

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra30.02.120>
УДК 621.382.062.8

М.Ф. Карушкін, В.П. Рукин

НДІ «Оріон»

вул. Ежена Потье, 8а, м. Київ, 03057, Україна

E-mail: orion@ri-orion.kiev.ua

НЕСИМЕТРИЧНІ ЩІЛИННІ ЛІНІЇ ДЛЯ СТВОРЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ КОМПОНЕНТІВ ДІАПАЗОНУ МІЛІМЕТРОВИХ ХВИЛЬ

Предмет і мета роботи. Створення напівпровідникових компонентів гібридно-інтегрального типу у діапазоні міліметрових хвиль дозволяє спростити технологію їх виготовлення та знизити трудомісткість. При цьому з'являється потенційна можливість реалізувати покращені електричні параметри компонентів, порівняно з їх хвильовими аналогами.

Методи та методологія. У роботі розглядається створення активних напівпровідникових компонентів у діапазоні міліметрових хвиль у гібридно-інтегральному виконанні із застосуванням транзисторів, лавинно-пролітних та р-і-п-діодів. В якості лінії передачі використовується несиметрична щілинна лінія (НЩЛ), яка встановлюється в Е-площині регулярного хвильоводу.

Результати. Базовим матеріалом для НЩЛ слугував діелектричний матеріал RT/duroid 5880 з малими втратами та величиною діелектричної проникності $\epsilon = 2.2$. Монтаж напівпровідникових елементів проводився на короткій ділянці несиметричної смужкової лінії, яка була утворена за рахунок перекриття металевими шарами несиметричної лінії. Наявність ділянки несиметричної смужкової лінії з низьким хвильовим опором та її розташування на тепловідводі дозволяє створювати ефективні активні напівпровідникові НВЧ-компоненти безперервної та імпульсної дії, а також швидкодіючі перемикальні пристрої з широкою робочою смугою частот. Відведення великих потоків тепла, що виділяється під час експлуатації активних елементів, є однією з основних проблем при розробленні та створенні напівпровідникових компонентів у діапазоні міліметрових хвиль. У роботі наводяться приклади ефективного підвищення рівня НВЧ-потужності за рахунок застосування зниження температури експлуатації компонентів, а також використання активних елементів (ІМРАТТ-діодів) з розвинутою геометрією, що дозволило збільшити вихідну потужність НВЧ-пристроїв на 40...50 % без підвищення температури р-п-переходу активного елемента. Це дозволяє створювати підсилювачі НВЧ-потужності на напівпровідникових структурах з розподіленими параметрами, виконаних у вигляді вузьких смужок, які можна порівняти з довжиною хвилі.

Висновки. У роботі описуються результати розробок, виконаних власне авторами, та наводиться інформація про роботи, які відображають стан та досягнення в галузі створення компонентів діапазону міліметрових хвиль у гібридно-інтегральному виконанні.

Ключові слова: ІМРАТТ-діод, несиметрична щілинна лінія, несиметрична смужова лінія, міліметровий діапазон, р-і-п-діод, тепловий опір, тепловідвід, хвильовідна щілинна лінія.

Вступ

Застосування щілинних ліній дозволяє поєднувати підходи, покладені в основу створен-

ня планарних та об'ємних електродинамічних конструкцій НВЧ-пристроїв, а також сприяє їх спрощенню та здешевленню [1]. Електричні параметри компонентів електронної техніки НВЧ

Цитування: Карушкін М.Ф., Рукин В.П. Несиметричні щілинні лінії для створення напівпровідникових компонентів діапазону міліметрових хвиль. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2025. Т. 30. № 2. С. 120—128. <https://doi.org/10.15407/rpra30.02.120>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2025



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>)

міліметрового діапазону, виконаних із застосуванням хвильовідних щілинних ліній (ХЩЛ), такі як рівень втрат, ширина робочої смуги частот, можуть бути поліпшені порівняно з аналогічними пристроями, виконаними на базі стандартних хвильоводів.

Особливий інтерес для гібридно-інтегральних схем міліметрового діапазону становлять екрановані щілинні лінії, які називаються хвильовідно-щілинними (рис. 1). Маючи такі переваги, як широкосмуговість, нечутливість до допусків та малі втрати, ХЩЛ забезпечують режим розповсюдження квазіосновних типів хвиль порожнистого прямокутного хвильоводу, що дозволяє ефективно використовувати досить прості плавні переходи «хвильовід — ХЩЛ» [2].

Типова ХЩЛ містить діелектричну підкладку, розташовану в E -площині хвильоводу [1]. На поверхню підкладки наноситься металева плівка. Металізація також може виконуватися з обох боків підкладки. На ділянці поздовжньої щілини, розташованій в металізованому шарі, при хвилі нижчого типу квазі- H існує максимальне електричне поле. Як діелектрик для підкладок використовують матеріал з малим значенням діелектричної проникності (не більше 2.5...4.0). Найбільшого поширення набула лінія з односторонньою металізацією та з однією вузькою щілиною, розташованою в середній площині хвильоводу, яка отримала назву симетричної щілинної лінії (СЩЛ, рис. 1, а, б). Між кромками такої щілини включаються напівпровідникові елементи. Кожен із типів ХЩЛ має певні переваги і недоліки, тому для створення оптимальної конструкції електронного компонента необхідно обирати відповідний тип лінії передачі. Різноманітність типів ліній передачі показує, що жоден з них не

дозволяє повністю вирішити завдання створення компонентів і функціональних вузлів гібридно-інтегральних схем НВЧ. Найбільш конкурентоспроможними та перспективними є пристрої, в яких одночасно використовуються декілька типів ліній передачі [4].

Дедалі ширшого застосування набувають несиметричні щілинні лінії (НЩЛ) (рис. 1, в), які дозволяють отримувати практично будь-який хвильовий опір, проектувати мікросхеми з двосторонньої топологією і навіть здійснювати перехід на лінії передачі інших типів [3]. Смуга одноквильового режиму НЩЛ еквівалентна аналогічній смугі прямокутного хвильоводу.

Метою цієї статті є розгляд шляхів створення пристроїв мікрохвильової техніки діапазону міліметрових довжин хвиль на базі хвильовідної НЩЛ з переходом на несиметричну смужкову лінію (НСЛ) для розміщення на ній активних напівпровідникових структур.

1. Проблеми тепловідведення при створенні активних напівпровідникових елементів

Під час створення активних напівпровідникових елементів проблема відведення тепла є ключовою, оскільки температурний режим безпосередньо впливає на надійність, граничні електричні режими і низку інших характеристик. Для одержання потрібної потужності НВЧ-сигналу до напівпровідникових НВЧ-приладів підводиться дуже значна потужність [5]. Наприклад, в ІМРАТТ-діодах міліметрового діапазону густина теплового потоку досягає 4 кВт/мм^2 [6]. Відведення великих потоків тепла, що виділяється, є однією з основних проблем при створенні джерел потужності в міліметровому діапазоні. Для

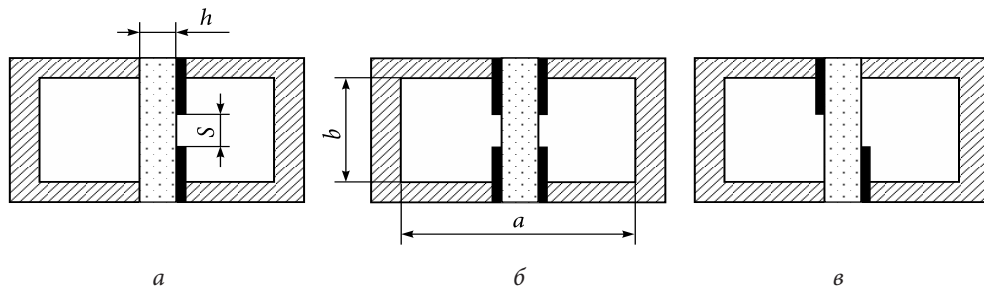


Рис. 1. Поперечні перерізи ХЩЛ різних типів: одностороння СЩЛ (а); двостороння СЩЛ (б); НЩЛ (в). Параметр S — ступінь перекриття; h — товщина діелектрика; a — розмір широкі стінки хвильоводу; b — розмір вузької стінки хвильоводу

опису зв'язку між потужністю P_0 , що підводиться, і робочою температурою p - n -переходу напівпровідникової структури T_{p-n} застосовують поняття теплового опору R_T , який прямо пропорційний до середнього перепаду температури $\Delta T_{\text{серед}}$, що виникає на тепловідводі й обернено пропорційний до підведеної потужності:

$$P_0 = \Delta T_{\text{серед}} / R_T = (T_{p-n} - T_0) / R_T, \quad (1)$$

де T_0 — температура навколишнього середовища.

З виразу (1) випливає, що підвищення потужності може бути досягнуто шляхом збільшення допустимого значення T_{p-n} , зниженням температури навколишнього середовища T_0 , а також зменшенням теплового опору R_T . Найбільший вплив на тепловий опір діода здійснюють конструкція і геометрія напівпровідникової структури, теплопровідність вихідного матеріалу, що використовується, спосіб і якість з'єднання структури з тепловідводом [6]. Загальний тепловий опір $R_{T\Sigma}$ можна розглядати як суму теплового опору розтікання R_{TS} і поздовжнього теплового опору $R_{\text{позд}}$ [7]:

$$R_{T\Sigma} = R_{TS} + R_{\text{позд}}. \quad (2)$$

Тут

$$R_{TS} = 1/2 d_{p-n} K; \quad (3)$$

$$R_{\text{позд}} = \sum_i (l_i / K_i) / (\pi d_i^2 / 4); \quad (4)$$

K — коефіцієнт теплопровідності матеріалу тепловідведення; l_i — товщина i -шару; d_i — діаметр i -шару; d_i — діаметр p - n -переходу; K_i — коефіцієнт теплопровідності i -шару структури лавинно-пролітного діода (ЛПД), відповідно.

Відповідно до виразу (3), зменшення теплового опору розтікання може бути досягнуто зі збільшенням коефіцієнта теплопровідності матеріалу тепловідводу і збільшенням діаметра мезаструктури. Застосування кільцевої геометрії забезпечує поліпшення розсіювання тепла порівняно з суцільною дисковою структурою ІМРАТТ-діода. Дослідження показали, що тепловий опір кільцевої структури за однакової площі переходу становить 60...70 % від теплового опору дискової структури, і навіть якщо ККД не збільшується, то потужність живлення та вихідну потужність можна збільшити на 40...50 % без ризику підви-

щення температури переходу [6]. Шляхом оптимізації геометричних розмірів кільцевої структури та форми контактних елементів монтажу можна досягти зниження НВЧ-втрат і значно збільшити рівень вихідної НВЧ-потужності [8]. Діаметр кільцевої структури має дорівнювати глибині скін-шару в області взаємодії НВЧ-поля та носіїв заряду у напівпровіднику. Зовнішній радіус кільця R розраховують за такою формулою:

$$R \leq Z_{\text{оп}} / (2\pi \Delta_c Z_c), \quad (5)$$

де $Z_{\text{оп}}$ — опір структури одиничної площі; Δ_c — ширина кільця структури; Z_c — опір зовнішньої лінії передачі, підведеної до діода.

Уся область, яка заповнена носіями заряду, починає ефективно взаємодіяти з НВЧ-полем і не зазнає шунтувального впливу внутрішньої області. Водночас площа робочої поверхні кільця може бути значно збільшена порівняно з відомими структурами діодів, оскільки радіус структури, розрахований за формулою (5), у два-три рази більший, ніж у структурі, де радіус і товщина обиралися з теплових міркувань [8, 9].

Збільшення вхідної потужності P_0 можна досягти зниженням T_0 (див. (1)). У роботі [10] наведені результати досліджень охолоджуваних генераторів терагерцового діапазону в інтервалі температур 300...77 К з використанням двопробітних кремнієвих структур ІМРАТТ-діодів p^+ - p - n - n^+ -типу. Охолодження генераторів дозволило збільшити ККД від 0.5 до 3.5 % і вдвічі посилити струм генерації. Максимальна потужність на частоті 170 ГГц становила 280 мВт (за ККД = 3.5 %), що на порядок перевищує рівні, досяжні за кімнатної температури.

Наведені приклади свідчать про необхідність відведення тепла від напівпровідникової структури. Безпосереднє використання ХЩЛ для створення потужних джерел НВЧ-потужності не є можливим через відсутність необхідного відведення тепла.

Найбільш повно всім вимогам щодо створення джерел НВЧ-потужності в міліметровому діапазоні в гібридно-інтегральному виконанні відповідає використання НЩЛ, установленної в площині E та її переходу на НСЛ. Несиметрична щільна лінія утворюється металізованими напівплощинами, розміщеними в різних шарах

плоскопаралельних діелектричних підкладок. Залежно від взаємного розташування напівплощин, можливі різні модифікації НЩЛ: з перекриттям, без перекриття, а також з нульовим перекриттям, коли краї напівплощин перебувають один проти одного. У роботі [1] розглянуто особливості НЩЛ та модифікації лінії залежно від параметра S , який відображує зміну відстані від екрана до металевого ребра та взаємне розташування країв металізації. Параметр S (рис. 2) має від'ємне значення у разі рознесених шарів металу і додатне — для НЩЛ з перекриттям цих шарів. Збільшення ступеня перекриття ($S > 0$) призводить до того, що хвиля в НЩЛ все більше набуває властивостей хвилі H_{10} , яка поширюється у хвилеводі з прямокутним перерізом (рис. 2).

Слід зазначити, що у НЩЛ відсутня конструктивно-технологічна складність, пов'язана з реалізацією вузьких провідників і щілин. Це дозволяє виконувати НЩЛ із практично будь-якою величиною хвильових опорів. На рис. 3 наведено залежність хвильового опору НЩЛ сантиметрового діапазону на підкладці з полікору ($\epsilon = 9.8$) від товщини підкладки d та величини перекриття верхнього та нижнього шарів металізації S . За умови $S > 0$ хвильовий опір НЩЛ практично збігається з опором НСЛ. Повний якісний збіг спостерігається за умови $S \geq \lambda/2$.

На рис. 4 представлено хвилевідну конструкцію, яка містить плавні переходи НЩЛ до НСЛ,

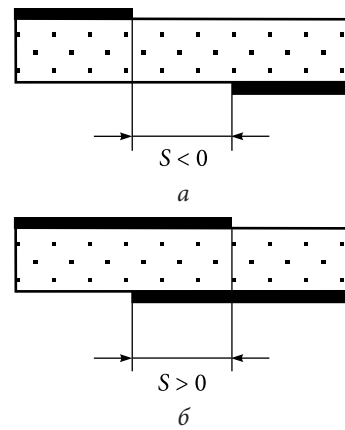


Рис. 2. Несиметричні щілинні лінії без перекриття (а) та з перекриттям (б) шарів металу

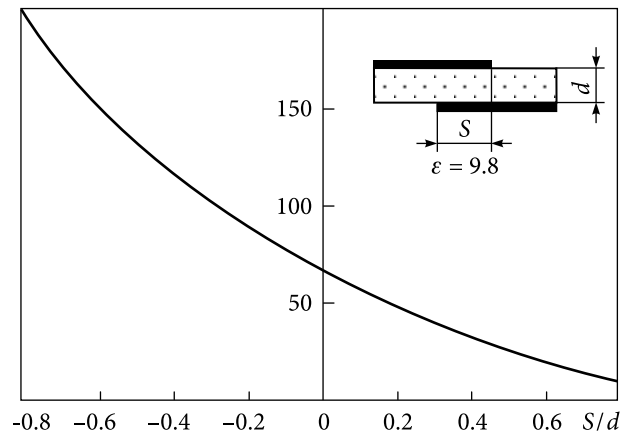


Рис. 3. Залежність хвильового опору від геометричних розмірів НЩЛ

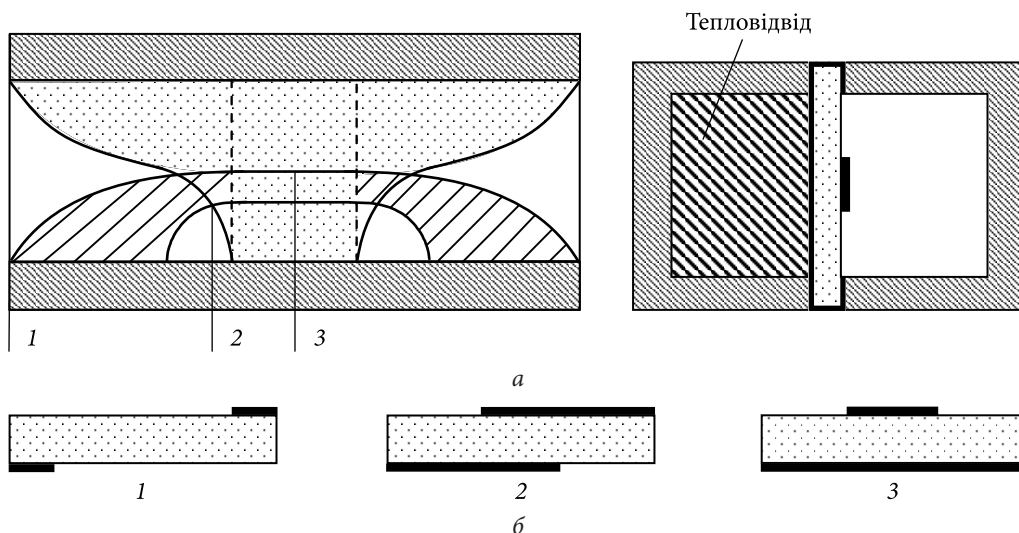


Рис. 4. Конструкція переходу НЩЛ до НСЛ у хвилевідному каналі: переріз хвилевідного підсилювача у двох проекціях (а); переходи НЩЛ симетричного типу (1, 2, 3) (б)

розташовану на тепловідводі. Тепловідвід являє собою виступ у хвилевідному каналі, який частково заповнює хвилевід з боку вузької стінки на відстані $\alpha/2$. На цьому виступі розташовується НСЛ, утворена за рахунок перекриття металізованими напівплощинами, розміщеними з обох боків паралельної діелектричної підкладки. При цьому поздовжній розмір тепловідводу має не перевищувати межі переходу лінії передачі енергії НЩЛ у НСЛ. У разі створення підсилювача прохідного типу конструкція містить два симетричні переходи (рис. 4), а для створення підсилювача відбивного типу конструкція може містити один перехід.

2. Шляхи та перспективи створення активних НВЧ-компонентів у гібридно-інтегральному виконанні

Наявність ділянки НСЛ, узгодженої з опором хвилевідного каналу, та її розташування на тепловідводі дозволяє створити активні напівпровідникові пристрої міліметрового діапазону у гібридно-інтегральному виконанні. Поєднання потужних монолітних інтегральних схем (МІС) у діапазоні міліметрових хвиль та оригінальної схеми підсумовування НВЧ-потужності з використанням мікрохвильової лінії, утвореної за рахунок перекриття металізованими шарами несиметричної щільної лінії, дозволило досягти рівня параметрів, доступних лише підсилювачам на основі ламп рухомої хвилі (ЛРХ) [11]. У цій роботі розглянуто конструкцію підсилювача з вихідною потужністю 120 Вт у діапазоні частот 27...31 ГГц, який складається з окремих підсилювачів з вихідною потужністю 10 Вт, виконаних за технологією GaN НЕМТ та коаксіально-хвилевідною схемою підсумовування сигналів. Така конструкція забезпечила реалізацію ККД підсумовування 25 %. Кожен елемент структури під-

силювача було протестовано із встановленням замість МІС підсилювачів пасивних кіл 50 Ом. У результаті отримані втрати менше 1 дБ на плату, що свідчить про узгодження всієї структури, а також показує, яку НВЧ-потужність можна підвести до навантаження і яку МІС підсилювача необхідно обрати для тих чи інших цілей. Розроблений підсилювач потужності на GaN МІС забезпечує роботу в діапазоні частот 10...40 ГГц. Практичну цінність визначає його можливе використання для супутникової комунікації в діапазоні частот 27...31 ГГц. Застосування нових діелектричних матеріалів з малим значенням $\text{tg } \delta$ і діелектричною проникністю $\epsilon = 2...4$ дозволяє реалізувати мікросмужкові лінії з характеристиками, представленими в таблиці [12].

Сьогодні у світі активно ведуться роботи зі створення МІС на основі нітридних гетероструктур у міліметровому діапазоні. Прилади виконані на структурах «нітрид галію (GaN) на кремнії (Si)» значно дешевші і більш технологічні у виробництві за прилади, в котрих як підкладка використовується карбід кремнію (SiC) [13].

У будь-якому випадку реалізація оптимальних параметрів активного компонента відбувається за рахунок оптимізації напівпровідникової структури, вибору лінії передачі та пошуку шляхів найкращого поєднання напівпровідникового елемента з електродинамічною системою.

Оптимізація відомих параметрів підсилювачів на ІМРАТТ-діодах із зосередженими параметрами зазвичай досягається каскадуванням. Такий спосіб супроводжується значним ускладненням конструкції, збільшенням ваги, габаритів та вартості приладу; до того ж на смугу посилення істотно впливають реактивні параметри каскадів. Більшості із зазначених труднощів можна уникнути шляхом використання підсилювачів на напівпровідникових елементах з розподіленими параметрами, наприклад, на

Характеристики мікросмужкових ліній, реалізованих на матеріалах виробництва компанії Rogers

Матеріал	Товщина підкладки, мм	Ширина струмовмісної лінії, мм	Діелектрична проникність, ϵ	$\text{tg } \delta$ на частоті 60 ГГц
RO4350 B	0.101	0.20	3.06	0.0115
RO300 B	0.127	0.30	3.00	0.0034
RT/duroid 5880	0.127	0.36	2.20	0.0024

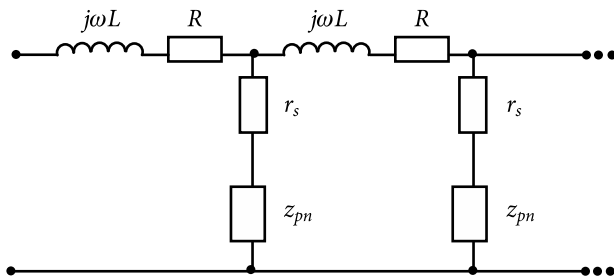


Рис. 5. Еквівалентна схема ІМРАТТ-діода із розподіленими параметрами

ЛПД. Наявність сильної залежності динамічної провідності розподіленого ІМРАТТ-діода робить можливим ефективне керування коефіцієнтом посилення та фазовою швидкістю хвилі в діоді [14]. Важливою позитивною якістю такого підсилювача в міліметровому діапазоні є зручність з'єднання з мікросмужковою лінією, утвореною за рахунок перекриття шарів металізації НЩЛ, встановленої в E -площині хвильоводу. У роботі [14] в лінійному наближенні розраховані основні характеристики підсилювача рухомої хвилі на розподіленому ІМРАТТ-діоді. Підсилювач є напівпровідниковою структурою $p^+-p-n-n^+$ -типу, виконаною у вигляді вузької смуги. На рис. 5 представлено еквівалентну схему ІМРАТТ-діода із розподіленими параметрами.

Поширення електромагнітної хвилі вздовж розподіленого ІМРАТТ-діода у лінійному наближенні описується дисперсійним рівнянням

$$K^2 = \frac{j\omega L + R}{Z_{pn} + r_s}, \quad (6)$$

де

$$Z_{pn} = -r + \frac{1}{j\omega C}, \quad (7)$$

$j\omega L$ і R — погонна індуктивність та опір довгої лінії; r_s — опір втрат; $-r$ — негативний опір; $1/j\omega C$ — ємнісний опір ІМРАТТ-діода, відповідно.

Найбільш важливими характеристиками підсилювача на розподіленому ІМРАТТ-діоді є поширення хвилі і коефіцієнта посилення хвилі, а також їх залежності від частоти, струму зміщення I_0 , питомого опору напівпровідникових шарів, а також геометричних розмірів. На рис. 6 наведено розрахункові частотні залежності коефіцієнтів підсилення K'' і поширення K' для двох

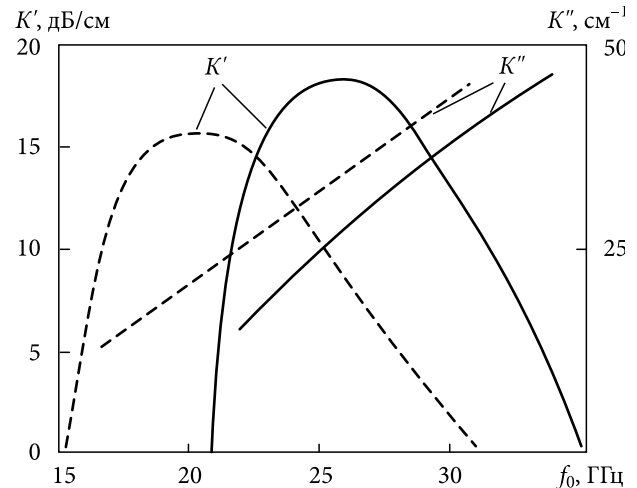


Рис. 6. Графіки залежності коефіцієнтів поширення K' і підсилення K'' від частоти для густини зворотного струму $j_0 = 1000 \text{ А/см}^2$ (штрихові криві) та $j_0 = 2000 \text{ А/см}^2$ (суцільні криві)

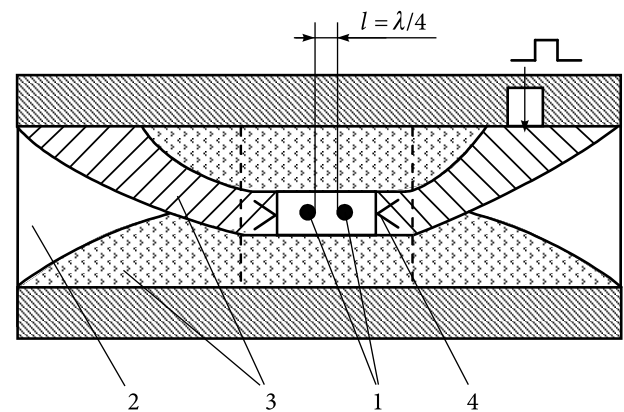


Рис. 7. Конструкція вимикача: 1 — $p-i-n$ -діоди, 2 — хвильовід, 3 — НЩЛ, 4 — НСЛ

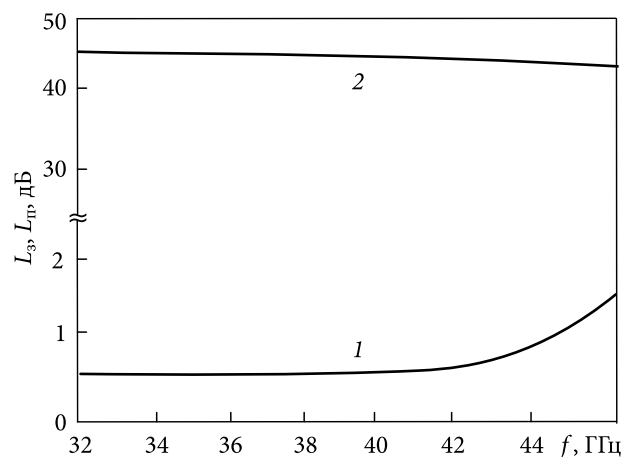


Рис. 8. Частотні характеристики втрат пропускання L_{π} (крива 1) та втрат замикання L_3 (крива 2) вимикача

значень струму керування I_0 при пробивній напрузі $U_m = 55$ В і опорі контактів $8 \cdot 10^{-5}$ Ом/см.

У роботі [15] повідомляється про суматор-синхронізатор НВЧ-потужності на частоті 94 ГГц, виконаний на НСЛ, утворений за рахунок перекриття шарів металізації, нанесених на протилежні сторони діелектричної підкладки — НЩЛ. Несиметрична щілинна лінія встановлена в E -площині металевго хвиеводу і містить у собі перехідні розподілені ділянки узгодження хвильових опорів хвиеводу з іншими НЩЛ та НСЛ. Підвищення стійкості роботи підсилювача досягається за рахунок того, що діодні ІМРАТТ-структури змонтовані на спільному тепловідводі, що дозволяє знизити тепловий опір R_T . З використанням ІМРАТТ-діодів зосередженого типу досягнуто вихідну потужність НВЧ більше 1 Вт у безперервному режимі.

Перехід від НЩЛ до НСЛ може успішно використовуватися для створення комутуючих напівпровідникових пристроїв з розподіленими та зосередженими параметрами, а також для розроблення швидкодіючих елементів для захисту пристроїв електронної техніки від впливу несинхронних завад. Для конструювання таких напівпровідникових пристроїв гібридно-інтегрального типу можна застосувати відомі методи, розвинені в сантиметровому діапазоні [16].

Аналіз простої моделі включення двох діодів (рис. 7) до лінії передачі на електричній довжині $l = \lambda/4$ вказує на значне збільшення замикаючої дії вимикача при незначному збільшенні втрат у режимі пропускання. При розробленні вимикачів на $p-i-n$ -діодах з малими паразитними параметрами в якості лінії передачі була використана НСЛ, утворена за рахунок перекриття шарів металізації, нанесеної на протилежні сторони плоскопаралельної діелектричної підкладки — НЩЛ [17]. У даному випадку НЩЛ розташовується у хвиеводі у E -площині і включає перехідні розподілені ділянки узгодження хвильових опорів (рис. 7) [17]. Матеріалом для такої лінії був обраний RT/duroid®5880 з товщиною діелектричного шару 0.254 мм, малими погонними втратами та діелектричною проникністю $\epsilon = 2.2$. Особливістю вимикача є наявність у мі-

кросмужковій лінії вставки, яка складається з двох $p-i-n$ -діодів, розташованих послідовно на відстані $l = \lambda/4$ один від одного на спільній металевій основі. Електрофізичні параметри середовища вставки обрані близькими до параметрів лінії передачі.

Конструкція вимикача наведена на рис. 7, а типові частотні характеристики втрат пропускання і замикання — на рис. 8. Втрати замикання вимикача такого типу становлять близько 50 дБ у разі прямого електричного зміщення на діодах у робочій смузі не менше 30 % при дії безперервної НВЧ-потужності не менше 1 Вт. Стійкість роботи вимикача підвищилася за рахунок розташування вставки з діодами на тепловідводі, що дозволило знизити тепловий опір.

Наведені частотні характеристики забезпечуються, якщо ємність діодів дещо перевищує 0.018 пФ і хвильовий опір лінії передачі дорівнює 30...50 Ом. Напруга зворотного зміщення становить –10 В, струм прямого зміщення — приблизно 10 мА, час перемикаання НВЧ-навантаження — трохи більше 10 нс.

Висновки

Застосування хвильовідної НЩЛ із переходом на НСЛ дозволяє створювати активні електронні компоненти в міліметровому діапазоні та вирішувати проблему відведення теплової потужності від напівпровідникової структури з подальшим видаленням теплообмінним пристроєм.

Розробникам електронних компонентів у короткохвильовій області НВЧ-діапазону у ряді випадків слід звернути увагу на застосування напівпровідникових структур із розподіленими параметрами.

Техніка НВЧ розвивається у напрямі збільшення частоти. Спостерігається тенденція до створення високоінтегрованих комбінованих систем, в яких цифрові та НВЧ-елементи розміщуються на одному кристалі. Таке рішення дозволяє максимально наблизити процесорну частину до приймача НВЧ-сигналу, що забезпечує зменшення габаритів приладу та його стійкість до впливу зовнішніх факторів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Dib N.I., Harokopus W.P., Katehi P.B., Ling C.C., Rebeiz G.M. Study of novel planar transmission line. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*. Boston, MA, USA, 10–14 July 1991, pp. 623–626. DOI: 10.1109/MWSYM.1991.147080
2. Кравчук С.О. Наритник Т.М. *Телекомунікаційні системи терагерцевого діапазону*. Монографія. Житомир: ФОП «Євенок О.О.» 2015. 208 с.
3. Kasatkin L.V., and Karushkin N.F. Stabilization of RF Injection-locked Pulsed IMPATT Oscillators. *Microwave Journal (MWJ)*. 2000. September. P. 172–180.
4. Згуровський М.З., Ільченко М.Є., Кравчук С.А., Наритник Т.М., Якименко Ю.М. *Мікрохвильові пристрої телекомунікаційних систем*. Т. 1. Київ: Політехніка, 2003. 454 с.
5. Fitsimmons Q.W. Heat Sinking C.W. TRAPATT — oscillations. *Microwaves*. 1972. No 8. С. 50–59.
6. Касаткін Л.В., Чайка В.Є. *Напівпровідникові пристрої діапазону міліметрових хвиль*. Вебер. Україна. 2006. 319 с.
7. Карушкін М.Ф. Джерела потужності міліметрового діапазону на лавинно-пролітних діодах з розподіленими параметрами. *Вісті вузів. Радіoeлектроніка*. 1999. Т. 42, № 7. С. 47–54.
8. *Напівпровідниковий НВЧ-діод*: пат. 15048, Україна: МРК H01L47/00 H01L29/868/ В.М. Буторін, М.Ф. Карушкін. № 94042624; заявл. 28.04.94; опубл. 30.06.1997.
9. Касаткін Л.В., Рукин В.П. Потужні імпульсні напівпровідникові джерела міліметрового діапазону довжин хвиль у режимі зовнішньої синхронізації. *Вісті вузів. Радіoeлектроніка*. 2005. Т. 48, № 6. С. 3–19.
10. Бичок А.В., Волков Є.Г., Карушкін М.Ф., Рукин В.П. Джерела НВЧ-випромінювання терагерцевого діапазону на кремнієвих лавинно-пролітних діодах. *Вісті вузів. Радіoeлектроніка*. 2024. Т. 67, № 4. С. 238–252. DOI: 10.20535/S0021347024050030
11. Karushkin N., Obukhov I., Source of submillimeter radiation on silicon avalanche-drive diodes. *Infocommunication and radioelectronic technologies*. 2021. Vol. 4, Iss. 2. P. 95–106.
12. Courtney P.G., Zeng J., Tran Th., Trinh H., Behan S. 120W Ka Band Power Amplifier Utilizing GaN MMICs and Coaxial Waveguide Spatial Power Combining. *2015 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS)*. New Orleans, LA, USA, 11–14 Oct. 2015. IEEE, 2015. URL: www.qorvo.com/-/media/files/qorvopublic/white-papers/120-watt-ka-band-power-amplifier-utilizing-gan-mmics-and-coaxial-waveguide-spatial-power-combining.pdf
13. Ткаченко В.В., Май А.В., Май В.І., Удод Ю.О., Угрін М.І. Монолітні перетворювачі частоти 5- та 3-міліметрового діапазонів. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*. 2006. № 5. С. 7–8.
14. Босий В.І., Іващук О.В., Ковальчук В.Н., Семашко О.М. Потужні НВЧ-транзистори на основі широкозонних напівпровідників. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*. 2003. № 3. С. 53–58.
15. Kornaukhov A.V., Shabanov V.M., 1976. Amplification of electromagnetic waves in a distributed avalanche-span diode. *University Bull. Radioelectron*. Vol. XIX, Iss. 3. P. 29–33.
16. Авдеєнко Г.Л., Бичок А.В., Наритник Т.М., Карушкін М.Ф., Крючкова Л.П. Твердотільні потужні напівпровідникові джерела міліметрових хвиль на напівпровідникових діодних елементах. *Матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. «Інформаційно-комунікаційні технології та кібербезпека» (ІКТК-2024)*. Харків, ХНУРЕ, 2024. С. 36–49.
17. Карушкін Н.Ф., Малишко В.В., Ореховський В.А., Тухаринов А.А. Комутаційні керовані пристрої на *p-i-n*-діодах міліметрового діапазону довжин хвиль. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*. 2016. № 4–5. С. 34–41. DOI: 10.15222/TKEA2016.4-5.34

Стаття надійшла 10.12.2024

REFERENCES

1. Dib, N.I., Harokopus, W.P., Katehi, P.B., Ling, C.C., Rebeiz, G.M, 1991. Study of novel planar transmission line. In: *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*. Boston, MA, USA, 10–14 July 1991, pp. 623–626. DOI: 10.1109/MWSYM.1991.147080
2. Kravchuk, S.O., Narytnyk, T.M., 2015. *Terahertz range telecommunications systems*. Monograph. Zhitomir: IE «Eve-nok O.O.». 208 с.
3. Kasatkin, L.V., and Karushkin, N.F., 2000. Stabilization of RF Injection-locked Pulsed IMPATT Oscillators. *Microwave Journal (MWJ)*, September, pp. 172–80.
4. Zgurovsky, M.Z., Ilchenko, M.E., Kravchuk, S.A., Narytnyk, T.M., Yakymenko, Y.M., 2003. *Microwave devices of telecommunication systems*. Vol. 1. Kyiv: Publishing house Polytechnic.
5. Fitsimmons, Q.W., 1972. Heat Sinking C. W. TRAPATT – oscillations. *Microwaves*, 8, pp. 50–59.
6. Kasatkin, L.V., Chaika, V.E., 2006. Semiconductor devices of the millimeter wave range. Sevastopol: Weber Publ.
7. Karushkin, M.F., 1999. Millimeter-range power sources on avalanche-flight diodes with distributed parameters. *University Bull. Radioelectronics*, 42(7), pp. 47–54.
8. Butorin, V.M., Karushkin, N.F., 1997. Semiconductor microwave diode. Ukraine Pat. 15048 (in Ukrainian).

9. Kasatkin, L.V., Rukin, V.P., 2005. Power semiconductor pulsers with injection locking for millimeter range of wavelengths. *Radioelectron. Commun. Syst.*, **48**(6), pp. 1–11. DOI: 10.3103/S0735272705060014
10. Bychok, A., Volkov, Ye., Karushkin, N., Rukyn, V., 2024. THz-radiation sources on silicon avalanche transit time diodes. *Radioelectron. Commun. Syst.*, **67**(4), pp. 212–224. DOI: 10.20535/S0021347024050030
11. Karushkin, N., Obukhov, I., 2021. Source of submillimeter radiation on silicon avalanche-drive diodes. *Infocommunication and radioelectronic technologies*, **4**(2), pp. 95–106.
12. Courtney, P.G., Zeng, J. Tran, Th., Trinh, H., Behan, S., 2015. 120W Ka Band Power Amplifier Utilizing GaN MMICs and Coaxial Waveguide Spatial Power Combining. In: *2015 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS)*. New Orleans, LA, USA, 11–14 Oct. 2015. [pdf]. IEEE, 2015. Available from: www.qorvo.com/-/media/files/qorvopublic/white-papers/120-watt-ka-band-power-amplifier-utilizing-gan-mmics-and-coaxial-waveguide-spatial-power-combining.pdf
13. Tkachenko, V.V., Mai, A.V., Mai, V.I., Udod, Y.O., Ugrin, M.I., 2006. Monolithic frequency converters 5 and 3 bands. *Technology and design in electronic equipment*, **5**, pp. 7–8.
14. Bosy, V.I., Ivashchuk, O.V., Kovalchuk, V.N., Semashko, O.M., 2003. Power UHF transistors on the wide bandgap semiconductors. *Technology and design in electronic equipment*, **3**, pp. 53–58.
15. Kornaukhov, A.V., Shabanov, V.M., 1976. Amplification of electromagnetic waves in a distributed avalanche-span diode. *University Bull. Radioelectron.*, **XIX**(3), pp. 29–33.
16. Avdeenko, G.L., Bychok, A.V., Narytnyk, T.M., Karushkin, M.F., Kryuchkova, L.P., 2024. Solid-state powerful semiconductor sources of millimeter waves on semiconductor diode elements. In: *Materials of the International Scientific and Technical Conference «Information and Communication Technologies and Cybersecurity» (IKTK-2024)*, pp. 36–49. Kharkiv, KhNURE Publ.
17. Karushkin, N.F., Malyshko, V.V., Orekhovsky, V.A., Tukharynov, A.A., 2016. Millimeter wave $p-i-n$ -diode switching controlled devices. *Technology and design in electronic equipment*, **4–5**, pp. 34–41. DOI: 10.15222/TKEA2016.4-5.34

Received 10.12.2024

M.F. Karushkin, V.P. Rukyn

Science Research Institute "Orion"

8a, Egena Potie St., Kyiv, 03057, Ukraine

ASYMMETRIC SLOT LINES FOR CREATING MILLIMETER-WAVE SEMICONDUCTOR COMPONENTS

Subject and Purpose. Creating hybrid-integrated semiconductor components in the millimeter wave range implies simplified manufacturing technology and reduced labor intensity. At the same time, these components offer the potential for improved electrical parameters compared to the waveguide counterparts. The article aims to explore methods for creating millimeter-wave devices using a waveguide asymmetric slot line combined with an asymmetric stripline accommodating active semiconductor structures.

Methods and Methodology. The development of millimeter-wave hybrid-integrated semiconductor active components upon transistors, avalanche diodes, and $p-i-n$ diodes is considered. An asymmetric slot line (ASL) is used as a transmission line installed in the E -plane of a regular waveguide. The ASL base material is a low-loss dielectric stuff RT/duroid 5880 with dielectric constant $\varepsilon = 2.2$. The semiconductor elements are bonded to a short section of an asymmetric stripline fabricated by partial metallization of an asymmetric corner line. The insertion of a low-impedance asymmetric stripline section equipped with a heat sink allows efficient active semiconductor microwave components of continuous-wave and pulse modes. This design also supports high-speed switching devices of a wide frequency band of operation.

Results. Directing away large heat fluxes generated during the operation of the active elements is a growing challenge in developing and making millimeter-wave semiconductor components. The paper provides examples of the efficient microwave power level increase by reducing the operating temperature of the components. Extended-geometry active components (IMPATT diodes) also serve the purpose. These methods enabled us to increase the output power of the microwave devices by 40 to 50%, the temperature of the $p-n$ junction of the active element therewith was not increasing. This allows microwave power amplifiers to be built around semiconductor distributed-parameter structures like narrow, wavelength-comparable strips.

Conclusion. The authors' developments have been presented against the background of contemporary information on the current state and progress in the creation of millimeter-wave components of hybrid-integrated design.

Keywords: asymmetric slot line, asymmetric stripline, IMPATT diode, heat sink, $p-i-n$ diode, thermal resistance, millimeter range, waveguide slot line.