

СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

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.

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

Abstract

Some aspects of the use of terahertz waves in various fields of science and technology are presented, modern active devices of generation and control of terahertz radiation, as well as passive electronic devices and components are considered; the analysis of problems of metrological maintenance is carried out.

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

Вступ

В якості приймачів терагерцового діапазону частот (ТГЧ-випромінювання) в даний час найчастіше застосовуються болометричні і діодні детектори. Появі надпровідникових болометрів (НПБ), принцип роботи яких базується на явищі електронного розігріву [5], в значній мірі сприяв прогрес в області тонкоплівкових надпровідникових технологій початку цього століття. Унікальні характеристики НПБ - висока чутливість і швидкодія до 50 нс - досягаються за рахунок сильної залежності опору в області переходу від температури і швидкої релаксації енергії в надпровідникових плівках товщиною 3-4 нм, що є базовим елементом НПБ.

Результати теоретичних досліджень даних структур представлені в [6]. В даний час на зарубіжних ринках представлені різні болометри терагерцового діапазону. Наприклад, в роботі [2], а також на сайті компанії Insight Product Company, США [1], що спеціалізується на розробці і виробництві синтезаторів, джерел, детекторів, змішувачів і помножувачів частоти міліметрового і терагерцового діапазонів, представлені технічні характеристики болометрів на гарячих електронах (hot-electron bolometers - HEBs).

До перспективних детекторів терагерцового випромінювання слід віднести також змішувачі на основі надпровідникових тунельних переходах типу НІН (надпровідник-ізолятор-надпровідник) [3], GaGe / GaAs-фотодіоди [4] і піроелектричні детектори [5].

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.

Огляд напрямків використання

Досить детальний огляд літератури щодо застосування різних напівпровідникових ТГЧ-пристроїв наведено в [7]. Одну групу таких пристроїв формують частотні помножувачі на діодах Шотткі на основі GaAs. В [6] була запропонована нова модель діода Шотткі, адаптованого для роботи в терагерцовому діапазоні.

Досягнення в розвитку методів розрахунку і технології виготовлення частотних помножувачів на планарних діодах Шотткі з GaAs, дали можливість виготовляти пристрої з вихідними потужностями

до декількох сот мікروات на частотах аж до 2,7 ТГц [4]. В даний час в області твердотільної електроніки терагерцового діапазону спостерігається дуже швидкий прогрес по створенню більш ефективних і дешевих джерел. З цією метою успішно застосовуються, зокрема, біполярні транзистори на гетеропереходах, транзистори з високою рухливістю електронів, генератори на діодах Ганна з частотами 400 ... 500 ГГц, тунельні діоди з частотою 1,04 ТГц [1].

Твердотільні інтегральні підсилювачі з вихідною потужністю до 10 мВт широко застосовуються в різних системах терагерцового діапазону з робочими частотами до 700 ГГц [2]. У деяких з них використовуються метаморфні транзистори з високою рухливістю електронів (МНЕМТ) [3], інші базуються на технології застосування гетероструктурних транзисторів (InP DHBT) [4]. Більшість розробок, представлених в [2], знаходяться на стадії лабораторних випробувань і не досягають частот понад 1 ТГц.

Для передачі ЕМ-сигналів і енергії в ТГЧ-пристроях в даний час застосовуються різні хвилеводні структури, в тому числі коаксіальні лінії, фотонно-кристалічні, діелектричні і металеві хвилеводи з полімерними плівками. Використання звичайних мікрохвильових коаксіальних ліній і діелектричних хвилеводів ближнього інфрачервоного діапазону малоефективно через високі втрати в металі або діелектрику. За останні роки в цій галузі вдалося добитися зниження втрат з 100 до 1 дБ / км для ТГЧ-хвиль [1, 2]. Кілька модифікацій таких хвилеводів детально проаналізовано в огляді [5], де також представлена конструкція круглого металевого хвилеводу з тонкою полімерною плівкою на внутрішній поверхні стінки хвилеводу. В такому хвилеводі поширюється основна хвиля гібридного типу HE_{11} , а ширина смуги пропускання досягає 1 ТГц. На частоті 2,5 ТГц ослаблення становить менше 1 дБ / м.

Ще одна лінія передачі (чотирьохшаровий металодіелектричний круглий хвилевід) була досліджена в [6] на частоті 1 ТГц. Хвилевід складається з двох шарів діелектрика з показником заломлення $n = 3,42$, між якими розташовується мідна плівка товщиною 50 ... 500 нм. Товщина зовнішнього шару діелектрика становить 1 мм, діаметр осердя 1 ... 20 мм. Простір між захисною металевою оболонкою і шаром діелектрика заповнений повітрям.

Поляризаційні пристрої різного типу знаходять широке застосування в засобах зв'язку і радіолокації мікрохвильового, міліметрового і терагерцового діапазонів частот. Одною з різновидів таких пристроїв є сіткові поляризатори (СП), призначені для керування параметрами лінійно поляризованих ЕМ-сигналів. Докладний порівняльний аналіз таких пристроїв зроблений в [1].

Терагерцові СП можуть бути також виготовлені за технологією LIGA [7], методом фотолітографії на полімерній основі [7], за допомогою нанодруку [1, 2] і на основі натягнутих дротяних перемичок круглої форми [6]. Як правило, такі пристрої використовуються в лабораторних умовах, наприклад для вивчення фонового космічного випромінювання [4] або для вимірювання спектра потужності випромінювання з плазми [2]. У ряді випадків в ТГЧ-діапазоні проявляються маловивчені фізичні ефекти, як, наприклад, аномальні резонанси, для пояснення яких залучається теорія плазмонів [3, 4].

Одномірні періодичні структури (металеві решітки), на базі яких створюються СП, також успішно застосовуються і для фільтрації сигналів [5]. Решітки, виконані на основі графену, виконують функції поглиначів Т-хвиль [6].

Двовимірні метаматеріали, які отримали також назву частотно-селективні поверхні (ЧСП), знаходять все більш широке поширення в терагерцовій техніці в якості фільтрів [7], поглиначів [1], модуляторів [2], антен [3] і т.д. ЧСП є планарними періодичними системами з елементами розсіювання (ЕР), виконаними або у вигляді отворів в екранах [7], або у вигляді ділянок металізації на діелектричній підложці [3].

Електродинамічні характеристики ЧСП залежать від розмірів окремих ЕР, їх періодичності, товщини металевих і діелектричних шарів, електрофізичних властивостей матеріалів.

В роботі [4] були проведені дослідження ЧСП з хрестоподібними ЕР, створені за допомогою фотолітографічної технології нанесення золотих і свинцевих плівок на підложку. Дослідження проводилися в діапазоні 1,5 ... 3 ТГц для металевих плівок різної товщини при різних температурах.

Двошарові ЧСП з хрестоподібними ЕР у вигляді золотої фольги товщиною 100 нм на скляній основі були розглянуті в роботі [3]. Експериментальні дослідження і чисельне моделювання таких структур наводилися для частотного діапазону 0,2 ... 0,8 ТГц при товщині діелектричної підложки 150 мкм. Отримані результати дозволили [5] розробити каскадний смуговий фільтр з центральною частотою 0,48 ТГц.

Важливим елементом багатьох систем ТГЧ-діапазону є приймально-передавальні антени різних типів (друковані та фотопровідні) [6]. Фотопровідні антени (ФА) зазвичай виконуються на базі копланарної полоскової структури. Перша з них має резонансну частоту 100 ГГц [3]. Ширина внутрішнього провідника копланарної лінії становить 0,06 мм при ширині самої лінії 0,1 мм. У конструкції антени використані гетероструктурний діод і силіконова підложка. Друга конструкція [7] призначена для роботи в широкому частотному інтервалі, включаючи частоту 125 ГГц.

В останні роки було запропоновано досить багато оригінальних конструкцій антен ТГЧ-діапазону. Зокрема, в роботі [1] представлена планарна антенна решітка з елементами для детектування слабких сигналів в діапазоні 1,89 ... 14,64 ТГц. Лінзова антена для решітки з робочою частотою 550 ГГц і технологія її виготовлення описані в [4]. Ще одна лінзова антена, але на цей раз впливають хвиль, інтегрована на одній підкладці зі надпровідним детектором для діапазону 0,15 ... 1,5 ТГц, була розроблена в роботі [4]. Терагерцова антена впливають хвиль може бути реалізована, наприклад, із залученням такого нового конструкційного матеріалу, як графен. Саме така конструкція була запропонована в [1] для електронно-променевого сканування в ТГЧ-діапазоні. Нарешті, в роботі [3] була розглянута спіральна антена, виконана на композитній підкладці діелектрик-напівпровідник з поліпшеними порівняно з аналогами електродинамічними характеристиками. Докладний аналіз рупорних ТГЧ-антен можна знайти в [4].

Розвиток сучасних мікромашин (MEMS) технологій виготовлення мікромініатюрних пристроїв міліметрового та терагерцового діапазонів дозволять виготовляти досить складні вузли та елементи. Прикладом таких пристроїв може служити змішувач субгармонік з робочою частотою 500 ГГц, описаний в [2]. Апаратура вхідного волноводного елемента даного змішувача становить 800×400 мкм [5]. Конструкції аналогічних змішувачів ТГЧ-діапазону представлені в [7].

Останні досягнення в області MEMS-технологій дозволяють реалізовувати коаксіальні хвилеведучі лінії з Т-хвилею, габаритні розміри яких становлять від 50 до 800 мкм [4].

Для них характерна надмала дисперсія основної хвилі до частот порядку 400 ... 500 ГГц, в залежності від розміру і хвильового опору лінії, і низькі втрати (0,1 дБ / см на частоті 50 ГГц) [1]. За рахунок шорсткості центрального провідника і скінефекта втрати можуть зростати до 0,22 дБ / см в W-діапазоні при середньквдратичном значенні шорсткості 0,1 мкм.

До теперішнього часу вже створені і пройшли експериментальну апробацію такі пасивні компоненти ТГЧ-техніки, як атенюатори [5], кільцеві резонатори для лазерних джерел [5], хвильові фільтри [2], що уповільнюють системи для ЛБХ [3], поляризаційні перетворювачі [4], переходи [6], модулятори [1].

У зв'язку з тим, що комерційне освоєння терагерцового діапазону тільки почалося і терагерцова метрологія, включаючи методи вимірювань і контрольно-вимірювальну апаратуру, знаходиться на ранній стадії розвитку, метрологічна інфраструктура нормативно-технічна документація, методологія, служби атестації та калібрування вимірювальних приладів - також тільки починають розвиватися, причому ряд зарубіжних фірм роблять спроби розширити стандарти і норми НВЧ і оптичного діапазонів на терагерцовий діапазон спектра.

Необхідно відзначити, що в даний час номенклатура серійно випускаємої контрольно-вимірювальної апаратури обмежена. Докладний огляд метрологічного забезпечення та електронно-компонентної бази вимірювальної техніки ТГЧ-діапазону зроблений в роботах [1, 2, 6].

Вимірювання потужності є одним з основних типів вимірювань в терагерцевому діапазоні частот. Це пов'язано, зокрема, з необхідністю розробки та калібрування генераторів. Вимірювач абсолютної терагерцової потужності, що випускається фірмою Thomas Keating Ltd., складається з двох компонентів: вимірювальної головки і блоку обробки сигналу на базі модуля збору даних USB-6211 фірми National Instrument [2]. Він призначений для вимірювання потужності терагерцової ЕМ-хвилі в відкритому просторі. Прилад забезпечує точність 10% при еквівалентній шумовій потужності близько 5 мкВт / Гц^{1/2}. Діапазон робочих частот - від 30 ГГц до 3 ТГц і вище. Вимірювальна головка являє собою фотоакустичний детектор. Калібрування здійснюється в програмно-керованому режимі шляхом нагрівання тонкої металевої плівки.

Вимірювання S-параметрів в ТГЧ-діапазоні частот проводяться, як правило, за допомогою векторних аналізаторів схем міліметрового діапазону. Ряд компаній, що спеціалізуються на виробництві векторних аналізаторів схем, активно просувають свою продукцію від 110 ГГц вгору по діапазону [2]. Серед них фірми Agilent Technologies, Inc., Rohde & Schwarz, OML, Inc., Virginia Diodes, Inc. та ін.

В роботі [6] описана схема для проведення вимірювань фазових шумів ТГЧ-сигналів з верхньою межею частотного діапазону 670 ГГц. Нова методика безконтактного вимірювання параметрів матриці розсіювання довільного ТГЧ-багатополюсника описана в [2]. Питанням калібрування вимірювальних систем для аналізу хвилеводних елементів присвячені роботи [3-5]. Прямі вимірювання впливу шорсткості на електропровідність пасивних ТГЧ-елементів були зроблені в [6].

Великий інтерес для вивчення процесів взаємодії Т-хвиль з різними середовищами представляють дані про магнітні і діелектричні властивості цих середовищ. Для проведення експериментальних досліджень різних речовин методом дисперсійної Фур'є-спектроскопії в роботі [7] були розроблені комплект квазіоптичних вузлів з п'єзоелектричним управлінням і вимірювальна схема для діапазону частот 0,1 ... 3 ТГц. Методом терагерцової спектроскопії в часовій області в [6] були досліджені величини коефіцієнтів заломлення і поглинання зразків мальтози.

Вода грає найважливішу роль на процеси взаємодії. В [1] розроблено математичну модель для розрахунку комплексної діелектричної проникності води для різних значень її солоності (s , ‰). Для $s = 0$ ‰ модель справедлива в широкому діапазоні частот аж до 500 ГГц і температур $-20 \dots + 40$ °С. Ця модель добре узгоджується з експериментальними даними, встановленими в [7] для субміліметрового діапазону.

Висновки

Наведений огляд свідчить про значні успіхи, досягнуті в даний час в області розробки терагерцових технологій, і швидкому розвитку електронної компонентної бази ТГЧ-діапазону. Подальше вдосконалення радіоелектронних приладів і компонент ТГЧ-діапазону вимагає розвитку метрологічної бази, включаючи розробку нормативно технічної документації, стандартів, методів і методик вимірювання параметрів терагерцовий ЕКБ, необхідного контрольно-вимірювального обладнання. При цьому процеси виготовлення і виробництва терагерцових компонентів часто залишаються складними і трудомісткими, внаслідок чого їх вартість залишається вкрай високою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Development of a wideband compact orthodome transducer for the 180-270 GHz band / C.A. Leal-Sevillano, T.J. Reck, G. Chattopadhyay, J.A. Ruiz-Cruz, J.R. Montejeo-Garani, J.M. Rebollar // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2014. – Vol. 4, No 5. – P. 634–637.
2. Grossman E.N. Non-imaging Winston cone concentrators for submillimeter-wave, overmoded waveguide / E.N. Grossman, O.D. Friedman, A.O. Nelson // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2014. – Vol. 4, No 1. – P. 65–74.
3. Moallem M. A broadband, micromachined rectangular waveguide to cavity-backed coplanar waveguide transition using impedance-taper technique / M. Moallem, J. East, K. Sarabandi // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2014. – Vol. 4, No 1. – P. 49–55.
4. Rahm M. THz wave modulators: a brief review on different modulation techniques / M. Rahm, J.-S. Li, W.J. Padilla // Journal of Infrared, Millimeter Wave and Terahertz Waves. – 2013. – Vol. 34. – P. 1–27.
5. Moallem M. A non-contact submillimeter wave S-parameters measurement technique for multiport micromachined devices / M. Moallem, K. Sarabandi // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2014. – Vol. 4, No 3. – P. 338–346.
6. Measurement of silicon micromachined waveguide components at 500-750 GHz / T.J. Reck, C. Jung-Kubiak, J. Gill, G. Chattopadhyay // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2014. – Vol. 4, No 1. – P. 33–48.
7. Yang B.B. Theoretical and empirical evaluation of surface roughness effects on conductivity in the terahertz regime / B.B. Yang, M.P. Kirley, J.H. Booske // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2014. – Vol. 4, No 3. – P. 368–375.

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

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