

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra30.01.051>  
УДК 621.314.26:621.382.64

**М.Ф. Карушкін, В.П. Рукин**

НДІ «Оріон»  
вул. Ежена Потье, 8а, м. Київ, 03057, Україна  
E-mail: [orion@ri-orion.kiev.ua](mailto:orion@ri-orion.kiev.ua)

## ПРО ЗАСТОСУВАННЯ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В РІЗНИХ ГАЛУЗЯХ НАУКИ ТА ТЕХНІКИ

**Предмет і мета роботи.** Терагерцевий (ТГц) діапазон має низку специфічних властивостей, які роблять його привабливим для фундаментальних і прикладних досліджень у галузі астрофізики, радіолокації, для розроблення систем безпеки, дослідження властивостей плазми, спектроскопії газів, у біології та медицині. Унаслідок малої енергії квантів терагерцеве випромінювання безпечно для живих організмів і може бути використане для виявлення патології та сторонніх утворень. У цьому діапазоні знаходяться лінії обертових переходів молекул, у тому числі органічних, що відкриває можливості їх дослідження та селективного на них впливу. Ширококутові когерентні імпульси цього випромінювання застосовують для визначення характерних спектральних особливостей різних молекул, покладеного в основу методів виявлення та ідентифікації небезпечних хімічних речовин і оцінки якості харчових та сільськогосподарських продуктів.

**Методи та методологія.** Наводяться параметри приймальних пристроїв та чутливих елементів для виявлення та реєстрації випромінювання, у тому числі для створення приймальних пристроїв матричного типу для систем радіобачення. У роботі коротко описуються результати досліджень, виконаних авторами зі створення джерел випромінювання, та наводиться інформація, яка відображає стан та розвиток техніки ТГц-діапазону. Метою цієї роботи є визначення особливостей застосування ТГц-випромінювання у різних галузях науки і техніки, а також у біологічних дослідженнях та медицині.

**Результати.** Прогрес у розвитку техніки ТГц-випромінювання залежить від розроблення простих та дешевих напівпровідникових джерел та приймачів у цьому діапазоні частот. Проблема створення високостабільних та когерентних джерел випромінювання ТГц-діапазону вирішується авторами з використанням радіоімпульсного перетворення частоти високої кратності на кремнієвих лавинно-пролітних структурах. Висока ефективність множення частоти таких приладів визначається, в основному, механізмом посилення в межах імпульсу струму через структуру діода та фазовою синхронізацією НВЧ-коливань гармоніками періодичної послідовності імпульсів струму. Для зменшення втрат у конструкціях джерел випромінювання їх коливальна система, яка містить напівпровідниковий активний елемент, створюється з використанням радіальних ліній відкритого типу.

**Висновки.** У роботі показано, що подальший розвиток техніки ТГц-діапазону залежить насамперед від розроблення джерел випромінювання і приймачів з поліпшеними характеристиками. Зокрема розроблені генератори і помножувачі частоти на лавинно-пролітних діодах у діапазоні частот 100...350 ГГц з потужністю 10...30 Вт.

**Ключові слова:** генератор, приймач, помножувач частоти, радіобачення, субміліметровий діапазон, терагерцевий діапазон, чутливий елемент.

Ц и т у в а н н я: Карушкін М.Ф., Рукин В.П. Про застосування терагерцевого випромінювання в різних галузях науки та техніки. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2025. Т. 30. № 1. С. 51—64. <https://doi.org/10.15407/rpra30.01.051>

© 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>)

## Вступ

В основі традиційної НВЧ-електроніки лежить класична теорія електромагнетизму і теорія перенесення, що описує електрон-дірчасту взаємодію, яка виникає в результаті випромінювання. В основі фотоніки лежать принципи взаємодії випромінювання і матерії. Такий дуалізм передбачає використання в терагерцевому (ТГц) діапазоні гібридних пристроїв обробки сигналів, побудованих на поєднанні класичних і квантово-механічних принципів.

Проблема ТГц-діапазону полягає в тому, що вихідна потужність мікрохвильових електронних приладів обернено пропорційна квадрату частоти, а вихідна потужність оптичних квантових приладів прямо пропорційна квадрату частоти. Ці дві залежності перетинаються на ділянці частот в області 1 ТГц, утворюючи так звану щілину, або «терагерцевий провал», в якому потужність джерел випромінювання мінімальна. У роботі [1] обговорюються причини утворення «терагерцевого провалу» і методи його усунення. Розглядаються також властивості мікрохвиль терагерцевого діапазону та особливості їхньої взаємодії з речовиною [2, 3].

Очевидні переваги ТГц-діапазону:

- відсутність іонізуючого впливу;
- велика інформаційна ємність;
- здатність проникати через непрозорі об'єкти;
- можливість високоспрямоване випромінювання.

Ці та багато інших переваг зумовили бурхливий розвиток техніки цього діапазону в усьому світі. Вони визначили і привабливість практичного застосування хвиль ТГц-діапазону для створення високошвидкісних ліній зв'язку, високоточних РЛС, систем отримання зображень з високою роздільною здатністю, пристроїв дистанційної ідентифікації хімічних речовин тощо.

Необхідно зазначити, що до ТГц-діапазону належить основна частина реліктового випромінювання, відкритого в середині 1960-х років. Це широкосмугове випромінювання з максимальною амплітудою на довжині хвилі  $\lambda = 1$  мм виникло приблизно 3 мільярди років тому, і припускають, що воно вплинуло на формування живої матерії та еволюцію життя на Землі. За допомогою радіотелескопів, які працюють у цьому діапазоні, є можливість одержати нову інформацію

про далекі небесні тіла і вивчити динаміку створення та розвитку всесвіту.

У цій роботі представлено актуальні проблеми використання електромагнітних хвиль ТГц-діапазону в різних галузях науки і техніки. Розглянуто створення низки активних приладів для генерації та реєстрації ТГц-випромінювання, а також інші компоненти електронної техніки. Мета цієї роботи полягає в привертанні уваги розробників високочастотної техніки до можливостей ТГц-діапазону. На превеликий жаль, сьогодні практичні результати в галузі створення джерел випромінювання та їх застосування в цьому діапазоні отримані за кордоном. В Україні працюють кілька нечисленних колективів, активність яких знизилася з відомих причин, пов'язаних зі збройною агресією РФ проти України.

## 1. Активні випромінювальні прилади в ТГц-діапазоні

Розвиток і впровадження в ТГц-діапазоні систем і приладів різного призначення перебуває в прямій залежності від успіхів у галузі електроніки НВЧ і фотоніки. Активні прилади ТГц-діапазону можна умовно розділити на дві групи: джерела випромінювання і приймачі.

Джерела випромінювання поділяють на вакуумні лампи, твердотільні пристрої, а також лазерні та фотонні джерела.

В галузі твердотільної електроніки ТГц-діапазону нині спостерігається швидкий прогрес у створенні більш ефективних і дешевих джерел випромінювання. З цією метою створюються біполярні транзистори на гетеропереходах, транзистори з високою рухливістю електронів. Активно створюються пристрої на базі частотних помножувачів на діодах Шоттки на основі GaAs. Успіхи в розвитку технології виготовлення таких помножувачів дали змогу виготовляти пристрої з вихідними потужностями до кількох сотень мікровоат на частотах до 2.7 ТГц [4, 5].

Одним із перспективних джерел випромінювання ТГц-діапазону, на наш погляд, є генератори і помножувачі частоти на лавинно-пролітних діодах (ЛПД). Вони мають малі габарити, низьковольтне живлення, невисоку вартість, нескладні у виробництві і забезпечують когерентне випромінювання потужністю у десятки міліват [6].

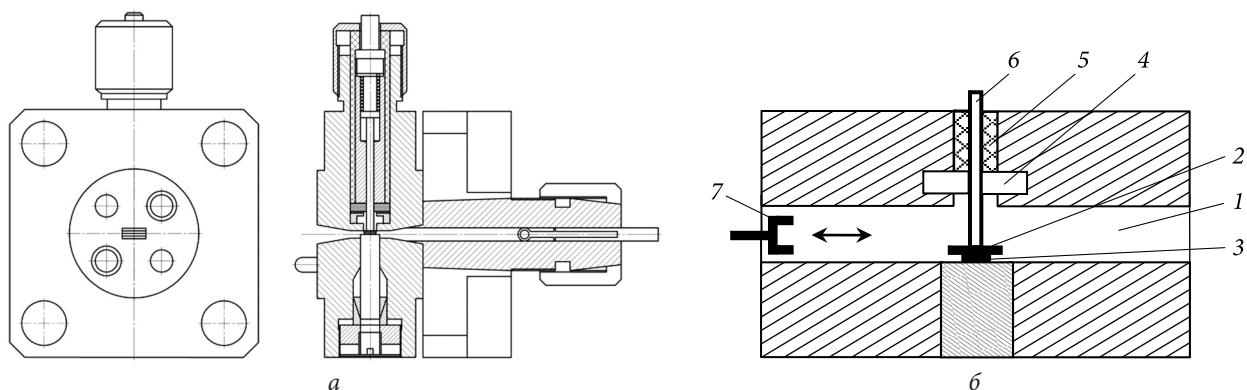


Рис. 1. Генератор на ЛПД із радіальним резонатором (діапазон частот 90...180 ГГц): а – загальний вигляд; б – схема конструкції

З метою зменшення втрат коливальну систему, що містить напівпровідниковий активний елемент для джерела випромінювання, доцільно створювати на відкритому резонаторі радіального типу. Конструкцію генератора (90...180 ГГц), виконаного на базі хвильоводів з площею перерізу  $2.4 \times 1.2$  мм або  $1.6 \times 0.8$  мм, а також його схему та еквівалентну схему представлено на рис. 1, 2, відповідно.

Схема генератора на ЛПД містить хвильвідний канал 1, резонатор радіального типу 2, ЛПД 3, радіальний фільтр 4, навантаження, що поглинає 5, штир живлення 6, короткозамикаючий поршень 7. У центрі під кришкою резонатора встановлено структуру ЛПД з імпедансом  $Z_d$ . Величина і характер імпедансу радіальної лінії, що приводиться до клем увімкнення діодної схеми (рис. 3), визначаються виразом

$$Z_{\text{вх}} = -j x_{\text{рл}} = -j \frac{377h}{\sqrt{\epsilon} 2\pi r} \cot(x, y),$$

де  $\cot(x, y)$  – радіальний котангенс;  $x = \frac{2\pi}{\lambda} r_0 \sqrt{\epsilon}$ ,  $y = \frac{2\pi}{\lambda} r \sqrt{\epsilon}$ ;  $\lambda$  – довжина хвилі;  $\epsilon$  – діелектрична проникність втулки;  $r$  – зовнішній радіус втулки;  $r_0$  – внутрішній радіус втулки.

Як діелектричну втулку застосовано промислове годинникове каміння рубіна, що має малі розміри, малі втрати та  $\epsilon = 9$ . Металізація торцевих поверхонь втулок вакуумним напиленням дає змогу виконати їх монтаж на тепловідводі методом термокомпресії.

Створення напівпровідникових пристроїв, що генерують електромагнітні коливання, завжди

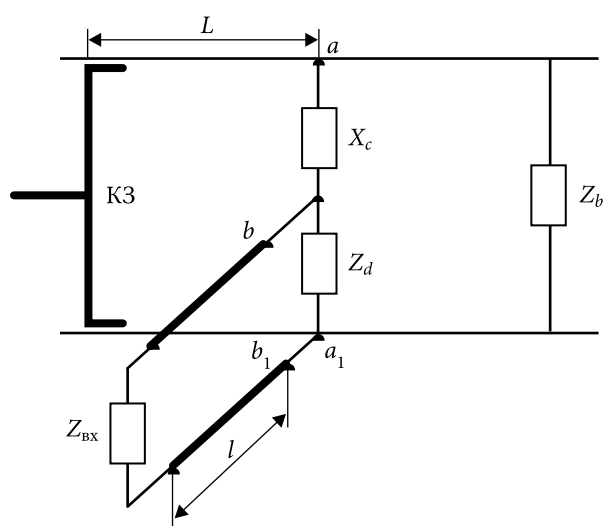


Рис. 2. Еквівалентна схема генератора з радіальним резонатором: КЗ – короткозамикаючий поршень;  $l$  – довжина радіальної лінії;  $L$  – довжина переміщення поршня;  $X_c$  – індуктивність штиря живлення;  $a, a_1$  – клемі включення активного елемента;  $b, b_1$  – клемі включення радіальної лінії до структури активного елемента;  $Z_{\text{вх}}$  – імпеданс радіальної лінії;  $Z_b$  – імпеданс хвильоводу;  $Z_d$  – імпеданс радіальної лінії

пов'язане з необхідністю розв'язання задачі стосовно ефективного відведення тепла від активного елемента, оскільки ця вимога визначає його довговічність та енергетичні характеристики. Максимальна потужність  $P$ , яку здатен розсіювати ЛПД, визначається виразом

$$P = (T_{\text{max}} - T_0) / R_T,$$

де  $T_{\text{max}}$  – максимальна температура  $p$ - $n$ -переходу;  $T_0$  – температура довкілля (тепловідводу);  $R_T$  – тепловий опір діода.

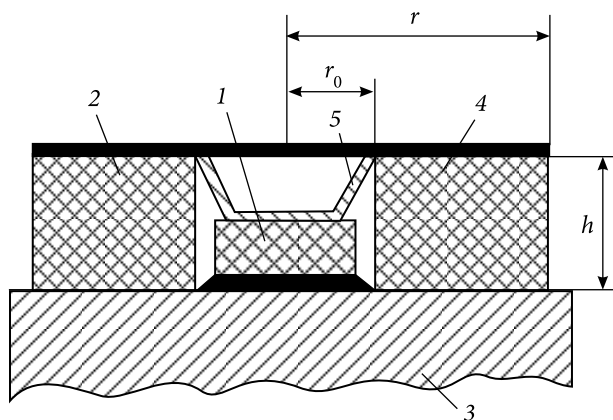


Рис. 3. Конструкція корпусованого ЛПД з використанням рубінової втулки: 1 – структура ЛПД; 2 – рубінова втулка; 3 – тепловідвід; 4 – верхній електрод; 5 – золота пластина

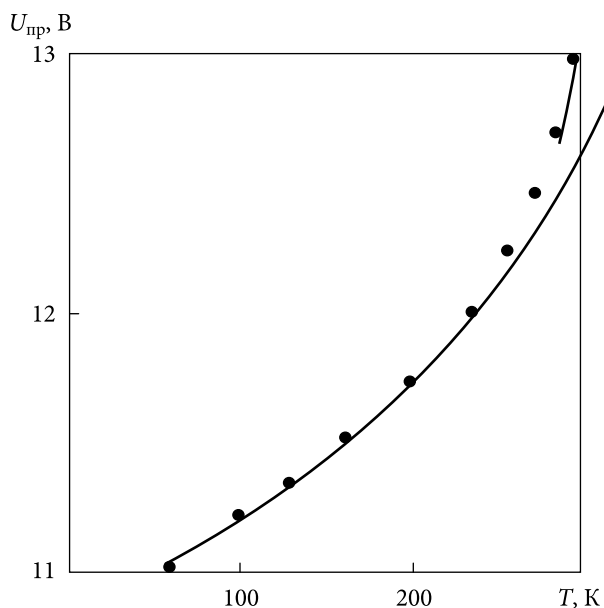


Рис. 4. Залежність напруги пробою  $U_{пр}$  від температури  $T$

Збільшення вхідної потужності постійного струму  $P$  можна досягнути трьома шляхами: збільшенням  $T_{max}$ , зменшенням  $R$  і охолодженням генератора, тобто зменшенням  $T_0$ . Збільшення температури переходу  $T_{max}$  може бути реалізоване шляхом використання широкозонних напівпровідників, таких як фосфід галію або нітрид галію. Зазвичай збільшення потужності електроживлення досягають завдяки зменшенню  $R_T$ , що досягається технологічними методами і застосуванням алмазних тепловідводів, але можливості цього підходу наразі практично вичерпані. На-

прямок, що залишився, — примусове охолодження генераторів до низьких температур — дає змогу досягти мети.

У цій роботі представлено результати досліджень охолоджуваних генераторів у короткохвильовій частині міліметрового діапазону довжин хвиль в інтервалі температур 300...77 К. Конструкцію генератора на основі хвилевідно-коаксимальної схеми з хвилевідним каналом, площа перерізу якого становить  $0.8 \times 1.6$  мм, представлено на рис. 2. Діапазон частот генерації 90...180 ГГц.

Двопротінні кремнієві структури  $p^+p-n-n^+$ -типу з напругою  $U_{пр} = 12.0...12.8$  В монтувалися в рубінові втулки із зовнішнім діаметром  $d = 0.4$  мм. Передпробійна ємність діода в корпусі становила  $C_{пр} = 0.3...0.35$  пФ; диференціальний опір на прямій гілці вольтамперної характеристики (ВАХ)  $R_{диф} = 0.6$  Ом; тепловий опір  $R_T$  на ділянці « $p-n$ -перехід — корпус» за умови  $T = 300$  К дорівнював приблизно 60 град/Вт. Генератор поміщали в посудину Дьюара з рідким азотом без вакуумізації. Зниження робочої температури навколишнього середовища призводило до зміни ВАХ і зменшення напруги пробою  $U_{пр}$  діода. Хід залежності  $U_{пр} = f(T)$  визначався характером взаємодії носіїв струму з кристалічною ґраткою структури діода (рис. 4). Зі зниженням температури зростала швидкість насичення носіїв  $V_S$ , що призводило до збільшення середньої кінетичної енергії електронів. Результати зміни рівня вихідної потужності генератора  $P$  залежно від величини постійного струму живлення  $I$  представлені на рис. 5.

Вивчення впливу охолодження діодів на частоту НВЧ-коливань дало змогу виявити деякі закономірності. При зниженні температури від 300 до 77 К спостерігається монотонне зростання частоти генерації приблизно на 10 %. Основний внесок у цей процес роблять збільшення швидкості насичення носіїв  $V_S$  і зміна реактивної провідності діода. Під впливом цих чинників зона генерації НВЧ-потужності зміщується в область більш високих частот у режимі заданого струму. За великих рівнів струму, які досягаються завдяки охолодженню тепловідводу рідким азотом, зона генерованих частот дещо розширюється, а рівень НВЧ-потужності в смузі частот зростає в 5–10 разів. Слід зазначити, що розроблені генератори на ЛПД (ГЛПД) зберігають високий



ступінь надійності. Генератори працюють із численними циклами охолодження-нагрівання; при цьому явищ, пов'язаних із деградацією корпусованих діодів, виявлено не було. Ця властивість у поєднанні з температурною стабільністю частоти діода за низьких температур розширює межі застосування ГЛПД у ТГц-діапазоні довжин хвиль.

Проблему створення високостабільних когерентних джерел у ТГц-діапазоні може бути розв'язано шляхом застосування структур ЛПД у пристроях перетворення частоти низькочастотних сигналів. Відомо, що в режимі такого перетворення цих пристроїв забезпечується рівень НВЧ-потужності вихідного сигналу на  $N$ -гармоніці:  $P_{\text{вих}} \sim 1/N$ .

Проведені дослідження показують, що висока ефективність множення частоти на ЛПД визначається здебільшого механізмом посилення в межах тривалості імпульсу струму через діод і фазовою синхронізацією цих НВЧ-коливань гармоніками періодичної послідовності імпульсів струму. Такий механізм ефективного множення може бути застосовний до різних приладів НВЧ [7]. Аналіз радіоімпульсного перетворення частоти на ЛПД визначає можливість збільшення ефективності за рахунок розширення часового наростання амплітуди сигналу в межах тривалості імпульсу струму [8]. Цей розгляд дає змогу також знайти навантажувальну характеристику помножувача частоти на ЛПД і визначити оптимальний опір навантаження, приведений до клем напівпровідникової структури. Уявлення про роботу ЛПД у режимі множення частоти дає його дослідження в самоузгодженому режимі. У нашому випадку такі дослідження проводилися в припущенні, що на ЛПД подають напругу зміщення і задану напругу низької частоти, а навантаженням є паралельний контур, налаштований на високу частоту.

Аналіз роботи активного помножувача частоти на ЛПД високої кратності дає змогу зробити такі висновки:

- ефективне множення частоти досягається при реалізації резонансу високочастотного кола ЛПД. При цьому необхідно забезпечити умову резонансу  $X_d \ll 1/(\omega_0 C_k)$  і вивести область лавинного резонансу з робочої смуги частот;

- параметри високочастотного кола доцільно обирати такими, за яких його добротність буде

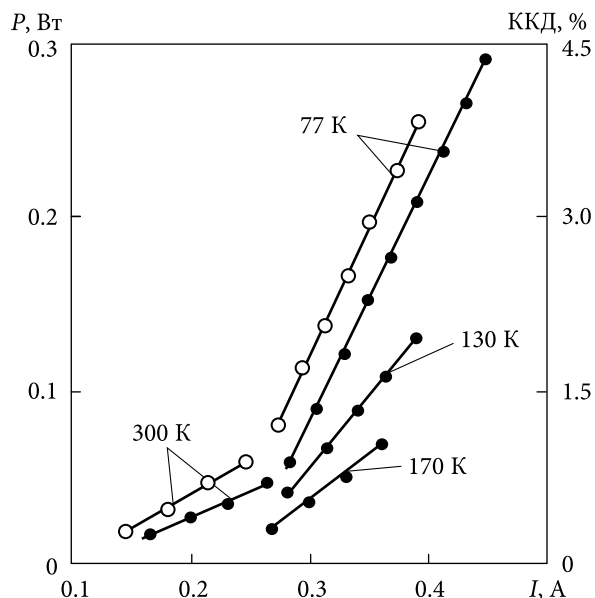


Рис. 5. Залежність вихідної НВЧ-потужності  $P$  (—●—●—) і ККД (—○—○—) генератора від струму живлення за різних значень навколишньої температури

мінімальною і виконуватиметься умова резонансу поблизу робочої частоти.

У табл. 1 наведено параметри помножувачів частоти високої кратності міліметрового діапазону [9].

Конструктивно помножувачі частоти високої кратності містять феритові хвилевідні вентиля та смугопрпусні фільтри. Хвилевідні вентиля захищають вихідний сигнал помножувача частоти від впливу навантаження. Фільтри пригнічують найближчі гармоніки у вихідному сигналі помножувача на рівні не менше 40 дБ. Під час модуляції струму керування ЛПД відбувається синхронна модуляція вихідного сигналу помножувача з глибиною модуляції щонайменше 70 дБ за частоти модуляції до 100 МГц.

Увімкнення ЛПД у коливальний контур із використанням радіальної лінії та налаштування перетворювача частоти для реалізації процесу множення частоти аналогічне увімкненню та налаштуванню генератора й підсилювача на ЛПД діапазону міліметрових хвиль.

При створенні перетворювачів частоти в ТГц-діапазоні використовували одно- та двопротітні структури ЛПД з параметрами, наведеними в табл. 2.

Збирання діодів виконували на мідному штифті з використанням кварцових опор і квар-

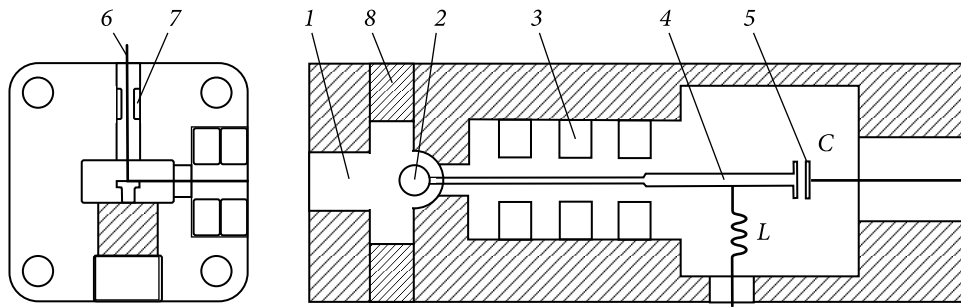


Рис. 6. Перетворювач частоти з хвилевідним каналом  $0.35 \times 0.7$  мм: 1 – хвилевід; 2 – ЛПД; 3 – фільтр радіального типу; 4 – несиметрична смугова лінія; 5 – розділювальна ємність; 6 – штир; 7 – коаксіальний настроювальний поршень; 8 – хвилевідний КЗ-поршень

цових кілець із діаметром 0.3 мм. Для виключення тиску на мезаструктуру під час складання діода було розроблено інтегральний вивід верхнього контакту в єдиному технологічному циклі виготовлення структур ЛПД. На рис. 6 наведено конструкцію перетворювача частоти високої кратності ТГц-діапазону в хвилевідному виконанні з площею перерізу каналу  $0.35 \times 0.7$  мм.

На рис. 7 представлено експериментальну залежність вихідної потужності перетворювача частоти в діапазоні 200...300 ГГц із використанням структур  $p^+-p-n-n^+$  та  $p^+-n-n^+$ -типів.

Високий ступінь нелінійності лавинного процесу в ЛПД дає змогу реалізувати високоефективні високочастотні підвищувальні перетворювачі частоти високого порядку. За поєднання

такої високої нелінійності з наявністю негативного опору ЛПД створено підсилювальні перетворювачі з підвищенням частоти в короткохвильовій частині НВЧ-діапазону [10]. При цьому наголошується, що під час виготовлення таких пристроїв застосовують менш складні схеми, ніж ті, що використовують у варакторних пристроях, такі як узгодження і фільтрація смуги пропускання. Вони з успіхом можуть бути застосовані як вихідні каскади в передавачах або ретрансляторах діапазону міліметрових хвиль. Ефективність перетворення частоти досягається за ширини збідненого шару  $n$ , що дорівнює 1.1 мкм, тобто структура діода аналогічна структурі діода, використовуваного для створення генераторів на ЛПД цього діапазону. При цьому

Таблиця 1. Параметри помножувачів частоти високої кратності

Найменування параметра	Частота, ГГц		
	75...100	90...140	110...180
Діапазон частот, ГГц	75...100	90...140	110...180
Вихідна потужність, мВт	10...50	10...50	10...20
Коефіцієнт множення	10...15	10...15	10...20
Робоча смуга частот, ГГц	0.5...1.0	0.5...1.0	0,5...1,0
Діапазон робочих частот сигналу синхронізації, ГГц	5...10	5...10	5...10
Напруга зміщення на ЛПД, В/А	24/0.15	24/0.15	24/0.15

Таблиця 2. Параметри одно- та двопрілітних структур ЛПД, використовуваних при створенні перетворювачів частоти в ТГц-діапазоні

Тип структури (профіль легування)	Напруга пробую, $U_{пр}$ , В	Ємність, $C$ , пФ	Індуктивність, $L$ , нГц	Струм живлення, $I$ , мА
$p^+-n-n^+$	$7.2 \pm 0.3$	$0.15 \pm 0.005$	$< 0.02$	130
$p^+-p-n-n^+$	$8.0 \pm 0.3$	$0.17 \pm 0.005$	$< 0.01$	140

ефективність перетворення порівнянн для діодів з одним дрейфом і діодів з двома дрейфами.

При підвищенні частоти сигналів, що генеруються в ТГц-діапазоні, їхні властивості наближаються до властивостей випромінювання оптичного діапазону. Застосуванню металевих хвильоводів у цьому діапазоні перешкоджає складність їх виготовлення через малі розміри та великі погонні втрати загасання. З огляду на це виникає інтерес до оптичних методів вимірювань величин і параметрів електромагнітних коливань у ТГц-діапазоні. Це зумовлює розвиток теорії та практики створення променевих квазіоптичних хвильоводів різного типу. Одним із методів вимірювання довжини хвилі в субміліметровому діапазоні є інтерференційний метод, сутність якого полягає в додаванні двох коливань, однакових за амплітудою та частотою. Для отримання двох сусідніх максимумів і мінімумів амплітуд сигналів необхідно змінити різницю ходу двох хвиль на одну довжину хвилі. Якщо в міліметровому діапазоні промені, що інтерферують, можна пропустити всередині металевого хвильоводу, то в субміліметровому діапазоні інтерферометри або оптичні резонатори працюють у квазіоптичних хвильовідних лініях передавання електромагнітної енергії і практично повторюють класичні пристрої оптичного діапазону.

На рис. 8 представлено схему вимірювальної установки ТГц-діапазону з інтерферометром Майкельсона, яка містить джерело випромінювання 1, модулятор 2 хвильовідного типу із застосуванням  $p-i-n$ -діода розподіленого типу, збудник 3 хвилі квазіоптичного тракту з фокусуючою лінзою, дифракційну ґратку 4, нерухоме дзеркало 5, рухоме дзеркало (хвилемір) 6, перехід 7 з променеводу на хвильовід перерізом  $0.8 \times 1.6$  мм (збудник), детекторну секцію (приймач) 8, управитель модулятора 9, підсилювач 10, осцилограф 11.

Довжина хвилі визначається зі співвідношення  $\lambda = 2\Delta L$ , де  $\Delta L$  — величина переміщення рухомого дзеркала 6, що відповідає двом сусіднім максимумам або мінімумам. Для виділення НВЧ-потужності окремих гармонік випромінювання необхідно на виході перетворювача встановлювати смугопропускний фільтр. Під час каналізації електромагнітних коливань ТГц-діапазону використовують фільтри, виконані у вигляді металевих ґраток або резонаторів. Частотна відстань

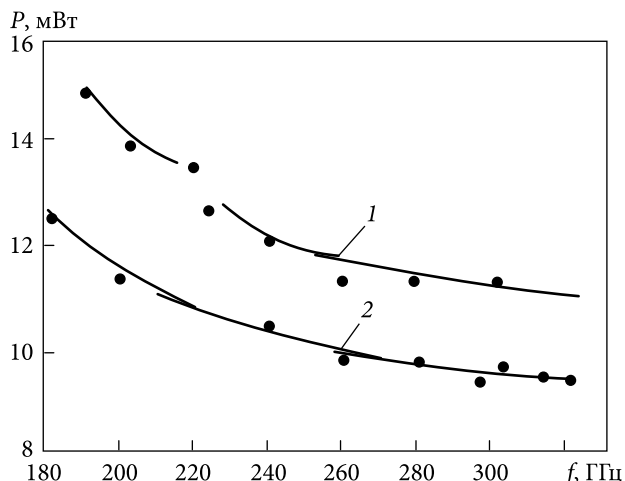


Рис. 7. Експериментальна залежність вихідної потужності перетворювача від частоти: 1 —  $p^+-p-n-n^+$ -структура; 2 —  $p^+-n-n^+$ -структура

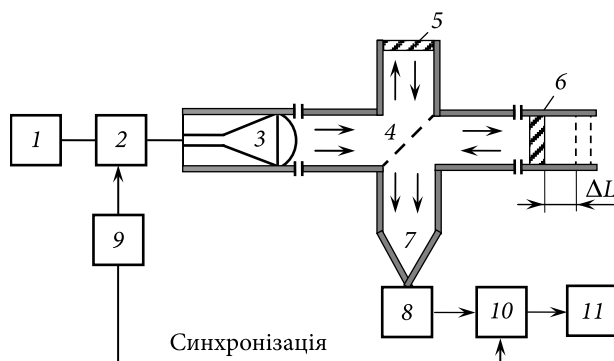


Рис. 8. Вимірювальна установка ТГц-діапазону на основі елементів і вузлів квазіоптичного тракту  $\varnothing 20$  мм

між гармоніками збільшується зі збільшенням частоти низькочастотного джерела коливань і тягне за собою зменшення коефіцієнта втрат перетворення  $K_{тр} = 10 \lg P_{вх} / P_{вих}$ .

Подальший розвиток твердотільних активних випромінювальних джерел і пристроїв терагерцевої електроніки пов'язаний з розвитком нанотехнології квантових точок — нанообластей у напівпровіднику. Перехід на нанорівень дасть змогу істотно поліпшити характеристики джерел випромінювання і створити прилади, що ґрунтуються на роботі квантово-механічних ефектів (наприклад, нанотранзистори і прилади на основі надґраток). З використанням квантових ефектів можливе не тільки поліпшення основних параметрів відомих пристроїв, а й створення принципово нових джерел наноелектроніки.

## 2. Приймальні пристрої ТГц-діапазону

Для приймання та реєстрації в ТГц-діапазоні традиційно знаходять застосування болометри, діоди з бар'єром Шоттки, безбар'єрні діоди Мотта і діоди на основі гетероструктур [5, 11]. Широку номенклатуру хвилевідних детекторів на діодах Шоттки з нульовим зміщенням виготовляє фірма Insight Product Co., США [12]. У роботі [13] описано болометр для детектування терагерцевого та міліметрового випромінювання. Принцип дії болометра на основі гетероструктури кадмій—ртуть—телур базується на ефекті розігріву електронного газу. Порогова чутливість приймача за кімнатної температури становить  $\sim 5 \cdot 10^{-9}$  Вт·Гц $^{-1/2}$ , а за температури  $T = 77$  К — порядку  $8 \cdot 10^{-16}$  Вт·Гц $^{-1/2}$ . Планарна метеликова антена дає змогу посилювати інтенсивність поля в чутливому елементі приймача на п'ять порядків порівняно з полем падаючої хвилі. Нині зарубіжні виробники пропонують широку номенклатуру болометрів ТГц-діапазону.

Для виявлення випромінювання в ТГц-діапазоні становить інтерес застосування піроелектричних приймачів. Такі приймачі не селективні за частотою і мають порогову чутливість  $10^{-9}$  Вт/Гц $^{-1/2}$  за кімнатної температури.

Піроелектричний ефект набув широкого застосування у створенні приймачів теплового випромінювання та для реєстрації малих і середніх перепадів температури. Принцип дії піроелектричного приймача ґрунтується на піроелектричному ефекті, який полягає у зміні поляризації піроелектричного кристала при зміні температури. Густина струму  $j$  визначається виразом

$$j = \frac{dP}{dt} = \frac{dP}{dT} \cdot \frac{dT}{dt} = \gamma \frac{dT}{dt},$$

де  $P$  — поляризація кристала;  $T$  — температура об'єкта;  $\gamma = \frac{dP}{dT}$  — піроелектричний коефіцієнт.

В якості чутливих елементів застосовують лінійні піроелектрики, які відрізняються необоротною поляризацією, а також сегнетоелектрики, які характеризуються реверсною спонтанною поляризацією.

Поряд з відомими конструкціями приймачів, у яких чутливий елемент розташовується всередині

камери, узгодженої з випромінюванням, існує тип матричних приймачів. Йдеться про приймачі, в яких використовуються чутливі мікроелементи, змонтовані на загальній підкладці зі спеціальною мікросмужковою антеною [13]. Застосування таких мікроелементів відкриває можливість створення приймальних ґраток або матричних приймачів для систем радіобачення. При цьому можливі два варіанти створення таких систем.

У першому варіанті використовується один приймач, який видає на вихід інформацію про рівень опромінення внаслідок зміни місцезнаходження в межах деякого вузла всієї антени разом із приймачем або внаслідок переміщення самого приймача у фокальній площині нерухомої антени.

У другому варіанті використовується лінійна матриця або ґратка квадратної форми, складена з окремих приймальних елементів (модулів). Головною перевагою другого варіанта є висока швидкодія і тривалий час накопичення сигналу, що дає змогу істотно підвищити чутливість приймальної системи.

Сама ідея перетворення радіорельєфу на видиме зображення не нова, але ТГц-діапазон виявився дуже перспективним для її реалізації. Активні системи радіобачення, що використовують підсвічування, можуть застосовуватися як для створення зображення, так і для терагерцевої терапії. Відомо, що на частотах понад 500 ГГц проникна здатність випромінювання знижується і поєднання радіобачення зі спектроскопією ускладнюється. У діапазоні частот до 200 ГГц створюють системи, які конкурують із рентгєнівськими системами зворотного розсіювання за якістю зображення і вартістю.

Низка зарубіжних фірм активно працюють над створенням матриць детекторів (приймачів) ТГц-діапазону, подібних до тепловізійних неохолоджуваних матриць. Поява на ринку матриць, безсумнівно, зробить системи терагерцевого радіобачення доступнішими для застосування.

Розроблення електронних пристроїв і компонентів ТГц-діапазону вимагає розвитку метрологічної бази. Нині робляться спроби розширити стандарти і норми НВЧ- та оптичних діапазонів на терагерцеву ділянку спектра. Вимірювання імпедансів компонентів у ТГц-діапазоні проводиться за допомогою векторних аналізаторів ланцюгів міліметрового діапазону. Низка зару-



біжних фірм, що спеціалізуються на виробництві векторних аналізаторів ланцюгів, активно просувають свою продукцію від частоти 100 ГГц вище по діапазону із застосуванням модулів розширення робочих частот. Модулі компанії Virginia Diodes (VDI) забезпечують повне охоплення хвилевідного діапазону частот, працюють у 12 смугах, починаючи з WR15 (50...75 ГГц) і закінчуючи WR1,0 (750...1100 ГГц), з додатковими смугами.

Під час розроблення приладів ТГц-діапазону в НДІ «Оріон», м. Київ, було використано прилади та пристрої для реєстрації та вимірювання рівнів випромінюваної потужності, а також пристрої для каналізації електромагнітних коливань цього діапазону, створені науковими установами м. Харкова (ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України, ННЦ «Інститут метрології», Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна) [15].

### 3. Використання ТГц-випромінювання в медицині

У роботі викладено особливості ТГц-випромінювання, яке має неіонізуючі властивості. За рахунок глибокого проникнення цього випромінювання в товщу досліджуваного об'єкта реалізується його об'ємне зображення. Одне з найактуальніших застосувань ТГц-випромінювання в медицині — це раннє виявлення та діагностика хвороб.

Сьогодні в практику охорони здоров'я активно впроваджуються електромагнітні методи терапії різних захворювань. Насамперед тут треба назвати низькоінтенсивні електромагнітні хвилі ТГц-діапазону. Процедура лікування проста. Антена терапевтичного апарата (наприклад, простий рупор) спрямовує потік електромагнітного випромінювання на біологічно активні точки, рефлекторні зони Захар'їна-Геда або на ділянку хворого суглоба. Час експозиції триває в середньому 30...40 хвилин, курс лікування становить 2—3 тижні. Ефективність такої терапії не поступається, а в деяких випадках перевершує медикаментозні методи. Вона добре зарекомендувала себе в гастроентерології (виразки шлунка та дванадцятипалої кишки), неврології (больові синдроми, остеохондроз, радикуліти), кардіології (гіпертонічна хвороба серця, стенокардія), уро-

логії, онкології (захист кровотворної системи, усунення побічних ефектів під час хіміотерапії), гінекології, хірургії, дерматології та ін. [14—16].

Які ж фундаментальні наукові міркування можуть наблизити нас до пояснення впливу електромагнітних хвиль на процеси життєдіяльності людини? Електромагнітні хвилі відіграли винятково важливу роль у зародженні життя на землі й продовжують бути найважливішим чинником його підтримання, є головним джерелом енергії та постачають людству інформацією про навколишній світ.

Унікальні можливості практичного використання низькоінтенсивних хвиль короткохвильової частини НВЧ-діапазону пов'язані з деякими їхніми особливостями. Ці хвилі сильно поглинаються водою, яка є головним компонентом усіх живих істот. Сумірність основних анатомічних структур у шкірі з довжиною хвилі в ній обумовлює сильну частотну залежність поглинання енергії опромінення. Усе це призводить до появи великих градієнтів поля, температури і слугує важливим подразником інформаційних каналів організму, що починаються в шкірі та продовжуються в інформаційних каналах усього організму (гуморальне середовище і нервова мережа).

Одним із найактуальніших застосувань ТГц-випромінювання в медицині є раннє виявлення та діагностика захворювань людини. Успішними прикладами застосування випромінювання можна назвати оцінку ступеня опіків, контроль загоєння і рубцювання ран [2, 17, 18]. Прозорість матеріалів для цього випромінювання дає змогу обстежувати рани без зняття гіпсу або бинтів. Для формування теплового зображення потрібна роздільна здатність менше 0.1 К. Типові градієнти температур у шкірі людини (від внутрішньої до зовнішньої поверхні) становлять 0.2...0.5 К/мм [19]. Сучасні теплові ІЧ-камери з матрицями болометрів мають роздільну здатність менш як 0.04 К за частоти кадрів 30 Гц. У ТГц-діапазоні такої роздільної здатності поки що не досягнуто. Однак перевага цього випромінювання — висока проникна здатність і, отже, можливе отримання 3D-зображення і виявлення джерел патології. Створення радіобачення в ТГц-діапазоні дає можливість ідентифікувати хвороби в дихальній, травній, судинній системах.

Активний розвиток нанотехнологій стимулює створення наноконтрастних агентів для терагерцевого бачення [20]. Наноконтрастні агенти служать для збільшення контрасту зображення здорових і патологічних ділянок тканини або молекул. В якості наноагентів можуть застосовуватися нанострижні, нанопроволоки, різні наночастинки, здатні створювати поверхневі плазмони, особливо важливі для організації терапії та відеомоніторингу [21]. Найбільш затребуваний для біозастосувань метал — золото, зважаючи на його біосумісність, сильне розсіювання поблизу резонансних частот локальних поверхневих плазмонів [6], здатність акцептувати біокон'юнктивні процеси [22].

Методика наноконтрастних агентів дає змогу реалізувати ефект гіпертермії, який відбувається внаслідок поверхнево плазмових поляритонів під час опромінення наночастинок близькохвильовим ІЧ-лазером. Як результат цього ефекту, температура води в ракових клітинах зростає і, оскільки терагерцевий сигнал чутливий до зміни температури води, ракові клітини можуть зондуватися і візуалізуватися. Одночасне застосування наночастинок і для терагерцевого бачення, і як гіпертермальних терапевтичних агентів дасть змогу реалізувати як діагностику на ранніх стадіях раку, так і терапію. Більше того, методика терагерцевого бачення може використовуватися для моніторингу доставки ліків в організмі хворого [23].

У роботі [24] подано огляд літературних і власних досліджень щодо впливу ТГц-випромінювання на стан ДНК, хромосом і активних генів у клітинах мікроорганізмів та еукаріотів. Описуються фенотипічні зміни при опроміненні цілісних організмів. Розглянуто мутагенні ефекти та епігенічні шляхи впливу, обговорено можливі шляхи та механізми нетеплового впливу ТГц-випромінювання.

Імпульсна терагерцева спектроскопія використовується для досліджень і неруйнівного контролю мультикомпонентних медичних препаратів у формі таблеток [25].

У роботі [26] описується застосування джерела ТГц-випромінювання в діапазоні довжин хвиль 1...700 мкм з амплітудною модуляцією вихідної потужності з частотою 40 ГГц...3.5 ТГц. Джерело випромінювання з успіхом застосову-

ють під час лікування опіків шкіри великої площі, а також для лікування важких форм захворювань центральної нервової системи людини.

## Висновки

Крім великих галузей практичного застосування ТГц-техніки і технології сьогодні починає розвиватися ще низка нових і вельми перспективних напрямів застосування пристроїв і систем цього діапазону частот [27—30]. Зокрема, слід зазначити можливості та перспективи, пов'язані з напрямком створення на основі терагерцевої технології високоточних систем тактичної зброї. Річ у тім, що будучи розташованими між НВЧ і оптичним діапазонами, ТГц-діапазон дає змогу розв'язувати багато з наявних проблем. Так, порівняно з НВЧ-діапазоном, цей діапазон дає змогу отримувати вищу, майже оптичну кутову роздільну здатність систем наведення за дуже незначних розмірів антенних систем. До того ж, на цих частотах тактичні цілі мають великі площі розсіювання. Водночас випромінювання цього діапазону, порівняно з інфрачервоним і оптичним, з істотно меншим загасанням проникає крізь пил, сніг, туман, дощ тощо. Усе це відкриває широкі можливості для створення дуже малогабаритних, високоточних і високоефективних головок самонаведення для систем тактичної зброї. Наразі освоюється нижній край ТГц-діапазону 94 і 120 ГГц.

Завдяки використанню ТГц-хвиль можна очікувати прориву в низці медичних технологій. Можливо, у недалекому часі терагерцеві апарати з нешкідливим електромагнітним випромінюванням увійдуть у практику медичної діагностики та зможуть замінити в низці випадків рентгенівські апарати. Однак найбільші надії медичних фахівців пов'язані з лікуванням онкологічних хворих. Оскільки терагерцеві хвилі добре проникають у верхні шари шкіри (аж до м'язових тканин), то з'являється можливість контролювати розвиток недоброякісних процесів на ранніх стадіях. Взагалі, у цьому діапазоні відкриваються нові можливості вивчення процесів навіть на рівні живої клітини.

Подальший прогрес у розвитку ТГц-систем для біологічних і медичних досліджень залежить насамперед від розроблення джерел випромінювання і приймачів з поліпшеними характе-

ристиками. Серед перспективних напрямів — квантовокаскадні лазери, фотопровідні антени з плазмовими наноелектродами. Ці прилади не потребують систем охолодження і мають можливості перебудови робочої частоти та ширини спектра і працюють як у режимі випромінювання потужності, так і в режимі її приймання (детектування).

Терагерцева спектроскопія дає змогу досліджувати квантові процеси в наноструктурах. Сучасна мікроелектроніка використовує механізми переміщення електричних зарядів (зарядо-

ві струми), а перспективні майбутні електронні пристрої розрізнятимуть електрони з різною орієнтацією спіна. Електроніка спінів перспективна тим, що управління спіном електронів вимагає менше енергії, ніж управління зарядовим струмом. На практиці це означає більшу швидкодію при зменшенні енергоспоживання — пристрій менше гріється і довше працює при живленні від акумуляторів. Зміна орієнтації спінів електронів може відбуватися під дією ТГц-випромінювання — і цей процес передбачається використовувати в електронних пристроях нового покоління.

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Grigoriev A.D. *Terahertz Electronics*. Cambridge Scholars, 2020. 340 p.
2. Taylor Z., Singh R.S., Bennett D.B., Tewari P., Kealey C., Bajwa N., Culjat M.O., Stojadinovic A., Lee H., Hubschman J.-P., Brown E., Grundfest W.S. THz medical imaging: in vivo hydration sensing. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2011. Vol. 1, Iss. 1. P. 201–219. DOI: 10.1109/TTHZ.2011.2159551
3. Ajito K., Ueno Y. THz chemical imaging for biological applications. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2011. Vol. 1, Iss. 1. P. 293–300. DOI: 10.1109/TTHZ.2011.2159562
4. Карушкін М.Ф. Можливості застосування терагерцевого діапазону радіохвиль. *Матеріали науково-технічної конф. «Проблеми телекомунікації»*. Київ: НТУУ КПІ, 2011. С. 23–27.
5. Schlecht E., Maiwald F., Chattopadhyay G., Martin S., Mehdi I. Design considerations for heavily-doped cryogenic Schottky diode varactor multipliers. *Proc. 12th Int. Symp. Space Terahertz Technology*. San Diego, USA, 2001. P. 485–494.
6. Chattopadhyay G. Technology, capability, and performance of low power terahertz sources. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2011. Vol. 1, Iss. 1. P. 33–53. DOI: 10.1109/TTHZ.2011.2159561
7. Карушкін М.Ф. Твердотільні пристрої та компоненти міліметрового діапазону довжин хвиль. *Прикладна радіоелектроніка*. 2002. Т. 1, № 1. С. 77–81.
8. Rolland P.A., Waterkowsky J.L., Constant E., Salmer G. New model of operation for avalanche diodes: frequency multiplication and conversion. *IEEE Trans. MTT*. 1976. No 11. P. 768–775.
9. Державне підприємство «Оріон». Київ, Україна. URL: <http://www.orion.org.ua>
10. Карушкін М.Ф. Помножувачі частоти міліметрового діапазону на основі напівпровідникових діодних структур. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*. 2018. №3. С. 22–37.
11. Karasik B.S., Sergeev A.V., Prober D.E. Nanobolometers for THz photon detection. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2011. Vol. 1, Iss. 1. P. 97–111. DOI: 10.1109/TTHZ.2011.2159560
12. Insight Product Co. *Terahertz Hot Electron Bolometer Detectors from 0.3 to 150 THz*. 2011. URL: <http://www.insight-product.com/detect3.htm>
13. Сізов Ф.Ф., Апатська М.В., Гуменюк-Сичівська Ж.В. Багатоелементні приймачі терагерцевого випромінювання на CdHgTe. *Прикладна фізика*. 2011. №3. С. 61–66.
14. Reck T.J., Jung-Kubiak C., Gill J., Chattopadhyay G. Measurement of silicon micro machined waveguide components at 500–750 GHz. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2014. Vol. 4, Iss. 1. P. 33–48. DOI: 10.1109/TTHZ.2013.2282534
15. Fitzgerald A.J., Wallace V.P., Jimenez-Linan M., Bobrow L., Pye R.J., Purushotham A.D., Arnone D.D. Terahertz pulsed imaging of human breast tumors. *Radiology*. 2006. Vol. 239, Iss. 2. P. 533–540. DOI: 10.1148/radiol.2392041315
16. Saviz M., Spathmann O., Streckert J., Hansen V., Clemens M., Faraji-Dana R. Theoretical estimation of safety thresholds for terahertz exposure of surface tissues. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2013. Vol. 3, Iss. 5. P. 635–640. DOI: 10.1109/TTHZ.2013.2264327
17. Mittlemon D., ed. *THz imaging in sensing with THz radiation*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2003. P. 117–153. DOI: 10.1007/978-3-540-45601-8
18. Woodward R.M., Wallace V.P., Cole B.E., Pye R.J., Arnone D.D., Linfield E.H., Pepper M. Terahertz pulse imaging in reflection geometry of skin tissue using time domain analysis techniques. *Proc SPIE, Int. Soc. Opt. Eng.* 2002. Vol. 4625. P. 160–169. DOI: 10.1117/12.469785
19. Fitzgerald A.J., Berry E., Zinov'ev N.N., Homer-Vanniasinkam S., Miles R.E., Chamberlain J.M., and Smith M.A. Catalogue of human reissue optical properties at terahertz frequencies. *J. Biol. Phys.* 2003. Vol. 29, Iss. 2–3. P. 123–128. DOI: 10.1023/A:1024428406218

20. Sirotkina M.A., Shirmanova M.V., Bugrova M.L., Elagin V.V., Agrba P.A., Kirillin M.Yu., Kamensky V.A., Zagaynova E.V. Continuous optical coherence tomography monitoring of nanoportieles accumulation in biological tissues. *J. Nanopart. Res.* 2011. Vol. 13, Iss. 1. P. 283–291. DOI: 10.1007/s11051-010-0028-x
21. Son J. THz electromagnetic interactions with biological matter and their applications. *J. Appl. Phys.* 2009. Vol. 105, Iss. 10. Id. 102033. DOI: 10.1063/1.3116140
22. Vegesna S., Zhu Y., Bernussi A., Saed M. Terahertz two-layer frequency selective surfaces with improved transmission characteristics. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2012. Vol. 2, Iss. 4. P. 441–448. DOI: 10.1109/TTHZ.2012.2202035
23. Ajito K., Kim J.-Y., Ueno Y., Song H.-J., Ueda K., Limwikrant W., Yamamoto K., and Moribe K. Nondestructive Multi-component THz Chemical imaging of Medicine in Tablets. *J. Electrochem. Soc.* 2014. Vol. 161, Iss. 9. P. B171–B175. DOI: 10.1149/2.0201409jes
24. Fedorov V.I., Serdyukov D.S., Cherkasova O.P., Popova S.S., and Nemova E.F. The influence of terahertz radiation on the cell's genetic apparatus. *J. Opt. Technol.* 2017. Vol. 84, Iss. 8. P. 509–514. DOI: 10.1364/JOT.84.000509
25. Meng K., Chen T.-N., Chen T., Zhu L.-G., Liu Q., Li Z., Li F., Zhong S.-C., Li Z.-R., Feng H., and Zhao J.-H. THz pulsed spectroscopy of paraffin embedded brain glioma. *J. Biomed. Opt.* 2014. Vol. 19, Iss. 7. Id. 077001. DOI: 10.1117/1.JBO.19.7.077001
26. Зубков А.Н. Системи радіобачення міліметрового діапазону. *Вісті вузів. Радіоелектроніка (Україна)*. 2005. Т. 48, № 9. С. 3–16.
27. Гончарук Н.М., Карушкін М.Ф., Малишко В.В., Орхівський В.А. Нітрідгалієвий діод з тунельною інжекцією. *Радіофізика та електроніка*. 2013. Т. 4(18), № 3. С. 69–78.
28. Oh S.J., Kang J., Maeng I., Suh J.-S., Huh Y.-M., Naam S., Son J.-H. Nanoparticle enabled-THz imaging for cancer diagnosis. *Opt. Express*. 2009. Vol. 17, Iss. 5. P. 3469–3475. DOI: 10.1364/OE.17.003469
29. Бецький О.В., Кислов В.В., Козьмін А.С., Креницький А.П., Майбородін А.В., Тупікін В.Д. Терагерцеві хвилі та їх застосування. *17-я Міжнародна Кримська конференція «СВЧ-техніка і телекомунікаційні технології» (КриМі-Ко 2007)*. Севастополь, Крим, Україна, 10–14 вер. 2007. Севастополь: Вебер, 2007. С. 771–773.
30. Oh S.J., Choi J., Maeng I., Park J.Y., Lee K., Huh Y.M., Suh J.S., Naam S., & Son J.H. Molecular imaging with THz waves. *Opt. Express*. 2011. Vol. 19, Iss. 5. P. 4009–4016. DOI: 10.1364/OE.19.004009

Стаття надійшла 26.08.2024

## REFERENCES

1. Andrey, D., Grigoriev, A.D., 2020. *Terahertz Electronics*. Cambridge Scholars.
2. Taylor, Z., Singh, R.S., Bennett, D.B., Tewari, P., Kealey, C., Bajwa, N., Culjat, M.O., Stojadinovic, A., Lee, H., Hubschman, J.-P., Brown, E., Grundfest, W.S., 2011. THz medical imaging: in vivo hydration sensing. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, **1**(1), pp. 201–219. DOI: 10.1109/TTHZ.2011.2159551
3. Ajito, K., Ueno, Y., 2011. THz chemical imaging for biological applications. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, **1**(1), pp. 293–300. DOI: 10.1109/TTHZ.2011.2159562
4. Karushkin, M.F., 2011. Possibilities of using terahertz range of radio waves. In: *Materials of scientific and technical conference "Problems of telecommunications"*. Kyiv: NTUU KPI Publ., pp. 23–27.
5. Schlecht, E., Maiwald, F., Chattopadhyay, G., Martin, S., Mehdi, I., 2001. Design considerations for heavily-doped cryogenic Schottky diode varactor multipliers. In: *Proc. 12th Int. Symp. Space Terahertz Technology*. San Diego, USA, pp. 485–494.
6. Chattopadhyay, G., 2011. Technology, capability, and performance of low power terahertz sources. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, **1**(1), pp. 33–53. DOI: 10.1109/TTHZ.2011.2159561
7. Karushkin, M.F., 2002. Solid-state devices and components of the millimeter wavelength range. *Appl. Radio Electron.*, **1**(1), pp. 77–81.
8. Rolland, P.A., Waterkowski, J.L., Constant, E., Salmer, G., 1976. New model of operation for avalanche diodes: frequency multiplication and conversion. *IEEE Trans. MTT*, **11**, pp. 768–775.
9. State Enterprise "Orion". Kyiv, Ukraine. Available from: <http://www.orion.org.ua>
10. Karushkin, M.F., 2018. Millimeter-range frequency multipliers based on semiconductor diode structures. *Technology and design in electronic equipment*, **3**, pp. 22–37.
11. Karasik, B.S., Sergeev, A.V., Prober, D.E., 2011. Nanobolometers for THz photon detection. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, **1**(1), pp. 97–111. DOI: 10.1109/TTHZ.2011.2159560
12. Insight Product Co. *Terahertz Hot Electron Bolometer Detectors from 0.3 to 150 THz*. 2011. Available from: <http://www.insight-product.com/detect3.htm>
13. Sizov, F.F., Apatska, M.V., Gumenyuk-Sychivska, Zh.V., 2011. Multi-element terahertz radiation receivers based on CdHgTe. *Appl. Phys.*, **3**, pp. 61–66.
14. Reck, T.J., Jung-Kubiak, C., Gill, J., Chattopadhyay, G., 2014. Measurement of silicon micro machined waveguide components at 500–750 GHz. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, **4**(1), pp. 33–48. DOI: 10.1109/TTHZ.2013.2282534
15. Fitzgerald, A.J., Wallace, V.P., Jimenez-Linan, M., Bobrow, L., Pye, R.J., Purushotham, A.D., Arnone, D.D., 2006. Terahertz pulsed imaging of human breast tumors. *Radiology*, **239**(2), pp. 533–540. DOI: 10.1148/radiol.2392041315



16. Saviz, M., Spathmann, O., Streckert, J., Hansen, V., Clemens, M., Faraji-Dana, R., 2013. Theoretical estimation of safety thresholds for terahertz exposure of surface tissues. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, **3**(5), pp. 635–640. DOI: 10.1109/TTHZ.2013.2264327
17. Mittlemon, D. ed., 2003. *THz imaging in sensing with THz radiation*. Berlin, Germany: Springer-Verlag., pp. 117–153. DOI: 10.1007/978-3-540-45601-8
18. Woodward, R.M., Wallace, V.P., Cole, B.E., Pye, R.J., Arnone, D.D., Linfield, E.H., Pepper, M., 2002. Terahertz pulse imaging in reflection geometry of skin tissue using time domain analysis techniques. *Proc SPIE, Int. Soc. Opt. Eng.*, **4625**, pp. 160–169. DOI: 10.1117/12.469785
19. Fitzgerald, A.J., Berry, E., Zinov'ev, N.N., Homer-Vanniasinkam, S., Miles, R.E., Chamberlain, J.M., and Smith, M.A., 2003. Catalogue of human reissue optical properties at terahertz frequencies. *J. Biol. Phys.*, **29**(2–3), pp. 123–128. DOI: 10.1023/A:1024428406218
20. Sirotkina, M.A., Shirmanova, M.V., Bugrova, M.L., Elagin, V.V., Agrba, P.A., Kirillin, M.Yu., Kamensky, V.A., Zagaynova, E.V., 2011. Continuous optical coherence tomography monitoring of nanoporties accumulation in biological tissues. *J. Nanopart. Res.*, **13**(1), pp. 283–291. DOI: 10.1007/s11051-010-0028-x
21. Son, J., 2009. THz electromagnetic interactions with biological matter and their applications. *J. Appl. Phys.*, **105**(10), id. 102033. DOI: 10.1063/1.3116140
22. Vegesna, S., Zhu, Y., Bernussi, A., Saed, M., 2012. Terahertz two-layer frequency selective surfaces with improved transmission characteristics. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, **2**(4), pp. 441–448. DOI: 10.1109/TTHZ.2012.220203
23. Ajito, K., Kim, J.-Y., Ueno, Y., Song, H.-J., Ueda, K., Limwikrant, W., Yamamoto, K., and Moribe, K., 2014. Nondestructive Multicomponent THz Chemical imaging of Medicine in Tablets. *J. Electrochem. Soc.*, **161**(9), pp. B171–B175. DOI: 10.1149/2.0201409jes
24. Fedorov, V.I., Serdyukov, D.S., Cherkasova, O.P., Popova, S.S., and Nemova, E.F., 2017. The influence of terahertz radiation on the cell's genetic apparatus. *J. Opt. Technol.*, **84**(8), pp. 509–514. DOI: 10.1364/JOT.84.000509
25. Meng, K., Chen, T.-N., Chen, T., Zhu, L.-G., Liu, Q., Li, Z., Li, F., Zhong, S.-C., Li, Z.-R., Feng, H., and Zhao, J.-H., 2014. THz pulsed spectroscopy of paraffin embedded brain glioma. *J. Biomed. Opt.*, **19**(7), id. 077001. DOI: 10.1117/1.JBO.19.7.077001
26. Zubkov, A.N., 2005. Millimeter-range radio vision systems. *University Bulletin. Radioelectronics*, **48**(9), pp. 3–16.
27. Honcharuk, N.M., Karushkin, M.F., Malyshko, V.V., Orikhovskiy, V.A., 2013. Gallium nitride diode with tunnel injection. *Radiophys. Electron.*, **4**(18)(3), pp. 69–78.
28. Oh, S.J., Kang, J., Maeng, I., Suh, J.-S., Huh, Y.-M., Haam, S., Son, J.-H., 2009. Nanoparticle enabled-THz imaging for cancer diagnosis. *Opt. Express.*, **17**(5), pp. 3469–3475. DOI: 10.1364/OE.17.003469
29. Betsky, O.V., Kyslov, V.V., Kozmin, A.S., Krenitsky, A.P., Maiborodin, A.V., Tupikin, V.D., 2007. Terahertz waves and their applications. In: *17th Int. Crimean Conf. Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo 2007)*. Sevastopol, Crimea, Ukraine, 10–14 Sept. 2007. Sevastopol: Veber Publ., pp. 771–773.
30. Oh, S.J., Choi, J., Maeng, I., Park, J.Y., Lee, K., Huh, Y.M., Suh, J.S., Haam, S., & Son, J.H., 2011. Molecular imaging with THz waves. *Opt. Express.*, **19**(5), pp. 4009–4016. DOI: 10.1364/OE.19.004009

Received 26.08.2024

M.F. Karushkin, V.P. Rukyn

RI «Orion»

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

#### ON THE APPLICATION OF TERAHERTZ RADIATION IN VARIOUS FIELDS OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

**Subject and Purpose.** The terahertz (THz) wave range possesses many specific properties that make it attractive for fundamental and applied research in astrophysics, radar, security system development, plasma property investigation, gas spectroscopy, biology, and medicine. Due to its low quantum energy, THz radiation is safe for living organisms and can be used to detect pathologies and foreign bodies. The THz range encompasses lines of rotational transitions of molecules, including organic ones, which opens up fresh opportunities for their study and selective manipulation. Broadband coherent pulses of THz radiation are employed to determine the characteristic spectral features of various molecules, forming the basis of new methods for detecting and identifying hazardous chemicals and quality assessment of food and agricultural products.

**Methods and Methodology.** The specifications for receiving devices and sensitive components used in the radiation detection and measurement are outlined, including details on constructing matrix-type receiving devices for radio vision systems. The authors also review the results of their research related to the development of radiation sources. Additionally, the current advancements in THz-band technology are reported. This work aims to identify specific applications of THz radiation across various fields, including biological research and medicine.

**Results.** Advancements in THz radiation technology are largely influenced by the advent of simple and cheap semiconductor sources and receivers in the range. The authors solved the problem of creating highly stable and coherent sources for THz radiation using high-multiplicity radio pulse frequency conversion on silicon avalanche structures. The high efficiency of frequency multiplication from such devices is mainly determined by the amplification mechanism in the current pulse through the diode structure and the phase synchronization of microwave oscillations by periodic-sequence harmonics of current pulses. To reduce the radiation source loss, the oscillatory system that contains a semiconductor active component employs open-type radial lines.

**Conclusions.** The paper shows that the further development of THz technology primarily depends on the current capabilities of radiation sources and receivers with improved characteristics. In particular, the developed generators and frequency multipliers based on avalanche diodes operate in the frequency range 100 to 350 GHz with a power output of 10 to 30 W.

**Key words:** *generator, receiver, frequency multiplier, radio vision, submillimeter range, terahertz range, sensitive element.*