

Ящишин Є.М., д.т.н., проф. Варшавська політехніка, Варшава, Польща.
Yevhen.yashchyshyn@pw.edu.pl

Анотація: Стаття присвячена огляду досягнень в радіоелектроніці терагерцового діапазону та можливості їх застосування в системах безпроводного зв'язку. Результати останніх досліджень свідчать про те, що терагерцовий безпроводний зв'язок, завдяки своїм можливостям, матиме великий вплив на розвиток майбутніх систем.

Ключові слова: терагерцовий діапазон, телекомунікаційна система, радіоелектроніка.

PECULARITIES OF PRACTICAL USE OF THE TERRAHERTZ RANGE

Yevhen Yashchyshyn, Dr. habil., Prof. Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland. Yevhen.yashchyshyn@pw.edu.pl

Abstract: Commercial point-to-point wireless microwave systems operate at frequencies from 18 to 30 GHz (K and Ka bands). Several research projects concerned the development of electronics and optoelectronics for components of systems operating around 60 GHz. High attenuation of waves in this frequency range (due to the oxygen in the atmosphere) allows the construction of mobile systems with huge capacity due to the low level of interference (because attenuation). Even higher frequencies, up to 300 GHz, the Federal Communications Commission (FCC) has decided to allocate for mobile, satellite and wireless systems. Historically, the individual (point-to-point) and aggregate (by volume of space) bandwidth required for wireless networks has increased rapidly over the past decade. The fulfillment of this requirement is to increase the spectral efficiency by using advanced modulation techniques that allow to increase the data rate, enhanced bandwidth sharing and a higher number of frequency reuse in the space region. However, Shannon's formula for channel capacity, even when the solution is extended to a MIMO network, shows that there is an upper limit to such a strategy. In addition, only at higher frequencies the required transmission bandwidth may be available to ensure sufficient capacity. According to Edholm's law, bandwidth requirements for short-range wireless systems have doubled every 18 months for the last 25 years (from less than 1 kbps for wireless telemetry to more than 100 Mbps in 802.11n WLAN, Wireless Local Area Network).

The increased demand for wireless service is balanced with the desire for a wider band, resulting in an increase in the carrier frequency. However, in combination with the broadband THz potential, the wireless link will show short-distance and line-of-sight. They will be needed when enormous data transfer speeds over short distances ("firs", "last miles") are required. Example: fast Internet access in conditions where it is not profitable to lay optical cables. The compact nature of THz systems would allow for strict adherence to the planned regulations in the city. Such systems can be widely used: wireless broadband access extension to fiber or LAN cable networks, HDTV, in the form of wireless bridges between low-speed WLAN and fiber-optic networks with high throughput, creating internal pico cells meeting the requirements of a large number of mobile users.

The article is devoted to the review of achievements in terahertz radio electronics and the possibility of their application in wireless communication systems. Recent research suggests that terahertz wireless, with its capabilities, will have a major impact on the development of future systems.

Key words: terahertz range, telecommunication system, radioelectronics

Вступ

Терагерцовий діапазон частот (за старою номенклатурою - субміліметрові хвилі) включає частоти від 0,1 ТГц до 10 ТГц, які розташовані між діапазонами частот, що належать традиційному НВЧ і оптичним діапазоном. Терагерцовий діапазон використовується в основному в спектроскопії, астрономії, зображенні біологічних об'єктів і в системах безпеки. За останні роки інтерес до терагерцового діапазону значно зріс з точки зору побудови

широкосмугових безпроводних систем. Основною перевагою терагерцового діапазону в порівнянні з системами, що працюють в НВЧ-діапазоні, є той факт, що в терагерцовому діапазоні є багато можливостей для збільшення швидкості передачі даних в каналі завдяки наявності значно ширшої смуги. У порівнянні з НВЧ та оптичним діапазоном, властивості сигналів в терагерцовому діапазоні частот не були детально вивчені. Основною причиною стала відсутність джерел сигналів з прийнятними параметрами та високий рівень загасання в атмосфері Землі.

Однак, поширена думка про те, що терагерцові хвилі характеризуються високим атмосферним загасанням (близько 100 дБ на км), підтверджується лише частково. Існують частотні вікна прозорості, які дозволяють передавати сигнал з прийнятним загасанням. Окрім того, якщо розглядати передачу сигналів на короткі відстані, можливості застосування терагерцових безпроводних систем значно зростають. Результати моделювання передачі на короткі відстані на рівні моря для стандартного тиску та вологості можна знайти. Вони показують, що нижче 1 ТГц є численні діапазони частот, де передача досягає понад 70% на відстані 10 м. Це означає, що комунікаційні системи можна ефективно використовувати для побудови безпроводних мереж малої дальності.

В [1] показані вікна прозорості загасання в діапазоні від 0,1 ТГц до 3 ТГц, а також визначено дев'ять основних вікон прозорості: вікно А охоплює діапазон 100-550 ГГц, В: 560-750 ГГц, С: 760-980 ГГц, D: 0,98 -1,09 ТГц, E: 1,21-1,41 ТГц, F: 1,42-1,59 ТГц, G: 1,92-2,04 ТГц, H: 2,05-2,15 ТГц і I: 2,47-2,62 ТГц. Результати отримані при температурі 23°C і відносній вологості повітря 26%. Вони показують, що діапазони у вікнах прозорості нижче 1 ТГц (А, В, С і навіть D), безсумнівно, можуть використовуватися в системах зв'язку з високою швидкістю передачі. Однак, крім важливих переваг, основним обмеженням розвитку терагерцового зв'язку є відсутність на світовому ринку комерційних передавально-приймальних модулів для таких систем. Стрімкий розвиток напівпровідникової техніки вже досяг 100 ГГц, що є дуже привабливим і перспективним.

Як згадувалося раніше, терагерцовий діапазон частот лежить між діапазоном НВЧ і оптичним. Тому радіоелектронні компоненти можна розділити на дві основні групи: оптичні та електронні. Група оптичних елементів тривалий час домінувала в терагерцовому діапазоні, але все більш помітними стають електронні елементи, особливо в системах зв'язку. Наприклад, імпульсні оптичні системи на основі фемтосекундної лазерної техніки широко використовуються в TDS-спектроскопії та візуалізації. Однак незначна потужність таких систем та їх імпульсний характер не дозволяють використовувати їх у швидкісних системах зв'язку. Оптичні системи безперервної хвилі, засновані на техніці фотонних змішувачів, більше підходять для систем зв'язку, однак потужність генерованого сигналу обмежена мікроватами. Більше того, такі системи мало придатні для побудови інтегрованих конструкцій. Генератори безперервних хвиль можуть бути квантовими каскадними лазерами, які можуть генерувати потужність, що перевищує мілівати, але вимагає криогенних температур. З цієї причини склалася така ситуація, що основна увага приділяється електронним, переважно напівпровідниковим компонентам. Вакуумні компоненти, такі як гіротрони, клістри, лампи з біжучими хвилями, можуть генерувати високу потужність і можуть знайти застосування в спеціальних системах зв'язку, але не в системах масового використання через високу вартість цих компонентів.

Терагерцові напівпровідникові елементи

Дві групи напівпровідникових елементів (транзистори і діоди) утворюють найважливішу групу компонентів терагерцового, або, краще сказати, субтерагерцового діапазону (рис. 1).

У кожної групи є свої переваги та недоліки. Діоди можуть працювати на більш високих частотах, і вже широко використовуються для генерації та в якості детекторів сигналів. Діоди IMPATT (анг. IMPAct ionization Transit Time) можуть генерувати сигнали потужністю понад 1 Вт, а діоди Ганна - 100 мВт в діапазоні частот близько 100 ГГц. RTD (резонансний тунельний діод) можуть генерувати сигнали понад 100 ГГц, але з рівнем потужності нижче 1 мВт. Діоди з бар'єром Шоттки (анг. Schottky Barrier Diode) з частотою зрізу вище 1 ТГц також можуть використовуватися для виявлення терагерцових сигналів.

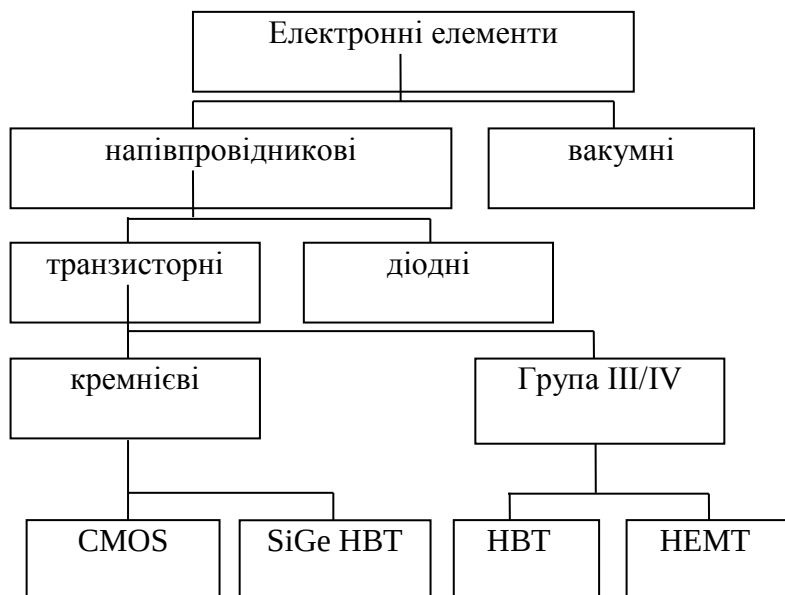


Рис. 1. Структура електронних компонентів терагерцових систем

Основним недоліком діодних детекторів є відсутність підсилення. З цієї причини співвідношення сигнал/шум на виході такого детектора не є задовільним. Поза тим, крім діодів Шотткі, решта діодних рішень непридатні для інтеграції з іншими схемами в системі.

У порівнянні з діодами, транзисторна техніка за останнє десятиліття показала помітні досягнення, що призвело до значного покращення ефективності. HEMT (анг. High Electron Mobility Transistors) і HBT (анг. Heterojunction Bipolar Transistors), засновані на напівпровідниках з групи III/IV, демонструють набагато більшу швидкість роботи пристрою в порівнянні з кремнієвими транзисторами. Гранична частота такого приладу оцінюється вище 600 ГГц, а максимальна — 1 ТГц. Крім того, напівпровідникові прилади з групи III/IV характеризуються більш високою напругою пробиття і більш високим рівнем вихідної потужності. З іншого боку, кремнієві пристрої також мають ряд переваг, в т.ч вони мають зрілу технологію, низькі витрати виробництва, сумісність з електронікою основної смуги частот і високу повторюваність виробництва. Відносно низька швидкість роботи кремнієвих приладів була основним обмеженням у використанні приладів тетрагерцового діапазону. Проте результати досліджень HBT-транзисторів на основі SiGe з частотою зрізу 400 ГГц і максимальною частотою 500 ГГц вже відомі [5, 6]. Кремнієві схеми, виготовлені за технологією CMOS разом з транзисторами NMOSFET, також мають частоту зрізу близько 400 ГГц.

Терагерцові трансивери

Трансивер, або приймач-передавач - це спеціалізований електронний пристрій, який оснащений одночасно передавачем і приймачем. Вони мають спільні схеми і розміщені в спільному корпусі. Сама назва походить від поєднання англійських слів transmitter-receiver, тобто передавати і приймати.

Численні публікації за результатами досліджень трансиверів для терагерцового діапазону, розроблених на основі різних напівпровідникових технологій, показують підвищений інтерес до цієї смуги частот. Найпопулярнішим рішенням є 130 нм технологія SiGe BiCMOS, яка використовує SiGe HBT транзистори з частотою зрізу близько 300 ГГц. Більше того, передавач і приймач приймача були інтегровані в одну систему. Додаткові схеми в залежності від використаної схеми системи (гетеродин з одним змішувачем, гетеродин з квадратурним змішувачем) також об'єднані в одну платформу. Це стосується, зокрема, VCO, LO, LNA, PA тощо. Трансивери на основі технології 65 нм CMOS мають максимальні робочі частоти близько 250 ГГц [12, 13]. Пропускна здатність такої системи була досягнута на рівні 2,5 Гбіт/с. У [14] показана інтегральна схема приймача, що працює на частоті 120 ГГц з

модуляцією ASK і досягає швидкості передачі сигналів у безпроводному каналі 9 Гбіт/с. CMOS трансивери все ще залишаються копією SiGe BiCMOS через потребу в більш низькому рівні напруги та меншому споживанні та розсіюванні енергії.

Найбільш перспективною технологією для терагерцового діапазону частот видається технологія на основі напівпровідників III/IV групи [15, 16, 17]. Трансивери, що працюють в районі 200 ГГц, більше не є рідкістю. Вони побудовані на основі 0,1 мкм GaAs mHEMT (метаморфічний HEMT) разом з МШУ і змішувачами. Зазвичай в такому трансивері LO є зовнішнім, однак приймачі трансиверів показують показник шуму від 6,9 дБ до 7,4 дБ. Досягнута вихідна потужність становила -7,1 дБм, а швидкість передачі – 12,5 Гбіт/с. Отриманий показник шуму був значно нижчим, ніж у випадку кремнієвих пристроїв (10 дБ для нижчих частот).

Технологічні аспекти інтеграції компонентів

Всі сучасні безпроводні трансивери можна розділити на дві основні функціональні частини: радіо (аналогову) частину і цифрову частину. Цифрова частина досягла дуже високого рівня універсальності та реконфігурації, що дає змогу гнучко адаптуватися до потреб вибраних додатків. Аналогова (радіо) частина розвивається набагато повільніше, особливо в терагерцовому діапазоні. В основному це пов'язано з тим, що, на відміну від цифрової частини, аналогові компоненти системи не можуть бути повністю інтегровані в напівпровідникові інтегральні схеми (наприклад, CMOS). Навіть якщо завдяки швидкому розвитку напівпровідникових технологій і постійному зменшенню розмірів транзисторів, активні аналогові схеми (такі як, наприклад, LO, PA, LNA) можуть бути ефективно реалізовані навіть на частотах, близьких до 100 ГГц., то як і раніше залишається основною проблемою виготовлення пасивних елементів (фільтрів, відгалужувачів, тощо) та антен необхідної ефективності.

Це обумовлено двома факторами: економічним і якісним. Розміри пасивних елементів, що працюють у терагерцовому діапазоні, становлять кілька квадратних міліметрів, у більшості випадків не дозволяють інтегрувати такі системи на дорогі напівпровідникові матеріали. У ситуації, коли ці елементи, однак, залишаються зінтегрованими, то їх електричні параметри суттєво відрізняються від отриманих за традиційними технологіями. Особливо це стосується інтеграції антен та антенних решіток [20, 21], розміри яких можуть досягати сотень квадратних міліметрів. З цих причин більшість комерційних безпроводних систем є гібридними модулями. Кожна частина такої гібридної системи виготовляється за спеціальною технологією в напрямку, що дозволяє отримати належну функціональну якість кожного модуля.

Іншим ключовим аспектом є правильний вибір методів складання активних інтегральних схем і технології інтегрування з пасивними схемами, включаючи антени. На жаль, дуже багато хороших рішень не відповідають основним вимогам, у тому числі ціновим. Наприклад, тонкоплівкова технологія MCM-D (анг. Multi-Chip Module-Deposited,), широко розроблена на початку останнього десятиліття, була надзвичайно точною, але вона настільки дорога і вимагає так багато часу, що вона була замінена іншою технологією типу MCM, а саме LTCC (анг. Low Temperature Co-fired Ceramic) [24]. Її основні переваги: можливість тривимірної системної інтеграції; дуже хороший контроль технологічних параметрів, що забезпечує високу повторюваність; гнучкість щодо кількості шарів і видів матеріалів, а також їх форми; досягнення мінімальної ширини ліній і перерв між лініями в межах 50 мкм; можливість інтеграції пасивних елементів: резисторів, індуктивностей та конденсаторів; можливість інтеграції розподілених елементів, а також антен і антенних решіток; можливість монтажу інтегральних схем, з використанням методів з'єднання провідників і, головне, низька ціна виготовлення пристроїв.

Крім того, досягнутий коефіцієнт теплового розширення близький до коефіцієнта напівпровідникових матеріалів, особливо кремнію. Це забезпечує високу щільність складання інтегральних схем.

Однак недорогі прилади для масового виробництва, включаючи технологію LTCC, ще не розроблені в терагерцовому діапазоні. Сьогодні LTCC зазвичай використовується в системах, що працюють на частотах нижче 100 ГГц. Проте ведуться дослідження щодо впровадження антенних систем або фільтрів в діапазоні понад 100 ГГц, однак можливості технології LTCC у цьому діапазоні частот ще недостатньо досліджені [27 – 29]. Основним керамічним матеріалом, який використовується в технології LTCC, є діелектрик Ferro A6-M, який характеризується відносною електричною проникністю $\epsilon_r' = 5.9$ і $tg\delta = 0.002$. Характеристики

цього діелектрика в діапазоні вище 100 ГГц не дуже хороші. Але головною проблемою здається недостатня провідність металевих елементів багатошарової структури, які звичайно виготовляються за допомогою срібних паст. Всі згадані недоліки технології LTCC не обмежують можливості розробки та використання інших відповідних матеріалів, включаючи, наприклад, LCP (анг. Leakage Crystal Polymer). Вперше представлено всебічний огляд гнучких технологій LCP, що охоплюють електричні схеми, антени, технології інтеграції та пакування, інтерфейсні модулі, MEMS, біомедичні пристрої та мікрофлюїдику від НВЧ до терагерцового діапазону частот.

Антени та лінії передачі

У будь-якій безпроводній системі антена відіграє ключову роль, а в терагерцовому діапазоні частот роль антени зростає в кілька разів. На додаток до основних характеристик антени, включаючи підсилення, просторову та частотну фільтрацію, антена в терагерцовій системі повинна справлятися з шкідливими ефектами, пов'язаними з частковою втратою сигналу в з'єднаннях між антеною та електронікою приймача. Як зазначалося раніше, генерація терагерцового сигналу дуже «дорога», в результаті чого втрати потужності в переходах можна компенсувати тільки за допомогою антени. З цієї причини в процесі проектування антени слід враховувати можливість максимальної інтеграції антени з мікросхемою приймача. Ця вимога запроваджує новий підхід до комплексного проектування, виробництва та тестування антени разом з електронною системою. Лінії, які використовуються для живлення антен та інтегральних схем, можуть істотно відрізнитися. Основними лініями передачі в терагерцовому діапазоні частот є, серед інших, металеві хвильоводи (рис. 2), які не придатні для реалізації інтегральних систем, і планарні лінії.

Незважаючи на великі зусилля, реалізувати інтегрований металевий хвильовод, виготовлений за технологією інтеграції активних елементів, поки не вдалося. Сучасні інтегральні схеми MMIC (анг. Millimeter IC) не сумісні з металевими хвильоводами і вимагають використання додаткових переходів, серед іншого, між плоскою лінією і хвильоводом. У показано нове бачення реалізації повністю інтегрованого металевого хвильоводу, яке розглядає можливість реалізації MMIC у технології щільних ліній з правильним розташуванням у хвильоводі для максимального зв'язку.

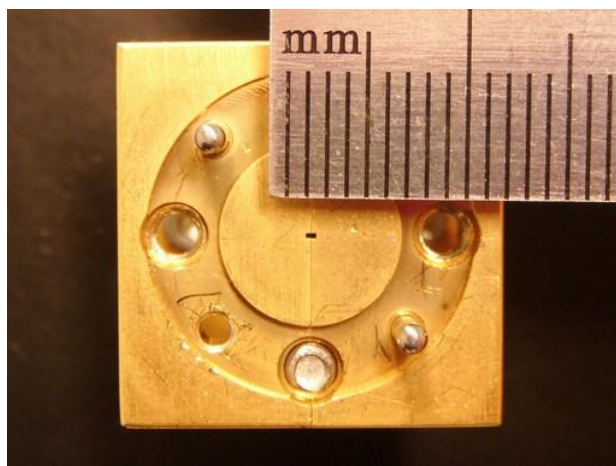


Рис. 2. Хвильовід WR-02.2 з монтажним фланцем (діапазон частот 325 ГГц-500 ГГц)

Повертаючись до планарних ліній, слід зазначити, що, крім сприятливих технологічних аспектів, такі лінії не забезпечують чисту поперечну хвилю TEM, а підтримують дисперсійні гібридні види [32]. Властивості дисперсії та втрат плоских ліній пов'язані з впливом спряжених типів хвиль та ефекту витоку енергії. Основний критерій спряження

полягає в тому, що електромагнітні поля двох типів не повинні бути ортогональними, а фазова швидкість паразитних типів хвиль повинна бути рівною або нижчою, ніж у типу хвилі, що поширюється [33]. У терагерцовому діапазоні типи хвиль, які можуть існувати в діелектричній підкладці, характеризуються повільнішою швидкістю поширення, ніж базові типи хвиль. Частота, при якій обидві швидкості стають рівними, називається критичною частотою. Вище цієї частоти домінуючий тип в лінії може стати витікаючим. У випадку, якщо необхідно підтримувати квазі-ТЕМ тип хвилі в лінії, поперечні розміри ліній повинні бути достатньо малими відносно до робочої довжини хвилі.

Як згадувалося раніше, підключення антени до трансивера на високих частотах є великою проблемою. Якщо в нижньому частотному діапазоні використання технології з'єднання за допомогою тонких провідників (анг. „wire-bonding”) виправдано і не створює особливих проблем, то на більш високих частотах, вже близько 60 ГГц, втрати на такому з'єднанні становлять 0,5 дБ і більше. Інша проблема – розміри ліній і з'єднань. Наприклад, ширина компланарної лінії 50 Ом, виконаної на кремнієвій підкладці товщиною 300 мкм, становить 150 мкм для центрального провідника і 20 мкм для відстані між провідниками. З'єднання такої лінії

з інтегральною схемою шляхом з'єднання тонким дротом вносить додаткову індуктивність залежно від довжини використаних провідників. Його наявність призводить до погіршення узгодженості систем. З цієї причини перевага віддається технології „flip-chip”. Перевагу цієї технології в порівнянні з „wire-bonding” можна побачити, серед іншого, у зменшенні поверхні, що оточує пристрій, зменшенні індуктивності з'єднання, кращих механічних властивостях, меншій вартості з'єднання – близько 0,01 \$ за одне під'єднання.

Системи, що працюють на частотах вище кількох сотень гігагерц, вимагають використання ще більш досконалої технології, яку можна назвати технологією MAIT (анг. Monolithic Antenna Integrated Technology). Один приклад можна знайти в [35]. Основним обмеженням широкого застосування MAIT є низька ефективність використаних випромінювачів, особливо при використанні комерційної кремнієвої технології. Однак збільшення доступності «товстих» полімерних підкладок, можливість отримувати «товсті» оксидні шари за допомогою напівпровідникового процесу та використання технології стоншування напівпровідникових підкладок можуть допомогти зменшити втрати підкладки до прийнятного рівня, а також можливість для виробництва інтегрованих монолітних систем, що працюють у терагерцевому діапазоні.

Висновки

Діапазон терагерцових частот сягає від десятків ГГц, тобто від НВЧ, до кількох ТГц, тобто до оптичного діапазону. Для цього діапазону потрібні абсолютно нові рішення, які раніше з різних причин не були або не могли бути реалізовані в НВЧ чи в діапазоні оптичних частот. Терагерцові частоти в основному використовувалися в спектроскопії, для зображення в системах безпеки, а також для біологічних та астрономічних досліджень. Основною причиною такого обмеженого використання була відсутність відповідних генераторів сигналів і високий рівень загасання хвиль в атмосфері. Величезний інтерес до терагерцового зв'язку в останні роки викликав доступ до дуже широкої смуги частот, а отже - можливість побудови систем безпроводного зв'язку з дуже високою швидкістю передачі даних. Швидкий прогрес у напівпровідникових технологій вже досяг поворотного моменту, що дозволяє реалізувати інтегровані приймачі для безпроводних систем, що працюють у діапазоні частот вище 100 ГГц. Крім того, можливість масового комерційного виробництва стає досяжною за рахунок привабливої ціни приладів, застосування сучасної надійної напівпровідникової технології та компактності схем. Результати останніх досліджень свідчать про те, що терагерцовий безпроводний зв'язок, завдяки своїм можливостям, матиме великий вплив на розвиток майбутніх систем.

Література

References

1. R. Appleby, R. Anderton, „Millimeter-Wave and Submillimeter –Wave Imaging for Security and Surveillance”, IEEE Proceeding, vol. 95, str. 1683-1690, 2007
2. <http://www.ska-polska.pl/pl/lab/teraherce-zobaczyc-niewidzialne>
3. Dwight Woolard, “Terahertz Electronics Research for Defense: Novel Technology and Science”, U.S. Army Research Laboratory, Army Research Office, RTP, NC 27709
4. R. Lai et al, "Sub 50 nm InP HEMT Device with F_{max} Greater than 1 THz," in IEEE International Electron Devices Meeting, 2007, pp. 609-611.
5. B. Geynet et al, "SiGe HBTs featuring $f_T > 400\text{GHz}$ at room temperature," in IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting, 2008, pp. 121-124.
6. B. Heinemann et al, "SiGe HBT technology with f_T/f_{max} of 300GHz/500GHz and 2.0 ps CML gate delay," in IEE International Electron Devices Meeting, 2010, pp. 30.5.1-30.5.4.
7. S. Lee et al, "Record RF performance of 45-nm SOI CMOS Technology," in IEEE International Electron Devices Meeting 2007 pp. 255-258.
8. E. Laskin, P. Chevalier, A. Chantre, B. Sautreuil, and S. P. Voinigescu, "165-GHz Transceiver in SiGe Technology," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 43, pp. 1087-1100, 2008.
9. E. Laskin, P. Chevalier, B. Sautreuil, and S. P. Voinigescu, "A 140-GHz double-sideband transceiver with amplitude and frequency modulation operating over a few meters," in IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting, 2009, pp. 178-181.
10. K. Schmalz, W. Winkler, J. Borngraber, W. Debski, B. Heinemann, and J. C. Scheytt, "122 GHz ISM-band transceiver concept and silicon ICs for low-cost receiver in SiGe BiCMOS," in International Microwave Symposium, 2010, pp. 1332-1335.

11. U. R. Pfeiffer, E. Ojefors, and Z. Yan, "A SiGe quadrature transmitter and receiver chipset for emerging high-frequency applications at 160GHz," in International Solid-State Circuits Conference, 2010, pp. 416-417.
12. S. T. Nicolson, A. Tomkins, K. W. Tan g, A. Cathelin, D. Belot, and S. P. Voinigescu, "A 1.2V, 140GHz receiver with on-die antenna in 65nm CMOS," in IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium, 2008, pp. 229-232.
13. Z. Xu et al, "D-band CMOS transmitter and receiver for multi-giga-bit/sec wireless data link," in IEEE Custom Integrated Circuits Conference, 2010, pp. 1-4.
14. R. Fujimoto, M. Motoyoshi, U. Yodprasit, K. Takano, and M. Fujishirna, "A 120-GHz transmitter and receiver chipset with 9-Gbps data rate using 65-nm CMOS technology," in IEEE Asian Solid State Circuits Conference, 2010, pp. 1-4.
15. W. R. Deal et al, "Scaling of InP HE MT Cascade Integrated Circuits to THz Frequencies," in IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium, 2010, pp. 1-4.
16. Kallfass et al, "A 200 GHz active heterodyne receiver MM IC with low sub-harmonic LO power requirements for imaging frontends," in European Microwave Integrated Circuits Conference, 2009, pp. 45-48.
17. M. Abbasi et al, "Single-Chip 220-GHz active heterodyne receiver and transmitter MM ICs with on-chip integrated antenna," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 59, pp. 466-478, 2011.
18. Drean S., Deltimple N., Kerherve E., Martineau B., Belot D., "A 65nm CMOS 60GHz class F-E power amplifier for WF applications," Integrated Circuits and Systems Design (SBCCI), 2012, 25th Symposium on, Aug. 30 – Sept. 2, 2012, pp.1-4
19. Franc A. L., Pistono E., Gloria D., Ferrari P., "High-Performance Shielded Coplanar Waveguides for the Design of CMOS 60GHz Bandpass Filters" Electron Devices, IEEE Trans. On, vol. 59, no. 5, pp. 1219-1226, May 2012.
20. Han-Lin Yue, Yung-Hsiang Chuang, Huey-Ru Chuang, "60-GHz CMOS integrated on-chip Yagi antenna and balun bandpass filter in 90-nm CMOS technology" Antennas and Propagation (EuCAP), 2012 6th European Conference on, 26-30 March 2012, pp.3546-3548
21. Xiao-Yue Bao, Yong-Xin Guo, Yong-Zhong Xiong, "60-GHz AMC-Based Circularly Polarized On-Chip Antenna Using 0.18-mm CMOS Technology" Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol.60, no.5, May 2012, pp. 2234-2241.
22. Grzyb J., Ruitz I., Cottet D., Troster G., "An investigation of the material and process parameters for thin-film MCM-D and MCM-L Technologies up to 100GHz", Electronic Components and Technology Conference, 2003, Proceedings, 53rd, May 27-30, 2003, pp. 478-486.
23. Sangsub Song, Chan-Sei Yoo, Donghwan Kim, Sung-Soon Choi, Jong-Chul Park, Kwang-Seok Seo, "Development of Millimeter-wave Integrated Passives on MCM-D Technology with Thin-Film Microstrip Line", Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International, 11-16 June 2006, pp. 952-955.
24. K. L. Wu, Y. Huang, "LTCC Technology and Its Applications in High Frequency Front End Modules", Proceedings of The 6th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, str. 730-734, Beijing, 28.10-01.11.2003
25. J. Xu, Z. N. Chen, X. Qing, W. Hong, "140-GHz Planar SIW Slot Antenna Array with a Large-Via-Fence Dielectric Loading in LTCC", The 6th European Conference on Antennas and Propagation, str. 3542-3545, Prague, 26.03-30.03.2012
26. A. Khalil, D. Passerieux, D. Baillargeat, S. Verdeyme, L. Rigaudeau, J. Puech, "150 GHz Band-Pass Filter Using LTCC Technology", IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 19, issue 7, str. 455-457, 2009
27. P. Piasecki, Y. Yashchyshyn, "Study of D-band LTCC Leaky Wave Antenna Optimized for Broadside Radiation," *Radioengineering*, tom 27, nr 2, str. 463-468, June 2018.
28. B. Synkiewicz-Musialska, D. Szwagierczak, J. Kulawik, N. Palka, P. R. Bajurko, "Impact of additives and processing on microstructure and dielectric properties of willemite ceramics for LTCC terahertz applications," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 40, no. 2, February 2020, pp. 362-370.
29. B. A. Słojewska, Y. Yashchyshyn, "Design of millimeter-wave six-port device for LTCC technology", *International Journal of Electronics and Telecommunications*, vol. 66, no. 1, pp. 37-43, 2020.
30. Z. Zhou, W. Li, J. Qian, W. Liu, Y. Wang, X. Zhang, Q. Guo, Y. Yashchyshyn, Q. Wang, Y. Shi, Y. Zhang, "Flexible Liquid Crystal Polymer Technologies from Microwave to Terahertz Frequencies", *Molecules*, tom 27, nr 4, ss. 1336, 2022
- [31] S.Lucyszyn, S.R.P.Silva, I.D.Robertson, R.J.Collier, A.K.Jastrzębski, I.G.Thayne, S.P.Beaumont, "Terahertz Multi-chip module (T-MCM) technology for the 21st century ?" In IEE Colloquium on Multi-chip Modules and RFICs (London, UK), pp. 6/1-6/8, May 1998.
32. R.H.Jansen, N.H.L.Koster, "New aspects concerning the definition of microstrip characteristic impedance as a function of frequency" in IEEE MTT-S Int. Dig., pp. 305-307, 1982.
33. R.Collier, "Coupling between coplanar waveguides and substrate modes", in 29th European Microwave Conf., pp. 11-25, December 1989
34. G.A.Riley, "Introduction of flip chip: what, why, how?", <http://www.flipchips.com/RileyWP01.pdf>, December 15, 2008.