

ТВЕРДОТІЛЬНІ ПОТУЖНІ НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДЖЕРЕЛА МІЛІМЕТРОВИХ ХВИЛЬ НА НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДІОДНИХ ЕЛЕМЕНТАХ

Авдєєнко Г.Л., Бичок А.В.*, Наритник Т.М., Карушкін Н.Ф.,
Крючкова Л.П.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Київ, Україна/

*Державне підприємство науково дослідний інститут «Оріон», Київський національний університет
ім. Т. Шевченка, Київ, Україна.

E-mail: django2006@ukr.net,
andrey.bychok@gmail.com,
t.natytnyk@ukr.net,
ndiorion@tsua.net,
alara54@ukr.net

Abstract

The paper presents an analytical review of the level of development of semiconductor high-power sources of the millimeter wavelength range. The possibilities and trends of the development of semiconductor high-power sources of the millimeter wavelength range are shown, which are based on the idea of summing up the powers of microwave radiation in the short-wave part of the spectrum and increasing the efficiency of avalanche-span diodes through the use of new semiconductor structures, the use of dielectric materials and wide-gap semiconductors. The electrodynamic designs of waveguide and hybrid-integrated type generators are presented. The reduction of contour losses is achieved in an oscillatory system made on an open resonator in the form of a radial line. The results of the development of an avalanche-span diode and oscillatory systems of diode generators for creating microwave radiation sources in the short-wave part of the spectrum are given. The parameters of a generator based on a silicon LPD stabilized by a radial resonator, synchronized amplifier generators based on avalanche diodes, a 5-stage amplifier based on silicon Si LPDs with a power adder on H-type bridges, synchronized by an input generator at a frequency of 140 GHz with an output power of 180 mW, synchronized pulse generators, the power level of which in the eight-millimeter frequency range reaches over 100 W, and high-multiplicity frequency multipliers (multiplication factor reaches 20) in the frequency band 138-142 GHz with an output power of 40 mW are given.

Вступ

Розвиток напівпровідникових джерел надвисокочастотного (НВЧ) випромінювання в міліметровому діапазоні відбувається за двома основними напрямками. Один напрямок – це безперервне удосконалення, пов'язане з підвищенням граничної робочої частоти таких приладів, як біполярний та польовий транзистори [1]. Інший напрямок – це використання двоелектродних діодних приладів, заснованих на поєднанні ефектів лавинного множення і часу прольоту електронів, а також приладу на основі ефекту об'ємного негативного опору при міждолинному перенесенні електронів [2, 3]. Двоелектродний прилад з негативним опором, що діє на новому принципі – тунельний діод не має можливостей отримання великої вихідної НВЧ потужності через малий струм і напругу в області негативного опору [2].

Твердотільні НВЧ-генератори перетворюють енергію постійного джерела в енергію високочастотних коливань шляхом взаємодії коливальної системи з твердотільними активними елементами, такими як транзистор, лавинно-пролітний діод, діод Ганна. При аналізі роботи генератора НВЧ струм через нелінійний активний елемент або напруга можуть бути представлені синусоїдальними завдяки високій добротності резонатора, в який поміщено твердотільний активний елемент. Розміри

резонатора для короткохвильової частини міліметрового діапазону стають настільки малими, що виконувати коливальну систему для цієї ділянки електромагнітного спектру з малими втратами стає важко. Проблема втрат у контурі коливальної системи є особливо важливою для напівпровідникових активних структур, що мають низький імпеданс.

У діапазоні частот, що розглядається, рівень потужності джерел коливань є одним з найбільш важливих параметрів [4]. Наявність малих контурних втрат суттєво покращує характеристики генераторів, які налаштовуються, та дозволяє підвищити рівень вихідної потужності. Для зменшення втрат коливальну систему доцільно виконувати на відкритій радіальній лінії. При цьому досить високий імпеданс лінії передачі трансформується в порівняно низький імпеданс навантаження радіальної лінії. Це основна причина, з якої коливальну систему з радіальним резонатором відкритого типу доцільно застосовувати в короткохвильовій частині НВЧ діапазону. Очевидно, що повні втрати у трансформаторі імпедансів мають бути мінімальними.

Метою роботи є аналітичний огляд напівпровідникових потужних джерел випромінювання у міліметровому діапазоні, виконаних на двополюсних активних діодних структурах різного типу, для виявлення перспективних напрямків їх подальшого розвитку.

Лавинно-пролітний діод для створення джерел НВЧ-випромінювання в короткохвильовій частині спектра

Найбільш ефективним активним напівпровідниковим елементом для створення джерел НВЧ-випромінювання в короткохвильовій частині спектра в даний час є лавинно-пролітний діод (ЛПД) [5].

Аналіз імпедансних характеристик ЛПД у короткохвильовій частині НВЧ спектру з дводрейфовою структурою показує, що величина негативного опору діода становить величину $(1 \div 4)$ Ома [6]. Повний опір втрат коливального контуру, включаючи опір НВЧ кола R_n має бути меншим за опір діода R_d і задовольняти умові $R_n \ll |R_d|$,

$$R_d = r_d + r_k + r_s, \quad (1)$$

де: r_d – негативний опір напівпровідникової структури;

r_k – омичний опір контактів;

r_s – опір розтікання напівпровідникової структури.

Основним частотно-вибірковим вузлом НВЧ коливальної системи генератора є діод з резонансною трансформацією імпульсу лінії передачі енергії до напівпровідникової структури. Запасена енергія у такій системі зосереджена в області корпусованого діоду, завдяки чому узагальнена добротність коливальної системи виявляється мінімальною [7].

Застосування радіальної лінії для створення коливальної системи генератора із використанням діодних структур дозволяє побудувати джерела випромінювання у всьому діапазоні міліметрових хвиль.

При створенні коливальних систем транзисторних джерел знаходять застосування діелектричні резонатори.

З метою збільшення вихідної потужності джерел випромінювання та зниження їх коефіцієнта шуму наводяться приклади синхронізації їх роботи при дії високостабільних та низькочастотних сигналів на вході.

Коливальні системи діодних генераторів міліметрового діапазону довжин хвиль.

У міліметровому діапазоні довжин хвиль в якості лінії передачі НВЧ-коливань широко використовуються хвилеводні лінії передачі, тому в якості коливальної системи знаходять застосування хвилеводні резонатори. Застосовуються електродинамічні конструкції генераторів та підсилювачів, виконані у вигляді хвилеводно-коаксіальних узгоджувачів. У таких конструкціях досягаються мінімальні контурні втрати та досягається максимальна вихідна потужність від заданого активного напівпровідникового елемента [2, 8, 9].

При цьому слід звернути увагу на складність налаштування і необхідність відсутності гістерезисів, які супроводжують стрибки частоти і амплітуди. Конструкція однорезонансної системи генератора на ЛПД показана на рис. 1

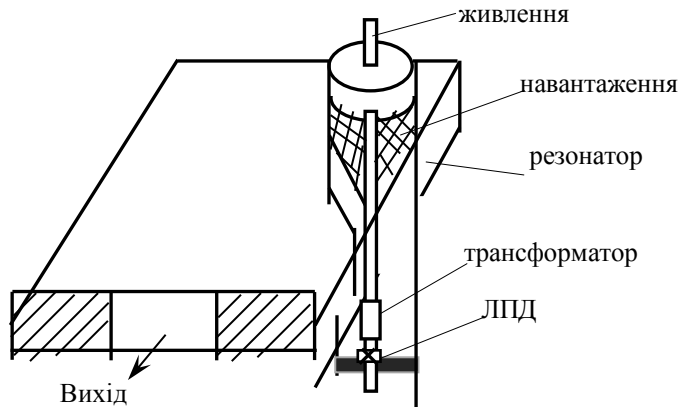


Рис.1. Конструкція однорезонансної системи генератора на ЛПД.

Активний елемент (ЛПД) встановлений на одному кінці коаксіальної лінії, пов'язаної з хвильоводним резонатором. Інший кінець коаксіальної лінії містить узгоджене навантаження на високу частоту та ізолюваний по постійному струму.

Еквівалентна схема генератора наведена на рис. 2, де LC - контур зображує резонатор, R_L – опір навантаження, R_i – власні втрати в резонаторі, R_0 – опір коаксіальної лінії.

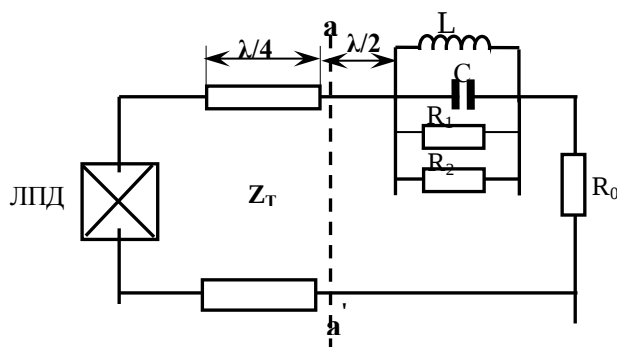


Рис. 2. Еквівалентна схема однорезонансного генератора на ЛПД.

Основною функцією зовнішнього кола є узгодження імпульсу діоду із опором лінії передачі. Власна добротність діоду зазвичай становить величину близьку до 10, і якщо схема не містить будь-яких зовнішніх реактивних елементів, стабільність частоти генератора буде дуже низькою. Тому для застосування, де потрібна висока стабільність, слід використовувати зовнішнє резонансне коло. Необхідне значення добротності такого резонатора залежатиме від вимог, що висуваються до генератора, а також від таких властивостей діоду як стабільність його імпедансу при зміні температури навколишнього середовища. Введення малих контурних втрат дозволяє суттєво покращити характеристики генератора та дозволяє використовувати різні типи коливальних систем.

В конструкції генератора хвильоводного типу, поданого на рис. 3, використано високودобротний резонатор. На резонансній частоті резонатора хвильовід по суті розімкнуто і кінцеве навантаження, що знаходиться за резонатором, не навантажує резонатор.

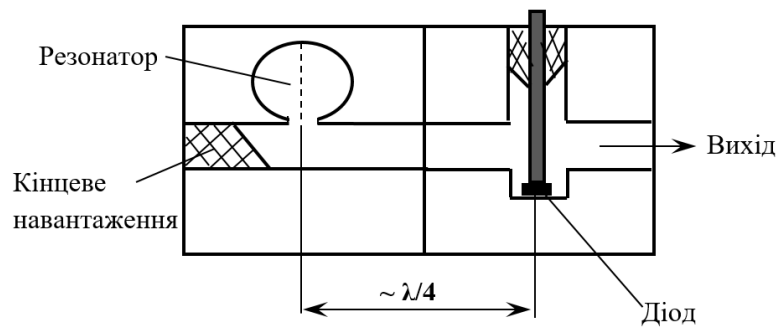


Рис. 3. Конструкція генератора на ЛПД хвильоводного типу.

Це уможливило генерацію коливань при роботі на хвильовдне навантаження. На частотах, віддалених від частоти резонатора, резонатор по суті короткозамкнутий і кінцеве навантаження перешкоджає виникненню коливань.

Проблема втрат у коливальній системі особливо важлива для ЛПД, що мають низький імпеданс. Щоб вирішити цю проблему, пов'язану із втратами, коливальну систему доцільно виконувати на радіальних резонаторах відкритого типу. Конструкція генератора з таким резонатором представлена на рис. 4. Конструкція містить хвильовдний канал (1), резонатор радіального типу (2), ЛПД (3), радіальний фільтр (4), поглинаюче навантаження (5), поршень короткого замикання у хвильоводі (7), штир живлення (6).

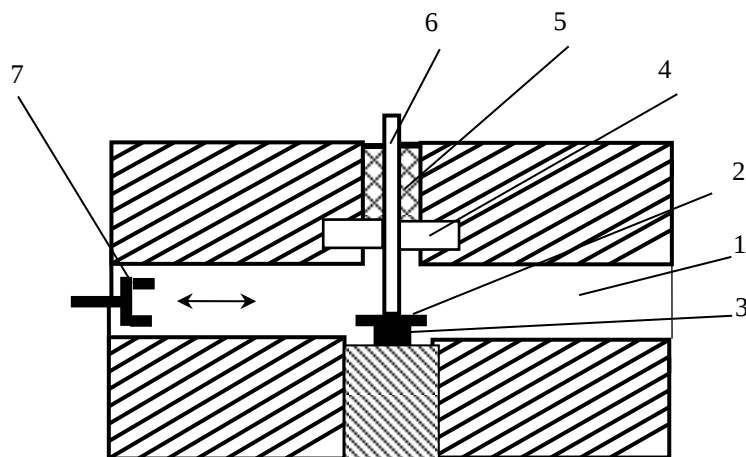


Рис. 4. Конструкція генератора на ЛПД з радіальним резонатором.

У зв'язку з тим, що ЛПД має негативний опір у широкій смузі частот, в колі зміщення встановлюється фільтр, що запирає коливання з частотами поблизу робочої частоти і є прозорим для всіх інших частот. За фільтром встановлюється резистивне навантаження.

На рис. 5 представлена еквівалентна схема генератора з радіальним резонатором, де

Z – опір ЛПД;

$Z_{вх}$ – вхідний опір радіальної лінії;

X_c – опір штиря та коаксіальної лінії;

K_3 – поршень;

Z_b – опір лінії передачі, підведеної до клем діодної структури.

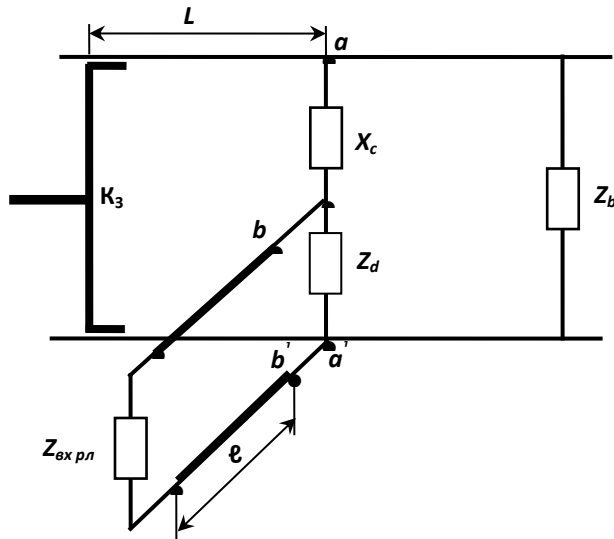


Рис. 5. Еквівалентна схема генератора с радіальним резонатором.

В еквівалентній схемі генератор представлено звичайною лінією, довжиною ℓ з включеною послідовно реактивністю X_c . У центрі під кришкою резонатора встановлено активну структуру ЛПД з імпедансом Z_d . $Z_{вх,рл}$ – вхідний опір розімкненої на кінці радіальної лінії.

Завдання побудови генератора на ЛПД із високими енергетичними характеристиками полягає у створенні конструкції корпусного діода, що зберігає принцип резонансної трансформації імпульсу діода. В еквівалентній схемі заміщення металодіелектричного корпусу діода діелектрична втулка є відрізком радіальної лінії. Таке уявлення є доцільним, оскільки в міліметровому діапазоні елементи корпусу діодів стають сумірними з довжиною хвилі і подання їх у вигляді елементів зосередженого типу стає несправедливим. У цьому випадку металодіелектричний корпус доцільно розглядати як радіальну лінію з розподіленими параметрами, що забезпечує трансформацію вхідного імпедансу лінії передачі до клем включення діодної структури для реалізації умов паралельного резонансу в схемі пристрою (рис.6).

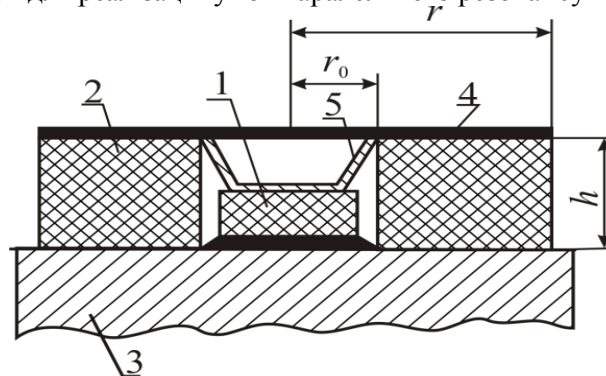


Рис. 6. Конструкція ЛПД с використанням рубінової втулки (2)
1 – структура ЛПД; 2 – рубінова втулка; 3 – тепловідвід;
4 – верхній електрод; 5 – золота проволока.

5

Зміною довжини радіальної лінії – діаметра втулки – досягається необхідна величина і характер реактивності для реалізації на клеммах напівпровідникової структури паралельного резонансу.

В якості корпусу діода використовується промисловий годинниковий камінь, виготовлений із синтетичного корунду – рубіну [10]. Тангенс діелектричних втрат $\tan \delta$ становить 0,0002, а значення діелектричної проникності $\epsilon = 9$. Технологія їх виготовлення відпрацьована протягом тривалого використання в годинниковій промисловості, що дозволяє забезпечити високу якість ідентичних виробів та низьку вартість. Зниження омичних втрат досягається за рахунок металізації торців втулок методом наплення контактів у вакуумі на торцеві поверхні. Цей метод забезпечує виключення попереднього

паяння торців корпусу за рахунок застосування термокомпресійного приварювання корпусу до основи діодної втулки та закриттям корпусу кришкою.

Змінюючи положення відбиваючого антипаразитного навантаження (рис.5), можна змінювати параметри генератора. При її положенні на відстані $\lambda/2$ відносно діода послідовно з імпедансом коливальної системи підключається імпеданс послідовного контуру. У цьому випадку забезпечується компенсація реактивних опорів, що покращує діапазонні характеристики генератора.

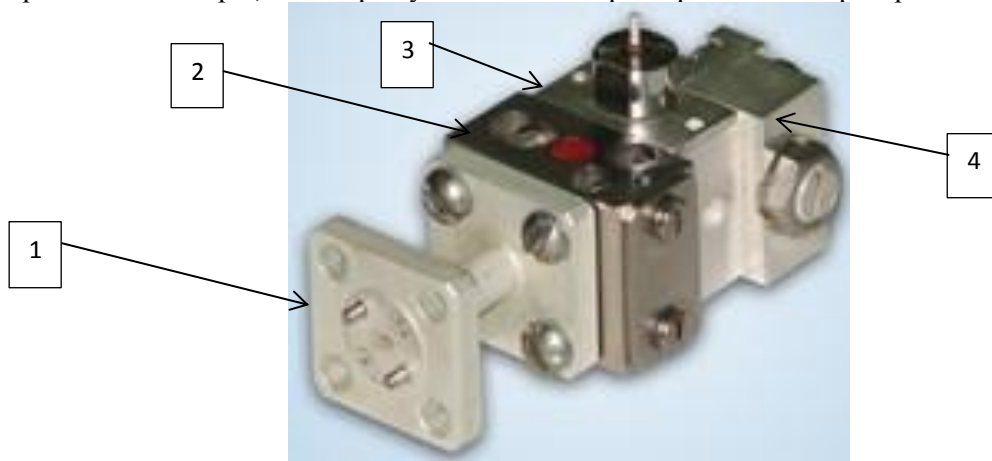


Рис.7. Фотографія генератора на кремнієвому ЛПД, стабілізованого зовнішнім резонатором.

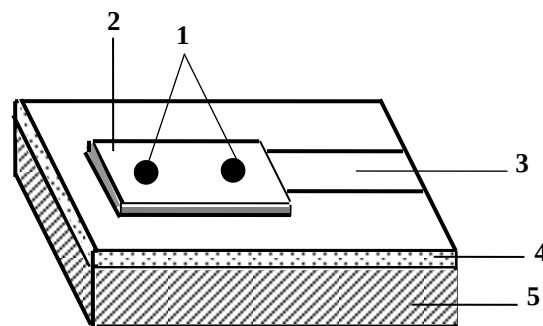
Основним частотно-вибірковим елементом НВЧ кола генератор – коливальна система є радіальний резонатор, що дозволяє трансформувати імпеданс лінії передачі до напівпровідникової структури. Запасена енергія у такій коливальній системі зосереджена переважно в зоні діода, а узагальнена добротність системи виявляється мінімальною.

На рис.7 наведено вигляд конструкції генератора на Si ЛПД, стабілізованого зовнішнім резонатором. Центральна частота вихідного сигналу знаходиться в діапазоні частот 92-96 ГГц, вихідна потужність сягає 0,15 Вт.

Генератор складеться з вихідного хвилеводу 1 з поперечним перерізом $2,4 \times 1,2$ мм (1), розв'язуючим феритовим вентилем (2), генераторної камери у вигляді хвиле водно-штирьової конструкції (3) та зовнішнього резонатора (4).

В роботі [11] представлена монолітна конструкція арсенідгалієвого ЛПД та наводяться його параметри в діапазоні частот 60 ГГц. ЛПД виконано на дводрейфових структурах GaAs, де кожна область дрейфу становить 0,2 мкм, а концентрація домішок в них $\sim (2-3) 10^{-17} \text{ см}^{-3}$.

На рис. 8 представлена схема конструкції дводіодного монолітного генератора з ЛПД.



**Рис. 8. Схема монолітної конструкції ГЛПД.
1 – ЛПД; 2 – резонатор; 3 – 50-омний вивід;
4 – плівка полііміду; 5 – тепловідвід.**

Коливальна система генератора містить два ЛПД з мезаструктурою діаметром 50 мкм, розташованих на відстані 0,75 мм один від одного і пов'язаних з мікрополосковим резонатором через

отвори в шарі полііміду ~ 10 мкм. Потужність НВЧ виводиться з резонатора з товщиною 50-омної лінії. Генератор забезпечує рівень потужності в безперервному режимі ~ 10 Вт.

Відведення великих потоків тепла, що виділяються, є однією з основних проблем при створенні джерел потужності в міліметровому діапазоні частот. Кільцева геометрія, виконана замість суцільної дискової мезаструктури (рис. 9), забезпечує покращення розсіювання тепла.

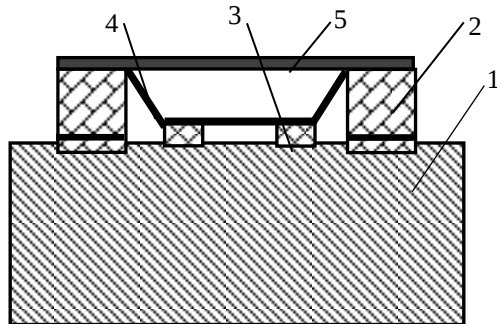


Рис. 9. Конструкція діода з кільцевою структурою ЛПД.
1 – тепловідвід; 2 – діелектричний трансформатор (втулка);
3 – кільцева структура ЛПД; 4 – золота сітка;
5 – кришка корпусу (радіального резонатора).

Порівняння звичайної дискової і кільцевої структур показали, що за рівної площі переходу R_T кільцевої структури становить 60 – 70% опору дискової структури. Шляхом оптимізації геометричних розмірів кільцевої структури та форми контактних елементів монтажу можна знизити втрати та значно збільшити рівень вихідної потужності [12,13]. При цьому ширину кільця структури необхідно вибрати рівною глибині скін-шару в області взаємодії НВЧ поля носіїв заряду напівпровідника.

Вся область, заповнена носіями заряду, починає ефективно взаємодіяти з НВЧ полем і не має шунтуючого впливу внутрішньої області.

У роботі [14] представлені результати досліджень охолоджуваних джерел у короткохвильовій частині НВЧ діапазону в інтервалі температур 300К÷77К з використанням кремнієвих структур ЛПД р + - р - п - п + типу. Охолодження джерел НВЧ-випромінювання дозволило збільшити ККД від 0,5% до 3,5% при одночасному збільшенні струму вдвічі. Максимальна потужність на частоті 170 ГГц була досягнута на рівні 280 мВт при ККД 3,5%, що на порядок перевищує рівень потужності, яка досягається при кімнатній температурі.

У таблиці 1 подано узагальнені результати розробок генераторів на діодах різних типів. Наведені дані є усередненням великої кількості даних, відомих з літературних джерел [1, 15, 16,17].

Необхідно відзначити роботи з використання широкозонних матеріалів для створення ЛПД зі значними потужностями [17]. В результаті вирішення низки технологічних проблем можливе створення ефективних ЛПД на основі нітриду галію (GaN) з рівнем неперервної потужності вище 3 Вт на частоті 150 ГГц.

Таблиця 1

Діапазон частот, ГГц	Потужність, мВт	СГПАШ дБ/Гц/10кГц	СГПЧШ дБ/Гц/10кГц	ККД, %	Тип діода
30 - 60	100-500	< 135	< 85	>5	Si DD ЛПД м
30 - 60	1000-2000	< (145-150)	< -90	15 - 20	GaAs DD ЛПД а
30 - 60	>100	< -145	< -100	>3	GaAs ДГ. ММ
30 - 60	>300	< -145	< -100	>10	In PDГ.
60 - 100	500	< -135	< -85	>8	Si DD ЛПД а
60 - 100	500 - 200	< -145	< -90	>6	GaAs ЛПД а
60 - 100	>200	< -145	< -105	>10	In PDГ а
100 - 140	>100			>2	Si DD ЛПД а
140 - 300	>10			>1	Si DD ЛПД а
140 - 200	>10			>1	In PDГ.

У таблиці прийнято позначення:

СППАШ – спектральна густина потужності амплітудного шуму в смузі 1 Гц на відстані від несучої 10 кГц;

СППЧШ – спектральна густина потужності частотного шуму в смузі 1 Гц на відстані від несучої 10 кГц;

Q – навантажена добротність стабілізуючого резонатора;

DD – кремнієвий дводрейфовий ЛПД;

а – алмазне тепловідведення;

м – мідне тепловідведення.

Синхронізовані генератори-підсилювачі на лавинно-пролітних діодах.

Діодні генератори в режимі зовнішньої синхронізації можна розглядати як синхронні підсилювачі. Їхня відмінність від стабільних підсилювачів полягає в тому, що при вимкненні вхідного сигналу потужність вихідного сигналу дорівнює автоколивальній. У стабільному підсилювачі при $P_{вх}=0$ потужність на виході відсутня. Зазначена обставина визначає сферу застосування стабільних підсилювачів – це в основному каскади передавальних та приймальних пристроїв у тих випадках, коли час приходу сигналу, що посилюється, не визначено. Слід зазначити, що досяжний рівень шуму діодних підсилювачів більший, ніж у мало шумливих транзисторних підсилювачах. При однакових рівнях вхідного сигналу та інших рівних умовах досяжний рівень вихідної потужності синхронного підсилювача більший, ніж у стабільному підсилювачі. Якщо порівнювати синхронні підсилювачі (СП) на різних активних елементах, то пристрої на ЛПД мають великі вихідні потужності, разом з тим і найвищий рівень шумів, що обмежує їх застосування. Відомо, що синхронізація високостабільним сигналом дозволяють значно знизити рівень частотних шумів сигналу на виході генератора, що синхронізується [13, 8]. Представляє інтерес зіставлення характеристик стабільного та синхронізованого підсилювачів, виконаних при використанні одного і того ж ЛПД та коливальної системи одного типу [1].

Залежності рівня вихідної потужності $P_{вих}$ від рівня вхідної потужності НВЧ $P_{вх}$ наведено на рис. 10. Діапазонні характеристики підсилювачів залишаються практично однаковими. Видно, що синхронні підсилювачі забезпечують вигравш у рівні вихідної потужності за умови рівності інших параметрів, що особливо суттєво в режимах підсилення малих за рівнем сигналів.

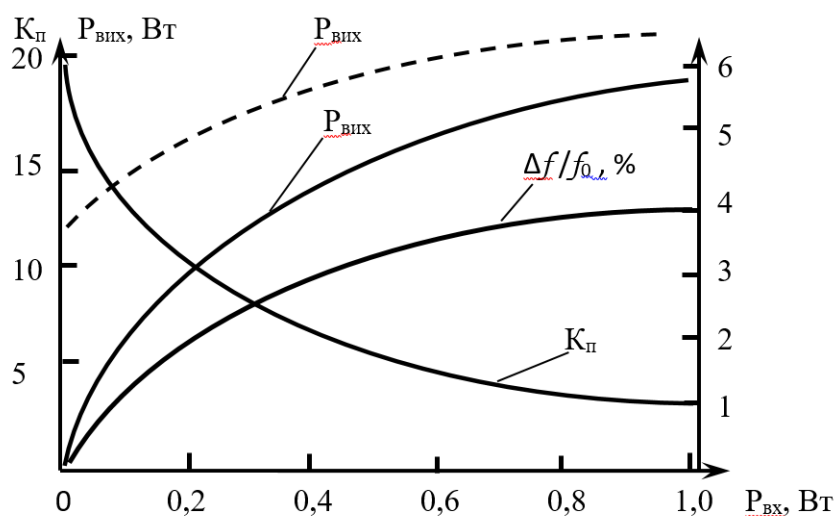


Рис. 10. Характеристики підсилювачів на ЛПД у діапазоні 35 ГГц від рівня вхідної потужності

$P_{вх}$ – вхідна потужність;

$K_п$ – коефіцієнт підсилення;

$\Delta f / f_0$ – смуга підсилення.

Принцип побудови передавальних НВЧ пристроїв міліметрового діапазону ґрунтується на застосуванні діодних генераторів, підсилювачів та суматорів потужності в режимі зовнішньої синхронізації високостабільним сигналом. Відомо, що синхронізація високостабільним сигналом дозволяє значно знизити рівень частотних шумів сигналів на виході пристрою, що синхронізується [13, 8].

На рисунку 11 наведено структурну схему та на рисунку 12 фотографію підсилювача 5-каскадного підсилювача на кремнієвих Si ЛПД з суматором потужності на мостах Н-типу, синхронізованих вхідним генератором, настроєним на короткозамкнутий поршень.

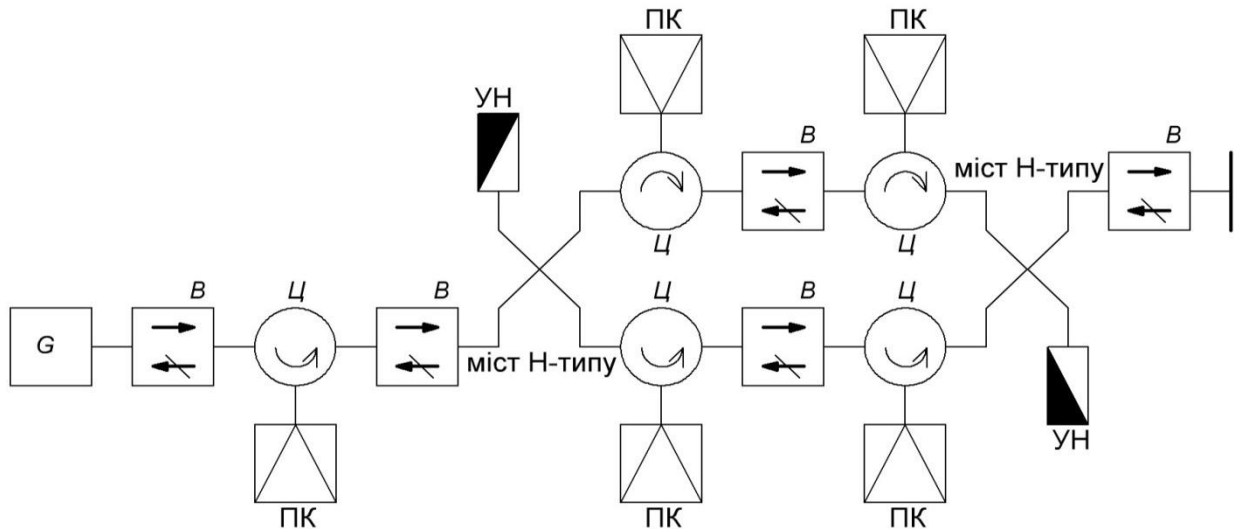


Рис. 11. Структурна схема 5-каскадного підсилювача частоти 140 ГГц на кремнієвих Si ЛПД з суматором потужності на мостах Н-типу.

Вхідний синхронізуючий генератор G настроєний на частоту 140 ГГц з потужністю 40 мВт. Сигнал синхронізації підсилювальних каскадів (ПК) надходить до них через циркулятор (Ц), між якими встановлені розв'язуючі вентиля (В). Розгалуження та сумування потужностей з ПК здійснюється за допомогою двох мостів Н-типу з встановленим в одному плечі узгодженим навантаженням (УН). Вихідна потужність на виході 5-каскадного підсилювача з перерізом хвильового каналу $1,6 \times 0,8$ мм досягає 180 мВт.

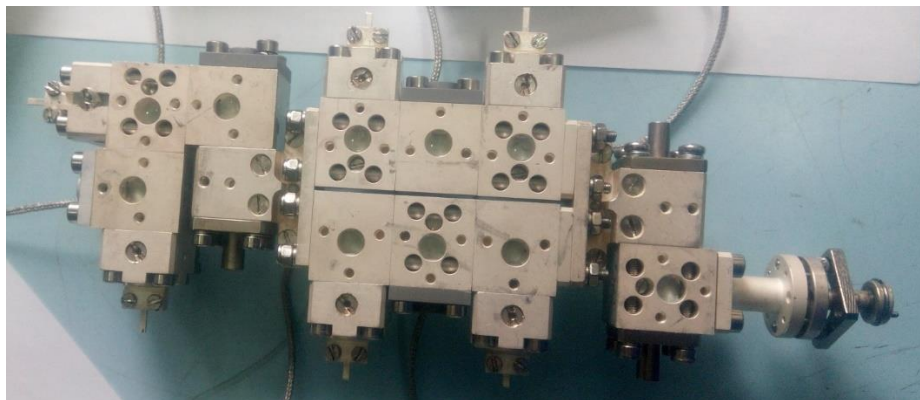


Рис. 12. Фотографія 5-каскадного підсилювача частоти 140 ГГц на кремнієвих Si ЛПД з суматором потужності на мостах Н-типу.

Синхронізовані генератори імпульсної дії

Основні особливості режиму зовнішньої синхронізації імпульсних генераторів пов'язані з нестаціонарністю теплового режиму діода, залежністю імпедансу діода від температури. В результаті виникає нестабільність НВЧ параметрів у межах тривалості імпульсу струму живлення.

У роботі [18] наводяться рішення, що забезпечують високу стабільність імпульсних генераторів ЛПД, засновані на комплексному застосуванні методів стабілізації [19].

Створення потужних імпульсних пристроїв у режимі зовнішньої синхронізації з урахуванням методів компенсації температурних змін імпедансу ЛПД дозволило створити потужні імпульсні передавачі міліметрового діапазону з посиленням на каскад 12 – 15 дБ із робочою смугою частот $\Delta f/f \geq 12\%$. Рівень потужності імпульсних джерел у міліметровому діапазоні частот досягається понад 100 Вт при нестабільності фази вихідного сигналу менше 15% [20,21].

Для прикладу наведемо результати розробки синхронізованого генератора імпульсної дії з електронним перемикачем частоти від імпульсу до імпульсу [22]. В якості задавального високостабільного джерела розроблено малогабаритний синтезатор частоти 8-міліметрового діапазону довжин хвиль. Структурну схему генератора наведено на рис. 13. Синтезатор формує імпульси НВЧ із рівнем потужності 1 – 1,2 Вт зі стабільністю частоти не гірше $2 \cdot 10^{-6}$.

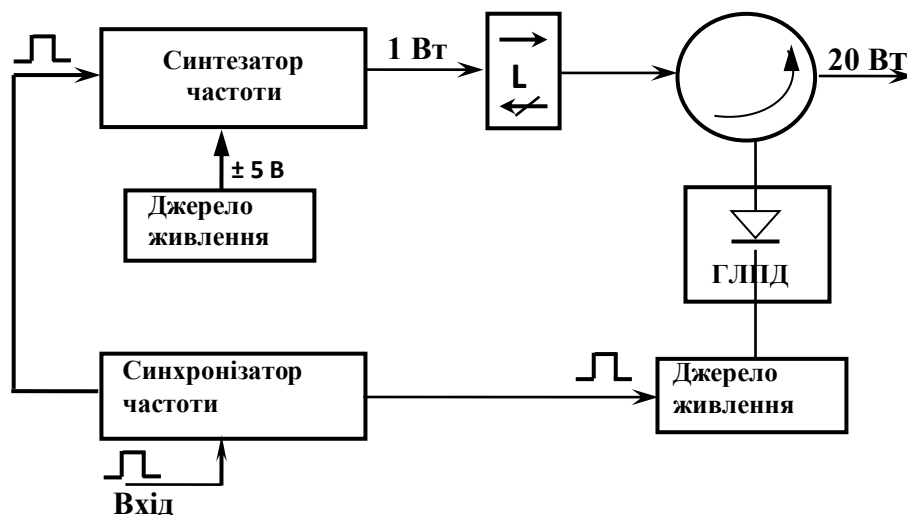


Рис. 13. Структурна схема генератора імпульсної дії з електронним перемикачем частоти.

Перемикач частоти виконується трирозрядним двійковим кодом у рівнях TTL. Конструкція ГЛПД виконана на базі хвильоводно-коаксіального з'єднання. Узгодження конструкцій ЛПД із хвильоводним трактом досягається вмонтуванням напівпровідникової структури діода в радіальний резонатор (рис. 6). При цьому додаткова неоднорідність в конструкції виключена. Залежність вихідної потужності та смуги синхронізації від рівня вхідної імпульсної потужності представлена на рис. 14.

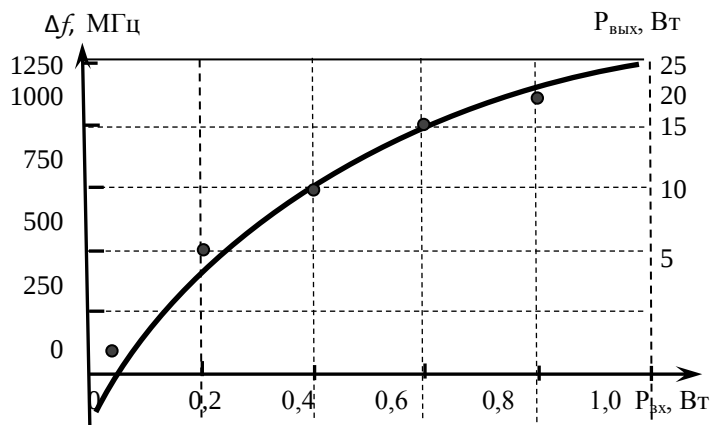


Рис. 14. Залежність вихідної потужності та смуги синхронізації від рівня вхідної імпульсної потужності при тривалості імпульсів НВЧ 300 нс.

Перетворювачі частоти високої кратності.

Проблема створення високостабільних джерел НВЧ коливань становить значний інтерес для багатьох застосувань. Один із шляхів створення таких джерел ґрунтується на застосуванні ЛПД у режимі ефективного перетворення частоти високостабільного низькочастотного сигналу [23]. Як відомо, цей режим забезпечує рівень потужності вихідного сигналу на N -ій гармоніці $P_{вих} \sim 1/N$, що суттєво перевищує досяжні характеристики помножувачів на діодах з накопиченням заряду, для яких $P_{вих} \sim 1/N^2$. Наведені у роботі [24] результати дослідження показують, що висока ефективність множення частоти ЛПД визначається в основному механізмом підсилення в межах тривалості імпульсу струму через діод і фазовою синхронізацією цих НВЧ коливань гармоніками періодичної послідовності імпульсів струму. Слід зазначити, що є багато застосувань, в яких перетворювачі частоти на ЛПД представляють безперечний інтерес, оскільки їх створення не вимагає застосування покупних елементів, складного технологічного обладнання та може бути здійснено за допомогою відпрацьованої технології.

Ефективні перетворювачі частоти на ЛПД високої кратності, що забезпечують отримання на виході високостабільного когерентного сигналу розроблялися активно в ДП НДІ «Оріон» для низки застосувань у системах зв'язку та радіолокації міліметрового діапазону довжин хвиль, у медичному та науковому приладобудуванні [25].

Типові значення параметрів розроблених когерентних помножувачів частоти наведено у таблиці 3 [24].

Таблиця 3.

Найменування параметра	W діапазон	F діапазон	D діапазон
Діапазон частот, ГГц	75 -100	90-140	110-170
Вихідна потужність, мВт	30	20	10
Коефіцієнт множення, K_y	12 - 15	13 - 20	15- 20
Смуга частот, ГГц	2	2	2
Вхідна потужність, Вт	0,5 – 1,0	0,5 – 1,0	0,5 – 1,0
Споживання, В/А	27/0,15	25/0,15	25/0,15

Конструктивно помножувачі частоти високої кратності містять феритові хвильоводні вентиля та смуго-пропускаючі фільтри. Хвильоводні вентиля захищають вихідний сигнал

помножувача частоти від впливу навантаження, фільтри подавляють найближчі гармоніки у вихідному сигналі помножувача на рівні не менше 40 дБ. При модуляції струму управління ЛПД відбувається синхронна модуляція вихідного сигналу помножувача частоти з глибиною модуляції щонайменше 70 дБ за частоти модуляції до 100 МГц. Включення ЛПД в коливальний контур на основі радіальної лінії для реалізації процесу множення частоти аналогічні включенню і налаштуванню генератора на ЛПД.

При створенні помножувачів частоти в субміліметровому діапазоні використано однопрогонові та двопрогонові структури ЛПД з параметрами, представленими в таблиці 4.

Таблиця 4.

Тип структури, профіль легування	Напруга пробою, $U_{пр}$, В	Ємність, C_i , пФ	Індуктивність, L_n , нГн	Струм живлення, I , мА
$p^+ - n - n^+$	$7,2 \pm 0,3$	$0,15 \pm 0,05$	$< 0,02$	130
$p^+ - p - n - n^+$	$8,0 \pm 0,3$	$0,17 \pm 0,05$	-	140

Збірка діодів виконувалася на мідному штифті з використанням кварцових втулок. Для виключення тиску на мезоструктуру при монтажі розроблено інтегральний вивід верхнього контакту, що виключає індуктивність.

Збільшення рівня потужності НВЧ у вихідних гармоніках помножувача частоти в субміліметровому діапазоні хвиль можливе у схемі конструкції, представленої на рис. 15.

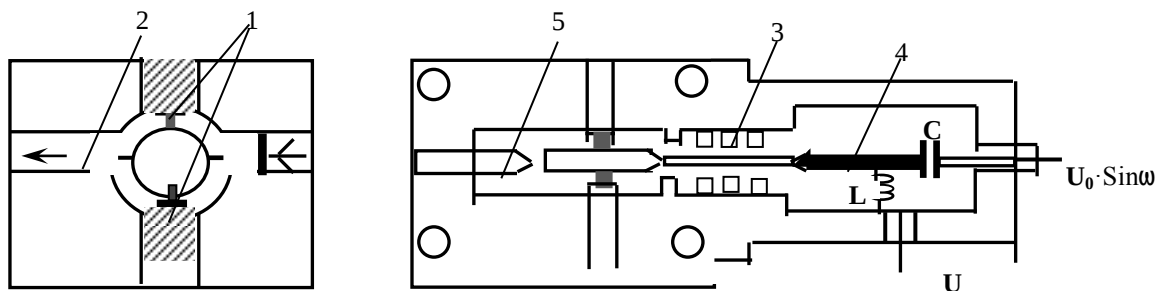


Рис. 15. Схема конструкції помножувача частоти високої кратності з антипаралельним включенням ЛПД.

- 1 – діоди ЛПД;
- 2 – хвильоводний канал перерізом $0,75 \times 1,05 \text{ мм}^2$;
- 3 – фільтр НЧ у коаксіальній лінії;
- 4 – полоскова лінія
- 5 – полоскова лінія.

В конструкції помножувача використана ідея підсумовування потужності при антипаралельному включенні джерел на лінії передачі радіальної або кільцевої форми. Така схема забезпечує мінімальний вміст гармонік, що полегшує налаштування пристрою.

На рисунку 16 наведено фотографію перетворювача частоти на ЛПД високої кратності.

На вході помножувача маємо сигнал зі смугою частот 6,9-7,1 ГГц, який підсилюється в підсилювачі 1, далі надходить в камеру 2, в якій знаходиться ЛПД, смуго-пропускаючого фільтру 3 та вихідного хвильоводу 4 з перерізом вихідного хвильоводного каналу $1,6 \times 0,8 \text{ мм}$. На виході помножувача маємо сигнал з центральною частотою, що лежить в смузі частот 138-142 ГГц потужністю 40 мВт [26].

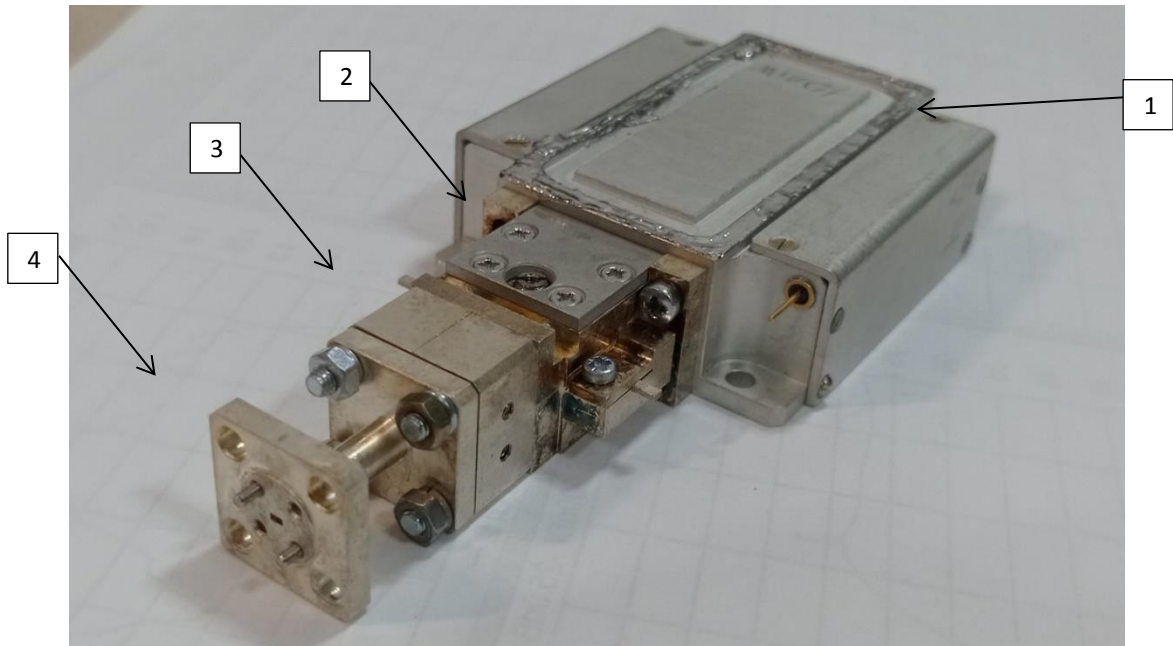


Рис 16. Фотографія перетворювача частоти на ЛПД високої кратності
в діапазоні 138-142 ГГц.

Кратність помноження такого перетворювача частоти сягає 20.

Висновки

Результати представленого в роботі аналітичного огляду сучасного рівня напівпровідникових потужних джерел міліметрового діапазону довжин хвиль свідчать про те, що можливості та тенденції їх розвитку ґрунтуються на ідеї складання потужностей НВЧ-випромінювання в короткохвильовій частині спектра і збільшення ефективності лавинно-пролітних діодів за рахунок використання нових напівпровідникових структур, застосування новітніх діелектричних матеріалів та широкозонних напівпровідників.

Вирішення задач мініатюризації напівпровідникових потужних джерел міліметрового діапазону довжин хвиль досягається на основі монолітних інтегральних схем - досягнуті рівні вихідної потужності таких пристроїв перевищують рівень 100 Вт у діапазоні ~ 30 ГГц та 30 Вт у діапазоні 60 ГГц.

Застосування радіальної лінії з розподіленими параметрами для коливальних систем дозволяє створювати потужні джерела міліметрового діапазону довжин хвиль різного типу: генератори, підсилювачі, помножувачі когерентного випромінювання високої кратності у всьому діапазоні міліметрових хвиль з використанням активних діодних структур.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на більш активне освоєння терагерцового діапазону частот та підвищення рівня вихідної потужності твердотільних генераторів.

Література

1. В.Е. Чайка, Л.В. Касаткин. Полупроводниковые устройства миллиметрового диапазона волн. Выбор. Севастополь. 2006. с. 319.
2. Л.В. Касаткин, В.П. Рукин. Частотно-стабилизированные полупроводниковые источники электромагнитных колебаний миллиметрового диапазона волн. Транзисторные источники. Изв.Вузов. Радиоэлектроника. 2004. Т. 47. № 7 с. 3-8.
3. G.I. Haddad, R.J.Trew, Microwave. Solid-State active devices IEEE. Trance, on MTT-S, 2002. Vol 50. №3, pp 760 – 779.
4. Ю. Пожела. Физика быстродействующих транзисторов. Вильнюс. Мокслое. 1989. 264 с.

5. Pin-Fan Chen, P.M. Asbeck et.al. Application of GaInP/GaAs DHBT's to a power amplifiers for wireless communications. IEEE Trans on MTT-S. 1999. vol 47. № 8 pp.1433-1438.
6. Бичок А. В., Зоренко О. В., Гайдай Ю. О. Дослідження імпедансних характеристик ЛПД у режимі лавинного пробію для використання його у твердотільному джерелі шуму субміліметрового діапазону // ВПЦ "Київський університет", Вісник КНУ ім. Т. Шевченка «Радіофізика та електроніка». - 2015. - Вип. 1(23), с. 10-13.
7. К. Верхулевский. GaN – транзисторы для высоконадежных СВЧ разработок. СВЧ электроника. 2017. №1. с 8-13.
8. L. Bermudes, P. Guillion, J. Obregon, A. Bert. A94GHz low noise GaAs FET oscillator using whispering - gallery dielectric resonator modes and a new push- push configuration reducing 1/f converted noise. IEEE VNN-S. Intern, Microwave Symp. Digest. 1988 pp 481-484.
9. Л.В. Касаткин, В.П. Рукин. Частотно- стабилизированные полупроводниковые источники электромагнитных колебаний миллиметрового диапазона волн. Диодные источники. Изв. Вузов. Радиоэлектроника. 2004 т. 47. №5 с 3-18.
10. Н.Ф. Карушкин. Умножители частоты миллиметрового диапазона на основе полупроводниковых диодных структур. Техника и конструирование в электронной аппаратуре. 2018. №13, с. 22-37.
11. P. Rolland, J. Waterkowski, E. Constant, G.Salmer. Newmodel of operation for avalanche diodes. IEEE Transactions on MTT-S, 1976, voll 24. №11 pp 768-775.
12. S. Kudsus, T. Bereeli, W. Hagole . A. 94 ГГц HEMN-oscillator using high order sub harmonics synchronization IEEE, MTT-S Intern Microwave Symp. Digest. 2000. p 39 – 42.
13. J. Komiak, W. Kong et al. A monolithic 4W High efficiency Ka-band power amplifier. IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp. Digest. 1999 vol. 3 pp.947-950.
14. T. Hirase, K. Makigama, K.Ono et.al A flip-chip MMiC design with coplanar waveguide transmission line in the W-band. IEEE Transactions on MTT-S. 1988. Vol 46. №12. pp 2276-2282.
15. T. Shimura, Y. Kawasaki, K. Makigama. Et.al. 76 GHz flip-chip MMiC for automotive radars. Radio frequency integrated circuits Symposium. 1988 pp 25-28.
16. K. Nishikawa, K. Inoul et.al. Millimeter wave three dimensional. Master slice MMiC'S . Microwave Symposium. Digest 1998. pp 25-28.
17. М.З. Згуровский, М.Е. Ильченко, С.А. Кравчук, Т.Н. Нарытник, Ю.И. Якименко. Микроволновые устройства телекоммуникационных систем. Из-во Политехника. Киев. 2003. с 454.
18. А.В. Можайский, О.В. Сайкин, А.А. Артеменко, И.Б. Вендик. Широкополосный волноводно - микрополосковый переход зондового типа миллиметрового диапазона длин волн. Изв. Вузов. Россия. Радиоэлектроника. 2019. т 22. №5. с 17-32.
19. С.В. Гомкрелидзе, П.П. Мальцев, Ю.В. Федоров. Монолитные интегральные схемы миллиметрового диапазона на основе нитридных гетероструктур с интегральными антенными элементами. Изв. Вузов. Электроника. 2017 т 22 №6 с 582-588.
20. D.I. Ingram, Y.C. Chen, L. Stones et.al. Compact W-band Solid-state MMiC high power Sources. IEEE MTT-S. Int. Microwave Symposium. Digest 2000. pp 955-958.
21. M.P. Doliso, R.A. York. Quasi-optical and spatial power combining. IEEE. Trans on MTT-S. 2002. vol 50. № 3, pp 929-936.
22. А.А. Коколов, М.В. Черкашин . Построение и характеристики СВЧ монолитных усилителей мощности на основе полупроводниковых материалов GaAs и GaN. Доклады ТУСУЗа №1(24), часть 2. 2011. с 17-23.
23. А.А. Кисунский. Твердотельные СВЧ усилители мощности на GaN состояние и перспективы развития. 19-я Международной конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии». Материалы конференции. Севастополь. Вебор.2009. т 1. с. 11-16.
24. В.Г. Алыбин, А.С. Семочкин . Твердотельные СВЧ усилители для космических аппаратов. 26-я Международной конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии». Материалы конференции. 2016. Севастополь. т 1. с. 18-31.
25. Електроніка НВЧ техніки і технології. Каталог продукції НДІ «Оріон» // ПП «Політехперіодика», Київ, 2010.
26. Сайко В. Г., Романов Д. О., Нарытник Т. М., Комаров В. О., Фомін М. М. Аналіз перспектив використання терагерцевого діапазону частот для безпроводових мереж зв'язку спеціального призначення // Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки. – 2024. – Вип. 5. – С. 138–153. – doi: 10.58254/viti.5.2024.13.138.