

УДК: 621.372

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ В МІКРОСМУЖКОВИХ СЕНСОРАХ ГІГАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ

Чикун Р.С.

email: roman.chykun@nure.ua

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. МЕЕПШ
м. Харків, Україна

This study examines dielectric materials for microstrip sensors operating in the gigahertz range (1–100 GHz), focusing on their impact on sensitivity, losses, and stability. Traditional materials like FR-4 and alumina (Al_2O_3) are compared with advanced low-loss polymers (PTFE, Rogers 4350B), metamaterials, and nanomaterials. The analysis highlights that while FR-4 has high losses, modern materials enhance impedance matching, minimize attenuation, and improve sensor performance in high-frequency applications.

Мікросмушкові сенсори є важливими елементами сучасних високочастотних систем, що працюють у гігагерцовому діапазоні (1–100 ГГц). Вони застосовуються у безконтактному контролі матеріалів, біомедичних вимірюваннях, телекомунікаціях та системах безпеки [1].

Ключовими параметрами, що визначають ефективність таких сенсорів, є хвильовий опір, ефективна діелектрична проникність та втрати в підкладці. Тому вибір матеріалів для сенсорів безпосередньо впливає на їхні параметри, зокрема на рівень діелектричних втрат, чутливість і стабільність роботи [2].

Метою даної роботи є аналіз сучасних діелектричних матеріалів та оцінка перспектив їхнього використання у мікросмушкових сенсорах для підвищення їхньої ефективності.

Мікросмушковий сенсор (рис. 1) складається з: чутливого елемента – основної частини сенсора, що забезпечує взаємодію з об'єктом вимірювання; провідникової смуги – мікросмушкової лінії, що передає НВЧ-сигнал; діелектричної підкладки – середовища, яке визначає параметри хвильового розповсюдження; та заземлювального шару – металізованої пластини, що забезпечує контроль електромагнітного поля.

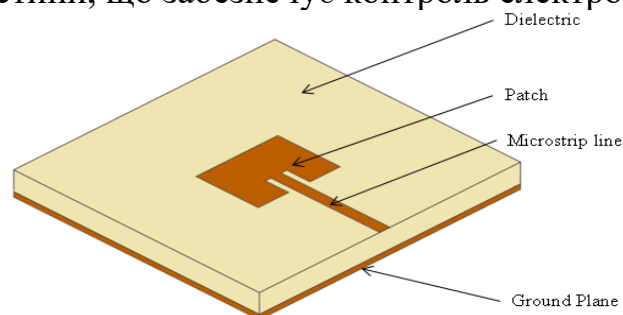


Рисунок 1 – Структура мікросмушкового сенсора

Мікросмушкові лінії широко використовуються в гігагерцових сенсорних системах через: компактність конструкції; можливість роботи у широкому частотному діапазоні; високу чутливість до змін електромагнітного середовища [1].

Підкладка мікросмушкового сенсора повинна мати [3]: низький рівень діелектричних втрат ($\text{tg}(\delta) \leq 10^{-3}$); стабільну діелектричну проникність; мінімальні втрати сигналу на частотах >10 ГГц.; механічну міцність і довговічність; доступність сировини;

Для аналізу було обрано як традиційні матеріали так і сучасний набір матеріалів:

1. Традиційні матеріали.

FR-4: Широко використовується через свою дешевизну та технологічність, але має високі діелектричні втрати, що обмежує його застосування на частотах вище 1 ГГц. [3].

Алюмінієвий оксид (alumina) (Al_2O_3): Має високу механічну міцність і стабільність, але є дорогим, що ускладнює масове використання. [2].

2. Сучасні матеріали.

Полімери з низькими втратами такі як Rogers 4350В [2], або PTFE (тефлон) які мають низькі втрати та стабільну діелектричну проникність..

Метаматеріали: Володіють штучно створеними властивостями, які забезпечують керування діелектричною проникністю. Вони підвищують чутливість сенсора, дозволяючи працювати на вищих частотах. [4].

Наноматеріали: Включення наночастинок металів чи оксидів дозволяє зменшити втрати й покращити локалізацію електромагнітного поля. Наприклад, графенові наношари [4].

Розрахунок основних параметрів сенсора для вибору матеріалу:

Діелектрична проникність ефективного середовища дорівнює:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}} \right)$$

Довжина хвилі в підкладці:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}}$$

де ϵ_r – діелектрична проникність підкладки; h – товщина підкладки; W – ширина мікросмушкової лінії; $\lambda_0 = \frac{c}{f}$ – довжина хвилі у вакуумі; c – швидкість світла у вакуумі; f – робоча частота електромагнітної хвилі;

Взявши робочий діапазон частот 60 ГГц, товщину підкладки 0.8мм та ширину мікросмушкової лінії 1.5мм ми зможемо отримати результати які представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Характеристики діелектричних матеріалів.

Матеріал	ϵ_r	ϵ_{eff}	λ_g (мм)	$\text{tg}(\delta)$
FR-4	4.4	3.32	2.74	0.0200
Al ₂ O ₃ (alumina)	9.6	6.88	1.91	0.0005
Rogers 4350B	3.5	2.71	3.04	0.0020
PTFE (тефлон)	2.1	1.75	3.78	0.0002
Метаматеріали	1.5	1.34	4.32	0.0005
Графеновий наносар	5.0	3.74	2.59	0.0005

Отже у даному випадку традиційні матеріали, такі як FR-4, мають високі діелектричні втрати, що обмежує їх використання на частотах вище 5 ГГц, тоді як Al₂O₃ забезпечує високу стабільність, але є дорогим і складним у виробництві. Метаматеріали та наноматеріали мають потенціал для значного підвищення чутливості сенсорів, однак їхня обмежена доступність ускладнює практичне застосування. Саме тому оптимальними для застосування в НВЧ-сенсорах є полімери з низькими втратами, зокрема PTFE та Rogers 4350B, оскільки вони мають низький рівень діелектричних втрат, стабільну проникність та високу технологічність. Використання таких матеріалів дозволяє мінімізувати загасання сигналу, покращити узгодження імпедансу та забезпечити високу чутливість сенсора у гігагерцовому діапазоні частот.

Список використаних джерел:

1. І.М. Бондаренко (2018) Мікрохвильові резонаторні апертурні сенсори: монографія / І.М. Бондаренко. – Харків: Видавець О. А. Мірошниченко, 2018. – 137 с.
2. Tzu-Nien Lee, John-H Lau, Cheng-Ta Ko, Tim Xia, Eagle Lin, Kai-Ming Yang, Puru-Bruce Lin, Chia-Yu Peng, Leo Chang, Jia-Shiang Chen, Yi-Hsiu Fang, Li-Yule Liao, Edward Charn, Jason Wang and Tzyu-Jang Tseng (2022) Characterization of Low-Loss Dielectric Materials for High-Speed and High-Frequency Applications / Unimicron Technology Corporation, No. 179, Shanying Road, Taoyuan City 33341, Taiwan / <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/7/2396>.
3. Azizi Othman (2023) Advanced Materials in PCB Manufacturing https://www.researchgate.net/publication/385493447_Advanced_Materials_in_PCB_Manufacturing.
4. Jade E. Holliman Jr, H. Todd Schaefer, B. Peter McGrail, and Quin R.S. Miller (2022) Review of foundational concepts and emerging directions in metamaterial research: Design, phenomena, and applications / Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington 99354, USA / <https://arxiv.org/abs/2211.03147>.