

ІНФОКОМУНІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Здійснено короткий огляд стану електронно-компонентної бази, основних напрямків використання і метрологічного забезпечення терагерцової техніки.

Ключові слова: *терагерцовий діапазон, спектроскопія середовищ, астрофізичні дослідження, радіолокація, телекомунікації, пасивні елементи, активні елементи.*

Abstract

A brief review of the state of the electron-component basis, the main directions of use and metrological support of terahertz technique is made.

Keywords: *terahertz range, spectroscopy of environments, astrophysical research, radar, telecommunications, passive elements, active elements.*

Вступ

Терагерцовий діапазон частот електромагнітного спектра (ТГЧ-діапазон) є областю зближення електроніки та фотоніки, що істотно відрізняються як теоретичною базою, так і технікою генерації, здійснення прийому і обробки електромагнітних (ЕМ) хвиль. В основі традиційної електроніки лежать класична теорія електромагнетизму і теорія перенесення, а в основі фотоніки лежать квантомеханічні принципи взаємодії випромінювання і матерії. Такий дуалізм допускає (і передбачає) використання в ТГЧ-діапазоні гібридних пристроїв обробки сигналу, побудованих на змішуванні класичних і квантомеханічних принципів.

В даному огляді представлені деякі аспекти використання терагерцових хвиль в різних галузях науки і техніки, розглянуті сучасні активні прилади генерації та керування терагерцовим випромінюванням, а також пасивні радіоелектронні пристрої і компоненти; проведено аналіз проблем метрологічного забезпечення.

Метою роботи є вдосконалення радіоелектронних приладів і компонент ТГЧ-діапазону шляхом розвитку метрологічної бази.

Аналіз напрямків використання

ТГЧ-діапазон має специфічні властивості, що роблять його привабливим для фундаментальних і прикладних досліджень в області фізики, хімії, біології, медицини. Терагерцові хвилі перспективні для діагностики та спектроскопії різних середовищ, включаючи методи електронного парамагнітного резонансу і ядерного магнітного резонансу високої роздільної здатності, а також для створення щільної плазми та керування її параметрами.

Через малу енергію квантів терагерцове випромінювання є неіонізуючим і відносно безпечним для людини і, отже, може використовуватися для томографії та інших медичних досліджень [1]. Зокрема, так як терагерцовий квант енергії менше рентгенівського на дев'ять порядків, а зображення в Т-променях для біосередовищ є більш контрастним порівняно з ІЧ і оптичними хвилями через мале релеївське розсіювання, Т-хвилі є привабливою альтернативою рентгенівського випромінювання при проведенні діагностики живих організмів. В даний час вже запропоновані прилади для діагностики раку шкіри [2], грудей [3], контролю опікових ранових поверхонь [4], вмісту вологи біотканин [5], виявлення зубного карієсу [6].

Терагерцеві хвилі характеризуються також і лікувальним ефектом. В даний час запропоновані такі методи лікування і операційного втручання, як: NO-терапія [7], молекулярна ТГЧ-акустотерапія [8], ТГЧ-аеротерапія [2], інгаляційна ТГЧ-акустотерапія [1], термічна деструкція біотканин [3].

Висока проникаюча здатність ТГЧ-випромінювання дозволяє адаптувати його для виявлення та ідентифікації предметів, прихованих за перешкодами, що необхідно для вирішення завдань забезпечення безпеки [2]. Якщо об'єкт не містить молекул води або інших полярних речовин, сильно поглинаючих таке випромінювання, то Т-хвилі вільно проникають через об'єкт практично без втрат енергії. При цьому може спостерігатися резонансна взаємодія ЕМ-поля з окремими молекулами і молекулярними комплексами, що дозволяє не тільки виявляти, але і ідентифікувати різні середовища. Таким чином, можна виявити, наприклад, наркотики або вибухові речовини [3]. Крім того, як показали численні експериментальні дослідження, Т-промені дозволяють більш ефективно здійснювати контроль захованих під одягом небезпечних предметів і зброї [6].

В даний час ведуться інтенсивні дослідження процесів взаємодії ТГЧ-випромінювання з біологічними тканинами [2, 3], полімерами [4, 5], деревиною [6], надпровідними плівками [7], керамікою [8], метаматеріалами [3, 4]. У роботах [4-6] наведені результати теоретичних та експериментальних досліджень, присвячених передачі терагерцових сигналів в земній атмосфері і впливу опадів, випарів, диму і туману на поширення ЕМ-хвиль.

Спектроскопія речовин різного агрегатного стану є одним з найбільш перспективних напрямків використання ТГЧ-випромінювання. В роботі [1] наведені молекулярні спектри випромінювання і поглинання газів атмосферного повітря, метаболітів і забруднювачів повітря для діапазону 0,1 ... 3,39 ТГц, що представляють інтерес з точки зору екологічного моніторингу.

Завдяки розвитку методу терагерцової спектроскопії в часовій області (THz-TDS), який заснований на генерації і детектуванні когерентного ТГЧ-випромінювання за допомогою імпульсів одного і того ж лазера, стало можливим також і вивчення фізично-хімічних властивостей деяких рідин [7] і твердих матеріалів [8].

Терагерцові телескопи знаходять все більш широке застосування в астрофізичних дослідженнях фонового космічного випромінювання, для аналізу спектрів окремих зірок і галактик, астероїдів, комет, а також інших космічних об'єктів. Для цих цілей використовуються частоти: 120 ... 180 ГГц [4], 500 ГГц [5], 787 ... 950 ГГц [1]. Новітні відкриття в цій галузі були зроблені в останні роки за допомогою радіотелескопів SOFIA, CCAT, SPICA, ALMA, AMANOGAWA [2, 3]. Найбільш компактним з них можна вважати переносний телескоп, призначений для розміщення на одній з наукових станцій в Антарктиці [5].

Терагерцові прилади та пристрої успішно застосовуються в даний час у вимірвальній техніці, наприклад для дослідження субміліметрового випромінювання при пучково-плазмовій взаємодії. Зокрема, одна з таких радіометричних систем, що дозволяє реєструвати ЕМ імпульси з частотою 210 ... 530 ГГц, описана в роботі [5]. Інші застосування в цій області пов'язані з оцінкою щільності електронного потоку як функції координат і часу, а також температури в ядрі плазми [1, 5].

Терагерцеві хвилі представляють великий інтерес для радіолокаційних і телекомунікаційних систем. У більшості випадків для наземних радіоелектронних систем переваги ТГЧ-випромінювання щодо мікрохвильового і ГЧ-випромінювань проявляються на середніх і малих відстанях. Як показали результати досліджень [4, 5], загасання терагерцових сигналів досить сильно залежить від вологості атмосферного повітря і, наприклад, на частоті 400 ГГц може перевищувати 20 дБ / км при вологості 50 ... 60%. Висота і температура повітря також впливають на коефіцієнт ослаблення терагерцових хвиль.

На великих висотах вологість зменшується, збільшуючи тим самим дальність передачі сигналів. В [1] теоретично була досліджена пропускну здатність каналу зв'язку з безпілотним літальним апаратом, що знаходився на висоті 5 км на різних частотах. При розрахунках враховувалися фоновий шум і атмосферне затухання, викликане дощем. Ємність каналу визначалася із залученням теореми Шеннона-Хартлі, і було встановлено, що на частотах понад 500 ГГц ємність різко падає, і для передачі сигналів по каналах ємністю понад 10 Гбіт / с на відстані до декількох кілометрів найкраще підходить частотний діапазон 100 ... 300 ГГц.

Однією з серйозних проблем передачі інформації в ГЧ-діапазоні є спотворення фазового фронту хвилі, викликані локальними варіаціями коефіцієнта заломлення поблизу променя.

В результаті детектування такого сигналу викликає труднощі. Теоретичні прогнози, а також ряд експериментальних спостережень [4] говорять про те, що в ТГЧ-діапазоні ці проблеми не виникають.

Інша проблема в мікрохвильовому діапазоні пов'язана з розсіюванням ЕМ хвиль при віддаленні від випромінювача через дифракцію. В роботі [7] були проведені оціночні розрахунки для двох комунікаційних систем з робочими частотами 60 і 400 ГГц. Незважаючи на те, що ТГЧ-джерела поступаються за потужністю мікрохвильовим, при передачі сигналу на відстань до 2 км цей недолік був скомпенсований більш високою спрямованістю.

Оглядові роботи [1, 6, 7] присвячені детальному аналізу проблем реалізації терагерцових систем зв'язку для передачі інформації. У роботах [5-6] наведені експериментальні результати досліджень пропускну здатності і інші комунікаційні характеристики таких систем, отримані на частотах 100 ... 300 ГГц. Більшість з них характеризуються пропускну здатністю 10 ... 20 Гбіт / с, проте в роботі [7] дано обґрунтування можливості збільшення даного параметра до 100 Гбіт / с.

Нетрадиційні застосування ТГЧ-випромінювання, що з'явилися зовсім недавно, пов'язані з такими сферами, як археологія і мистецтвознавство [6].

Розвиток і впровадження ТГЧ-систем різного призначення знаходяться в прямій залежності від успіхів в області сучасної електроніки та фотоніки. Активні прилади ТГЧ-діапазону можна умовно розділити на три групи: генератори, підсилювачі і приймачі. Генератори, в свою чергу, поділяються на вакуумні лампи [6], твердотільні пристрої [4], а також лазерні та фотонні джерела. ТГЧ-джерела з високим рівнем потужності класифікуються за двома категоріями: з поперечною і поздовжньою модуляцією електронного потоку [3]. До першої категорії відносяться гіротрони і лазери на вільних електронах, а до другої - клістри з розподіленою взаємодією (КРВ), лампи біжучої хвилі (ЛБХ) і лампи зворотної хвилі (ЛЗХ). Рівні робочих потужностей для вакуумних ТГЧ-приладів варіюються від мВт до ГВт (12 порядків).

Лідерство серед потужних ТГЧ-джерел займають гіротрони, що застосовуються для розігріву плазми, термічної обробки матеріалів, радіолокації і телекомунікації [5]. Перехід до більш високих частот веде до зниження вихідної потужності джерела, що, в свою чергу, знижує ефективність застосування пристроїв ТГЧ-діапазону для деяких прикладних областей, наприклад радіолокації. Додаткові відомості про розробки ТГЧ-гіротронов можна знайти в [2].

Лідерами по створенню КРВ міліметрового і субміліметрового діапазонів є компанії СРІ (Канада) і SLAC (США). До теперішнього часу розробникам з СРІ вдалося досягти частоти 280 ГГц і імпульсної потужності 50 Вт [3], але наявні технології дозволяють збільшити робочі частоти до 700 ГГц [7] і імпульсної потужності 2 Вт. Серйозними проблемами на шляху подальшого розвитку терагерцових КРВ є технологічні обмеження, збільшення тепловиділення і перерозподіл електронного потоку за швидкостями [6].

Прикладом успішної реалізації терагерцових ЛЗХ може служити розробка імпульсного клінофона потужністю до 1 кВт і частотою 300 ГГц [5]. ЛЗХ ТГЧ-діапазону знаходять застосування в сфері промислової діагностики [6] і спектроскопії [7].

Для успішної реалізації ЛБХ ТГЧ-діапазону необхідно вирішити відразу кілька проблем, пов'язаних з малими розмірами таких приладів, прецизійним позиціонуванням електронної гармати всередині системи, пошуком шляхів створення малорозмірних катодів з високою щільністю струму, забезпеченням однорідних магнітних полів високої напруженості і т.д. Ці та деякі інші проблеми конструювання терагерцових ЛБХ вирішені в роботах [7-8].

Розробки квантових каскадних лазерів, що функціонують на частотах до 1,2 і навіть до 0,6 ТГц, представлені в [5]. Фотодіодні джерела з вихідною потужністю понад 10 Вт на частоті 1 ТГц, описані в [7]. Ще один тип лазерних джерел - лазери на вільних електронах - також можуть бути успішно пристосовані для експлуатації в терагерцовому діапазоні [3].

Висновки

Очевидні переваги ТГЧ-діапазону: відсутність іонізуючого впливу, велика інформаційна ємність, здатність проникати через непрозорі об'єкти, можливість високоняправленого випромінювання і деякі інші - зумовили швидкий розвиток терагерцової техніки в усьому світі. Ці переваги визначають привабливість практичного застосування Т-хвиль для створення високошвидкісних ліній зв'язку, високоточних РЛС, здатних працювати в складній електромагнітній обстановці, систем отримання зображень з дуже високим дозволом, пристроїв дистанційного ідентифікації хімічних речовин та іншої військової техніки та цивільної техніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Григорьев А.Д. Мощные источники когерентного излучения терагерцового диапазона // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Саратов, 2014. – С. 11–18.
2. BWO generators for terahertz dielectric measurements / G.A. Komandin, S.V. Chuchupal, S.P. Lebedev, Yu.G. Goncharov, A.F. Korolev, O.E. Porodinkov, I.E. Spektor, A.A. Volkov // Terahertz Science and Technology. – 2013. – Vol. 3, No 4. – P. 440–444.
3. Давидович М.В. Замедляющая система для ЛБВ терагерцового диапазона / М.В. Давидович, Н.А. Бушуев // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы Междунар. науч.-техн. конф., 2014. – Саратов, 2014. – Т. 1. – С. 299–306.
4. Электронно-оптические системы с повышенной однородностью магнитного поля для ЛБВ с ленточным пучком терагерцового диапазона / Н.А. Бушуев, Ю.А. Григорьев, А.А. Бурцев, А.Ю. Кивокурцев, Р.В. Спиридонов, П.Д. Шалаев // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы Междунар. науч.-техн. конф., 2014. – Саратов, 2014. – Т. 1. – С. 449–452.
5. Design and characterization of H-band (220-325 GHz) amplifiers in a 250-nm InP DHBT technology / K. Eriksson, S.E. Gunnarsson, V. Vassilev, H. Zirath // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2014. – Vol. 4, No 1. – P. 56–64.
6. Математическое моделирование дифракции электромагнитных волн на сеточных поляризационных структурах / С.А. Алавердян, И.Н. Кабанов, В.В. Комаров, В.П. Мещанов // Радиотехника и электроника. – 2014. – Т. 59, № 9. – С. 925–931.
7. Demonstration of the leaky wave antenna at submillimeter wavelengths / A. Neto, N. Llombart, J.A. Baselmans, A. Baryshev, S.J.C. Yates // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2014. – Vol. 4, No 1. – P. 26–32.
8. Esquiús M. Sinusoidally modulated graphene leaky-wave antenna for electronic beamscanning at THz / M. Esquiús, J.S. Gomez-Diaz, J. Perruisseau-Carrier // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2014. – Vol. 4, No 1. – P. 116–122.

Васильківський Микола Володимирович – канд. техн. наук, доцент кафедри телекомунікаційних систем та телебачення, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Vasylkivskyi Mikola V. – Ph.D., Senior lecturer of the Chair of Telecommunication Systems and Television, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.