-

лізовуючи двополюсник M (рис. 1) з $|\Gamma_M| \approx 0,25$, можна добитися нерівномірності АЧХ в межах ± 3 дБ.

Висновки

При розрахунку ГШЛПД доцільно застосовувати як аналітичні так і чисельні методи. Чисельні методи застосовуються для розрахунку пасивної частини генератора, а аналітичні – для розрахунку напівпровідникової структури і АЧХ генератора в цілому. При моделюванні використовуються довідкові дані діода та шестиполюсник, в одне плече якого, що є входом радіальної лінії, включений діод, а в інше, перетин прямокутного хвилеводу, що має, – двополюсник із змінним коефіцієнтом відбиття Γ_M . При ладнанні змінюється положення діода в хвилеводі або двополюсник M в одному з плеч шестиполюсник (кращі результати - при $\Gamma_M < 1$).

Література

1. Алмазов-Долженко К.И. Коэффициент шума и его использование на СВЧ. – М.: „Научный мир”, 2000.– 240 с.
2. Ситько С.П., Скрипник Ю.А., Яненко А.Ф. Аппаратное обеспечение современных технологий квантовой медицины. – Киев: „ФАДА ЛТД”, 1999.– 200 с.
3. Давыдова Н.С., Данюшевский Ю.В. Диодные генераторы и усилители СВЧ. – М:Радио и связь. 1986. – 184 с.
4. Касаткин Л. В., Чайка В. Е. Полупроводниковые устройства диапазона миллиметровых волн. – Севастополь: „Вебер”, 2006. – 319 с.
5. Marcuvitz N. Waveguide Handbook.– „Peter Peregrinus Ltd.”, 1986. – 425 с.
6. Буторин В.М. Двойная диско-штыревая структура в прямоугольном волноводе // Радиотехника и электроника. – 1987. – № 12. – С. 2490-2496.
7. Банков С.Е., Курушин А.А., Разевиг В.Д. Анализ и оптимизация трехмерных СВЧ-структур с помощью HFSS. – М.: „СОЛОН-Пресс”, 2004. – 208 с.
8. High Frequency Structure Simulator v.9.2. User’s Guide. Pittsburgh: Ansoft Co. 2004.
9. Алексеев Ю.И., Демьяненко А.В. Расчет импеданса лавинно-пролетного диода в малосигнальном режиме//Известия вузов. Электроника. – 2005. – №1. – С. 25-28.
10. Силаев М.А., Брянцев С.Ф. Приложение матриц и графов к анализу СВЧ устройств. – М: Сов. радио, 1968. – 248 с.
11. Полупроводниковые приборы. Сверхвысокочастотные диоды. Справочник / Под ред. Наливайко Б.А. Томск: МГП „РАСКО”, 1992. – 224 с.
12. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 1 – М.: „Мир”, 1984. – 455 с.

<p>Перегудов С.Н. Численно-аналитическое моделирование генератора шума миллиметрового диапазона на корпусных лавинно-пролетных диодах Рассмотрена численно-аналитическая модель генератора шума миллиметрового диапазона на лавинно-пролетных диодах. Характеристики генератора рассчитываются, используя численно-аналитический подход.</p>	<p>Peregudov S.N. Numeral-analytical design of noise generator of millimeter range on corps IMPATT diodes The numeral-analytical model of noise generator of millimeter range on IMPATT diodes is considered. It is shown; that it is possible to calculate parameters of generator, applying numeral approach at the design of passive part of generator and analytical approach at the design of its active part.</p>
---	--