

**Галицький І.І.**

<https://orcid.org/0009-0002-2209-4354>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Живков О.П.**

<https://orcid.org/0000-0002-0242-1971>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## МІКРОХВИЛЬОВІ СЕНСОРИ НА БАЗІ КОМІРОК МЕТАМАТЕРІАЛІВ

У статті розглядаються сучасні підходи до створення мікрохвильових сенсорів на основі комірок метаматеріалів. Завдяки унікальним електромагнітним властивостям, які не зустрічаються в природних матеріалах, метаматеріали відкривають нові можливості в області високочутливої сенсорики. Особливу увагу приділено застосуванню таких сенсорів в Інтернеті речей (IoT), телекомунікаційних системах, бездротовому моніторингу та спектроскопії. У роботі також висвітлено фізичні принципи побудови сенсорів, типи структур, а також ефекти, що підвищують чутливість – зокрема, резонанс Фано, електромагнітно індукована прозорість та ефект Парселла. Представлено історію розвитку концепції метаматеріалів та її еволюцію в контексті сенсорних застосувань.

Окремий розділ присвячено класифікації метаматеріальних сенсорів за конструктивними особливостями, способом зчитування інформації, робочим частотним діапазоном та характером взаємодії з досліджуванним середовищем. Розглянуто сенсори на основі *split-ring resonators*, електромагнітних поглиначів, ЕІТ- та Фано-структур, а також мультирезонансні та пасивні бездротові сенсорні системи. Проаналізовано загальні принципи їх функціонування з використанням еквівалентних LC-моделей і параметрів S-матриці.

Значну увагу приділено використанню інтерференційних ефектів та мостових вимірювальних схем, які дозволяють суттєво підвищити роздільну здатність і стабільність сенсорних вимірювань, зменшити вплив шумів і температурного дрейфу. Наведено приклади практичної реалізації мікрохвильових резонансних та сенсорних структур, у яких експериментально продемонстровано ефекти Фано та електромагнітно індукованої прозорості. Показано, що запропоновані підходи є перспективними для створення компактних, енергоефективних і високочутливих сенсорів нового покоління для телекомунікаційних та IoT-платформ.

**Ключові слова:** метаматеріали, мікрохвильові сенсори, спліт-ринг резонатор (SRR), комплементарний спліт-ринг резонатор (CSRR), інтерференційні резонанси, резонанс Фано, електромагнітно індукована прозорість (ЕІТ), ефект Парселла, мікросмужкові структури, мостові вимірювальні схеми, Інтернет речей (IoT), телекомунікації, мікрохвильові фільтри, високочутливі сенсори.

**Постановка проблеми.** Розвиток телекомунікаційних систем, Інтернету речей (IoT) та бездротового моніторингу потребує створення компактних, енергоефективних і високочутливих сенсорів. Традиційні мікрохвильові сенсори часто мають обмежену чутливість і недостатню селективність. Використання комірок метаматеріалів дозволяє значно підвищити локалізацію електромагнітного поля та реалізувати резонансні

ефекти з високою добротністю, однак практичні принципи побудови таких сенсорів і методи підвищення їх чутливості потребують подальшого аналізу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У наукових роботах активно досліджуються метаматеріальні структури для мікрохвильової сенсорики, зокрема сенсори на основі *split-ring resonators*, електромагнітних поглиначів та мета-



поверхонь. Значну увагу приділено використанню резонансу Фано, електромагнітно індукованої прозорості та високодобротних резонаторів для підвищення роздільної здатності вимірювань. Окремі дослідження присвячені пасивним і бездротовим сенсорам для IoT, проте узагальнений підхід до поєднання резонансних ефектів і вимірювальних схем залишається актуальним.

**Постановка завдання.** Метою статті є аналіз фізичних принципів роботи мікрохвильових сенсорів на базі комірок метаматеріалів та демонстрація ефективних підходів до підвищення їх чутливості. У роботі розглядаються типи метаматеріальних сенсорів, інтерференційні резонансні ефекти (Фано, ЕПП, ефект Парсела), мостові схеми зчитування сигналу, а також приклади практичної реалізації сенсорних структур.

**Виклад основного матеріалу.** З розвитком технологій Інтернету речей (IoT), телекомунікацій та автоматизованих систем моніторингу виникає потреба у високочутливих, компактних та енергоефективних сенсорах. Традиційні методи побудови мікрохвильових сенсорів мають обмеження щодо габаритів, чутливості та можливостей інтеграції з бездротовими технологіями. У цьому контексті особливу увагу дослідників привертають метаматеріали – штучно створені структури, що демонструють виняткові електромагнітні властивості, такі як від’ємна діелектрична проникність або магнітна сприйнятливність, або ж надзвичайно висока локалізація електромагнітного поля. Використання метаматеріалів у сенсорних системах дозволяє створювати надчутливі резонансні елементи, здатні реагувати на мінімальні зміни навколишнього середовища, як-от зміни температури, вологості, складу газів або біохімічних речовин. Особливої актуальності набувають метаматеріальні сенсори, що працюють у мікрохвильовому діапазоні, який є базовим для більшості телекомунікаційних протоколів, включно з Wi-Fi, 5G та іншими стандартами.

#### **Історія з’явлення метаматеріальних сенсорів**

Поняття метаматеріалів з’явилося на межі XX і XXI століття. Одним із перших, хто теоретично передбачив існування матеріалів із від’ємним показником заломлення, був Джон Пендрі (J. V. Pendry), а перші експериментальні підтвердження належать Девіду Сміту (D. R. Smith) і співавторам [1-2]. У 2000-х роках вони запропонували і реалізували структури, що мали від’ємну ефективну проникність і діелектричну сприйнятливність у мікрохвильовому діапазоні. Такі структури формувалися зі штучних комірок – напри-

клад, кільцевих розрізних резонаторів (SRR) та провідникових стрижнів [3]. Хоча спочатку дослідження метаматеріалів були орієнтовані на створення «невидимих» матеріалів або надлінз, досить швидко стало зрозуміло, що їх здатність до високої локалізації електромагнітного поля може бути використана у сенсоріці [4]. Резонансні структури на базі метаматеріалів виявилися надзвичайно чутливими до змін діелектричного середовища, що дало поштовх до розвитку нового класу сенсорів – метаматеріальних. З часом метаматеріальні сенсори почали інтегрувати з мікросмушковими лініями, антенними структурами, резонансними модулями, і навіть з біосенсорами. Особливо активно ці розробки стали розвиватися після 2010 року, коли було опубліковано низку робіт про мікрохвильові сенсори з високою добротністю на базі асиметричних мета-комірок, що реалізовували резонанс Фано. Сьогодні метаматеріальні сенсори використовуються не лише в науці, але й у промислових і медичних застосуваннях, а також в системах розумного середовища – smart home, smart city, wearable IoT.

#### **Перспективи використання метаматеріальних сенсорів у телекомунікаціях та IoT**

Сучасний розвиток Інтернету речей (IoT) та майбутніх телекомунікаційних систем шостого покоління (6G) вимагає революційного підходу до побудови сенсорних систем. У зв’язку з потребою в мільйонах компактних, автономних і безперебійно працюючих сенсорів на квадратний кілометр, класичні сенсори з автономними джерелами живлення, складною електронікою та потребою в обслуговуванні стають непрактичними. Метаматеріальні сенсори [5] – зокрема, ті, що працюють у мікрохвильовому діапазоні – відкривають нові перспективи. Вони можуть здійснювати одночасно і сенсинг, і передачу інформації за допомогою зміни своїх електромагнітних характеристик (наприклад, коефіцієнта відбиття). Такі сенсори не потребують зовнішнього живлення, оскільки працюють як пасивні елементи, що модулюють відбитий сигнал залежно від умов навколишнього середовища.

У статті [6] запропонована концепція Meta-IoT системи – бездротової сенсорної мережі, побудованої на основі метаматеріалів, яка дозволяє одночасно здійснювати вимірювання фізичних параметрів середовища та передавати інформацію про них через зміну відбитого сигналу.

Сенсори Meta-IoT складаються з метаструктур (наприклад, split-ring resonators – SRR), об’єднаних з матеріалами, чутливими до температури або вологості.

Meta-IoT-сенсори не містять традиційних електронних передавачів: інформація зчитується через аналіз коефіцієнта відбиття, що змінюється під впливом температури, вологості, концентрації газів тощо. Для досягнення високої точності автори запропонували алгоритм спільної оптимізації геометрії сенсора і функції зчитування сигналу.

Meta-IoT сенсори встановлюються на поверхні, наприклад стіні; зчитування здійснюється за допомогою бездротового передавача/приймача. Алгоритм використовує модель відбиття з урахуванням паразитних ємностей, індуктивностей та властивостей чутливих матеріалів.

Було показано, що точність сенсорної системи покращується при оптимальному виборі геометрії (ширина щілин у SRR) та достатній потужності сигналу.

Зі зростанням потужності сигналу зменшується похибка вимірювання – особливо для оптимізованої структури.

Зі збільшенням відстані точність знижується. Це важливо враховувати при проектуванні мережі.

Метаматеріальні сенсори мають значний потенціал для IoT та 6G-комунікацій. Вони поєднують високу чутливість, пасивну роботу, мініатюризацію та здатність до масової інтеграції у великі бездротові системи. Стаття [6] демонструє, що використання таких структур у сенсорних мережах може суттєво підвищити ефективність, зменшити споживання енергії та забезпечити масштабованість майбутніх IoT-рішень.

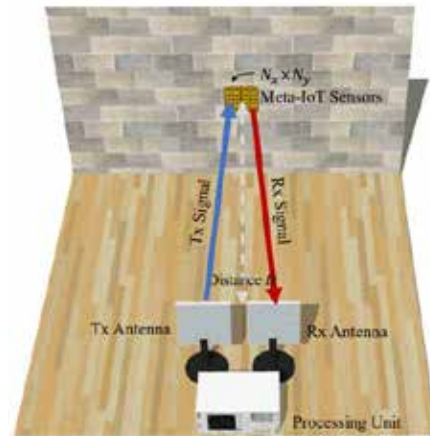


Рис. 2. Узагальнена схема Meta-IoT системи

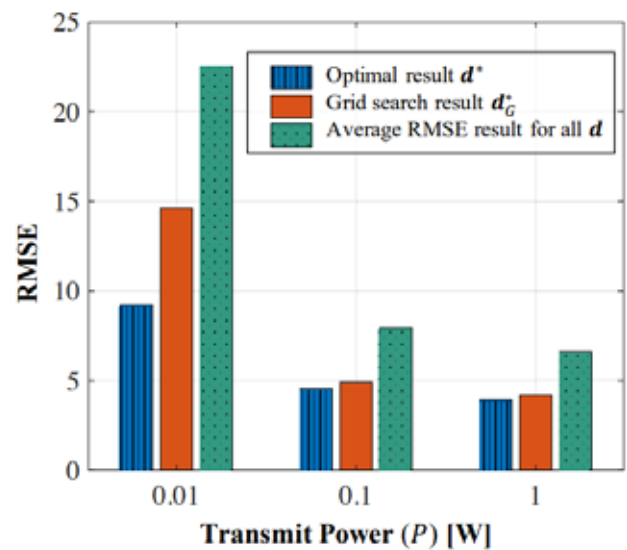


Рис. 3. Похибка (RMSE) залежно від потужності передавача

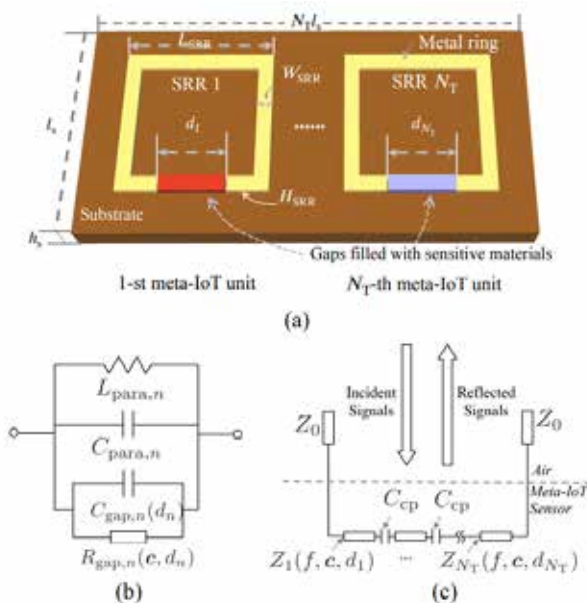


Рис. 1. (а) – конструкція з SRR на підкладці; (б) – еквівалентна RLC-схема елемента; (с) – загальна модель відбиття

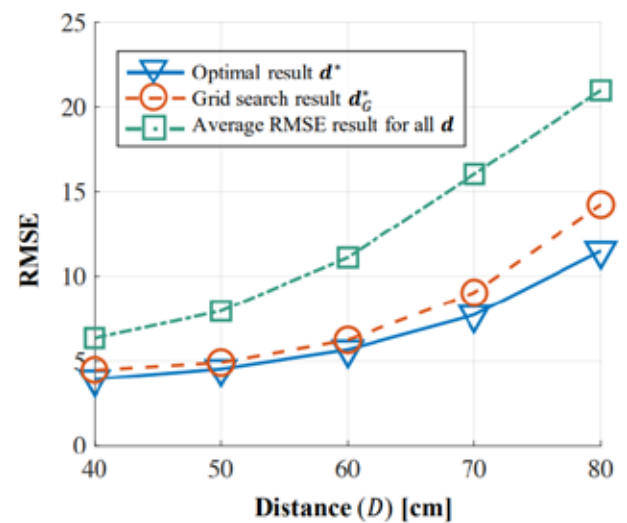


Рис. 4. Похибка (RMSE) залежно від відстані між передавачем і сенсором

### Типи метаматеріальних сенсорів

Метаматеріальні сенсори класифікуються за кількома критеріями: за типом резонансної структури, способом зчитування інформації, за діапазоном роботи та за способом взаємодії з навколишнім середовищем [7]. У цьому розділі наведено основні типи таких сенсорів, які застосовуються в мікрохвильовій сенсоріці, IoT та телекомунікаційних технологіях.

За конструкцією та принципом дії:

а) Сенсори на основі split-ring resonators (SRR)

SRR (кільцеві резонатори з розривом) є найбільш поширеним елементом у метаматеріальних сенсорах. Вони формують вузькосмуговий резонанс, який є надзвичайно чутливим до змін діелектричного середовища поблизу структури. Найчастіше використовуються для вимірювання вологості, температури, складу газів тощо [5].

б) Сенсори на основі електромагнітних поглиначів (Perfect Metamaterial Absorbers)

Ці сенсори мають повне поглинання мікрохвиль у резонансі. Зміна властивостей середовища призводить до зсуву частоти максимального поглинання, що використовується як інформативний параметр. Часто застосовуються в бездротових або чиплес-системах [8].

в) Електромагнітно-індуковані прозорі сенсори (EIT-type)

Імітують квантовий ефект електромагнітно індукованої прозорості. В таких структурах виникає вузька прозора смуга в межах ширшого поглинання завдяки інтерференції. Такі сенсори мають надвисоку добротність і придатні для надчутливих застосувань [10].

г) Мультирезонансні сенсори

Складаються з кількох різних метаструктур або каскадованих елементів, кожен з яких налаштований на власну резонансну частоту.

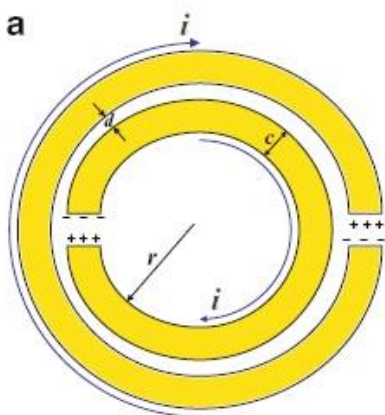


Рис. 5. Класичний SRR-елемент у метаматеріалі

Це дозволяє проводити одночасний моніторинг кількох параметрів – наприклад, температури та вологості [10].

За способом зчитування інформації:

а) Пасивні сенсори з відбиттям (Reflective sensing)

Найбільш перспективний клас для IoT. Не потребують живлення. Інформація зчитується з аналізу коефіцієнта відбиття від структури ( $S_{11}$  або  $S_{21}$  параметри), що змінюється залежно від навколишнього середовища [9].

б) Сенсори з інтегрованими чипами (Active or semi-passive)

Поєднують метаструктури з активними електронними компонентами: наприклад, діодами, сенсорними мікросхемами або мікроконтролерами. Використовуються в гібридних системах, де потрібна вища інтеграція з обчислювальними блоками [9].

За діапазоном частот:

- Мікрохвильові (GHz) – найпоширеніші, оптимальні для телекомунікацій та бездротових мереж.

- Терагерцові (THz) – перспективні для біомедичних застосувань, безконтактного сканування та хімічної спектроскопії.

- Оптичні метаматеріальні сенсори – працюють у видимому чи ближньому ІЧ-діапазоні, здебільшого використовуються в нанофотоніці.

За способом взаємодії із середовищем

- Контактні сенсори – матеріал або середовище безпосередньо розміщується на поверхні сенсора (наприклад, полімер, який поглинає вологу).

- Бездротові / безконтактні – зчитують зміни на відстані; використовуються для моніторингу поверхонь, конструкцій, стану середовища.

**Загальні принципи побудови метаматеріальних сенсорів**

Метаматеріальні сенсори ґрунтуються на принципах резонансної взаємодії електромагнітного поля з періодичними або квазіперіодичними структурами, здатними концентрувати та локалізувати енергію поля в малих об'ємах. Основним елементом таких сенсорів є резонатор (наприклад, split-ring resonator – SRR, complementary SRR, electric-LC, Jerusalem cross тощо), частота резонансу якого залежить від параметрів навколишнього середовища [7], [10].

#### 1. Основний принцип роботи

Коли електромагнітна хвиля взаємодіє з метаструктурою, у ній формується резонансна відповідь, що характеризується трьома головними параметрами:

1. **Резонансна частота ( $f_0$ )** – частота, на якій структура поглинає або відбиває максимум енергії. Будь-яка зміна діелектричної проникності ( $\epsilon$ ) або магнітної проникності ( $\mu$ ) поблизу структури змінює ефективні параметри її LC-ланцюга:  $f_0 = 1 / (2\pi\sqrt{LC})$ . Збільшення діелектричної сталої середовища (наприклад, при підвищенні вологості) збільшує ємність  $C$  і зменшує частоту резонансу  $f_0$  [8], [9].

2. **Добротність (Q-factor)** – показник енергетичних втрат у структурі. Вона зменшується, якщо в середовищі зростають втрати (наприклад, через появу поглинаючих частинок у газовій суміші) [6].

3. **Амплітуда ( $S_{11}$  або  $S_{21}$ )** – відображає інтенсивність взаємодії структури з сигналом. Зміна амплітуди може бути інформативною при деформаціях або при контакті сенсора з різними матеріалами [11], [12].

## 2. Приклади застосувань

1. Сенсор вологості – Збільшення вологості призводить до адсорбції водяної пари на чутливому шарі (наприклад, полімерному). Це підвищує діелектричну проникність середовища → ємність SRR зростає → резонансна частота зменшується.

2. Сенсор складу газу – Заміна газового середовища (наприклад, повітря →  $CO_2$  або  $CH_4$ ) змінює показник заломлення поблизу резонатора. Це спричиняє невелике зміщення частоти та зміни добротності.

3. Сенсор деформації або тиску – Якщо метаструктура розміщена на гнучкій підкладці, механічне розтягнення змінює геометричні параметри (розрив, радіус кільця), що впливає на індуктивність і ємність.

4. Біосенсорика – Прикріплення біомолекул до поверхні змінює локальну діелектричну постійну, що викликає зсув резонансної частоти або зміну глибини резонансного мінімуму.

## 3. Еквівалентна модель

Роботу метаматеріального сенсора часто описують як LC-резонатор, де:  $L$  – індуктивність провідних елементів (кілець, рамок),  $C$  – ємність між щілинами або елементами структури,  $R$  – ефективний опір, що описує втрати. Кожен параметр може змінюватися при впливі зовнішніх факторів (температури, вологості, тиску), що викликає зсув частоти, зміну добротності або амплітуди відбиття.

## 4. Методи зчитування інформації

- S-параметри ( $S_{11}$ ,  $S_{21}$ ) – вимірюються за допомогою векторного аналізатора мереж (VNA); зміна їх амплітудно-частотної характеристики є основним методом сенсингу [9], [10].

- Фазова характеристика – дає додаткову інформацію про втрати та швидкість зміни середовища [6].

- Радіочастотне зчитування – для IoT: резонансні піки кодують параметри або ідентифікаційні дані [12].

Мікрохвильові метаматеріальні сенсори використовують зміни електромагнітних властивостей середовища для перетворення фізичних або хімічних параметрів у зміну резонансної відповіді. Основні інформативні параметри: зсув резонансної частоти, зміна добротності та зміна амплітуди. Завдяки цим механізмам такі сенсори є високочутливими, пасивними та придатними для масового використання у телекомунікаційних і IoT-системах.

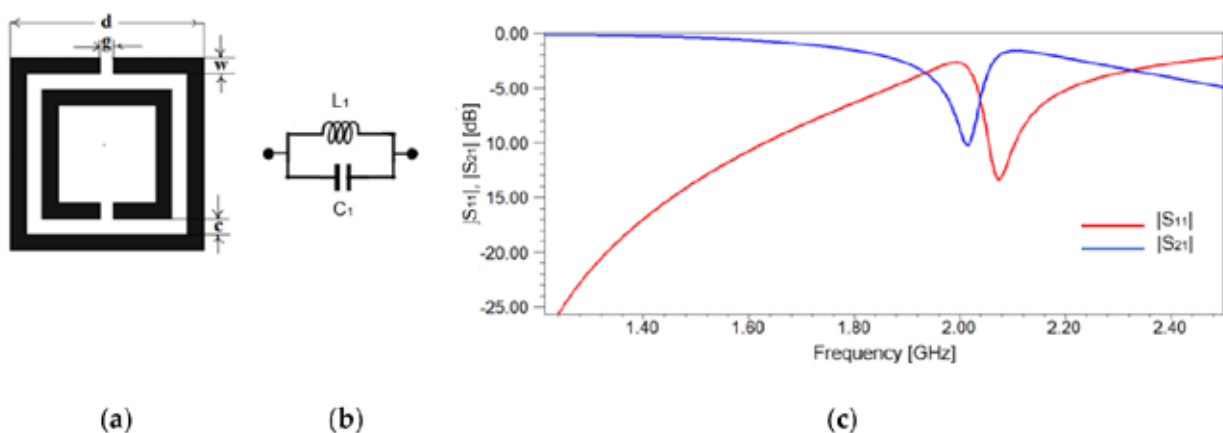


Рис. 6. SRR із вертикальними смужками, еквівалентна LC-схема, частотна характеристика ( $S_{21}$ , амплітуда та резонанси)

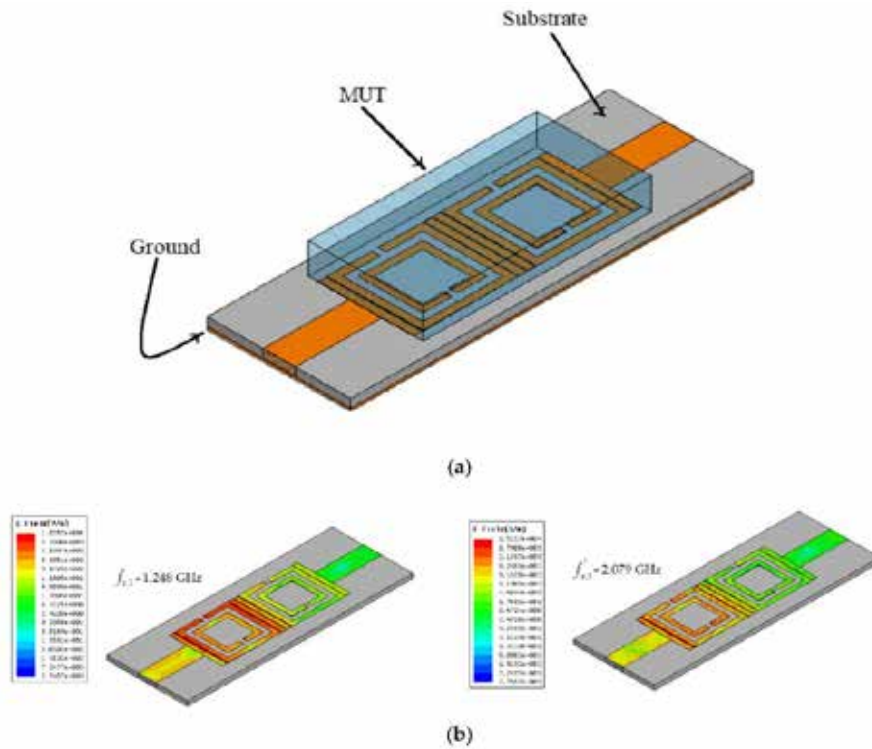


Рис. 7. Вид SRR + демонстрація спектральної відповіді при різному матеріалі підкладки (MUT)

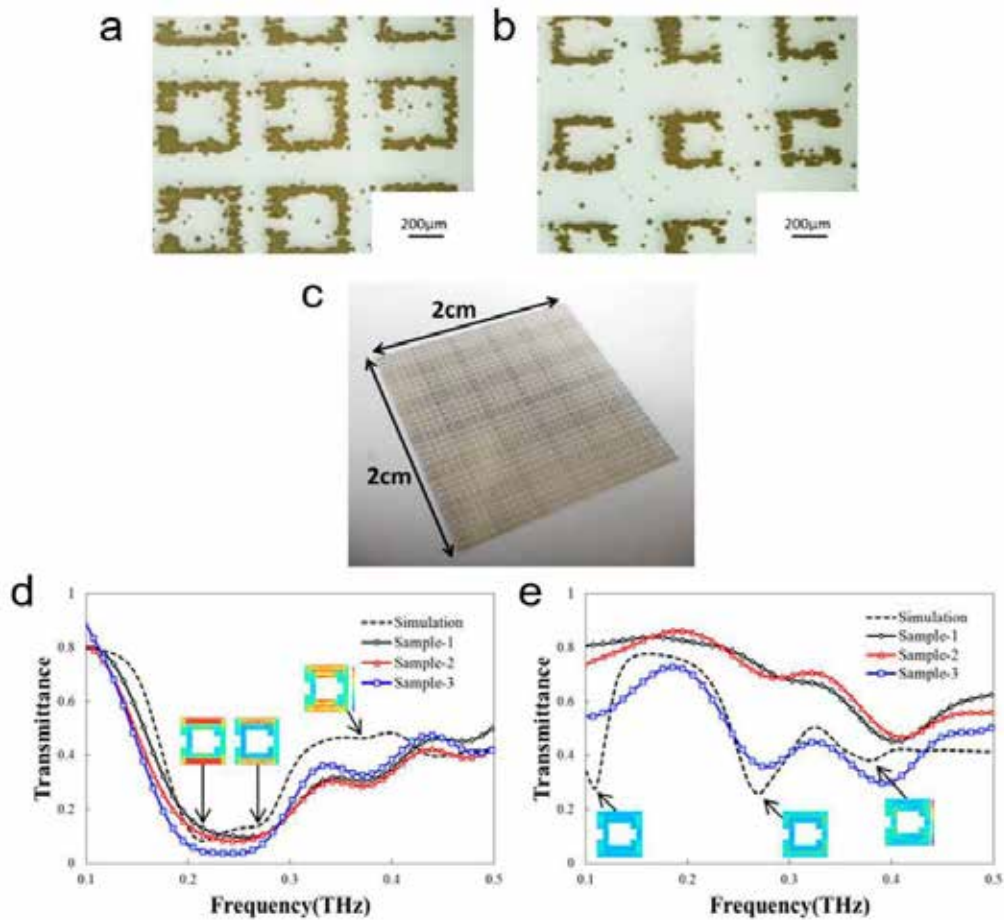


Рис. 8. Металповерхня + графіки / спектральні відповіді для різних зразків газу чи хімічних речовин

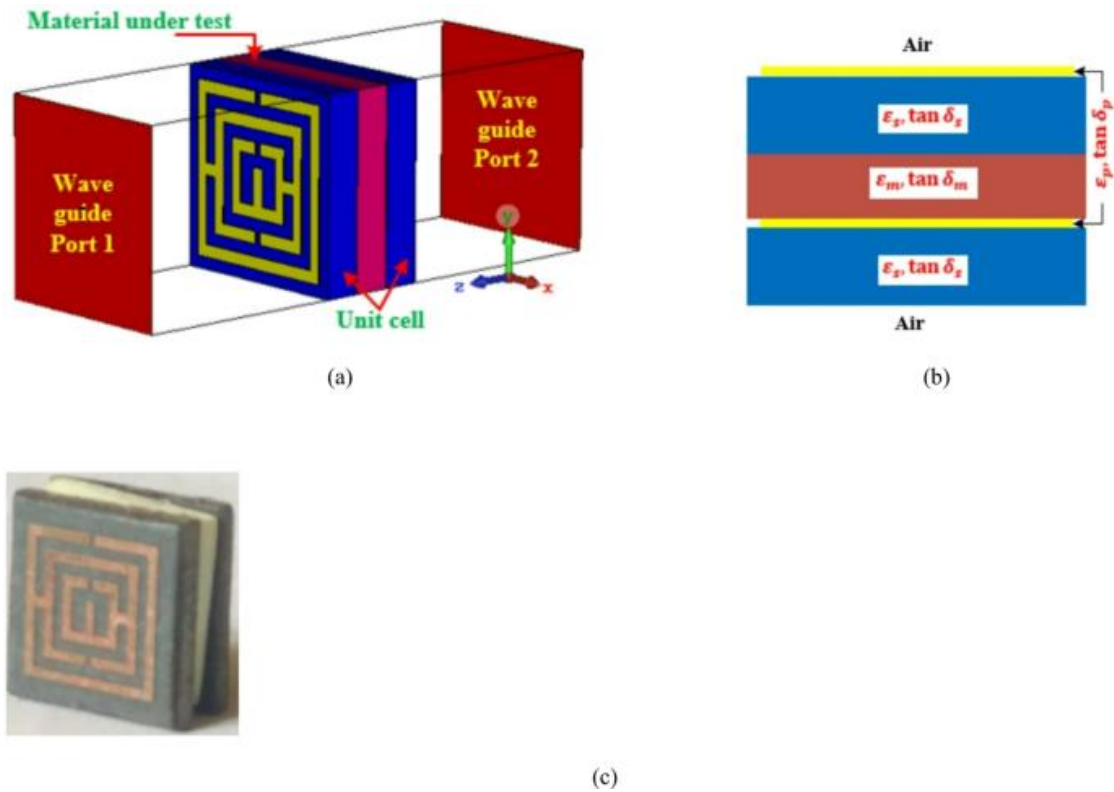


Рис. 9. Одиниця метатомірна комірка, декілька резонансних частот, вплив матеріалу підкладки

**Резонанс Фано та його варіанти – ЕШ та ефект Парсела**

Одним із найважливіших фізичних механізмів, що забезпечують високу чутливість метаматеріальних сенсорів, є резонанс Фано [13], [14]. Цей ефект проявляється в системах, де взаємодіють ширококутовий (світлий) та вузькокутовий (темний) резонансні стани. Інтерференція між ними призводить до утворення асиметричного резонансного профілю – на відміну від звичайного симетричного Лоренцового резонансу.

**1. Фізика резонансу Фано**

Резонанс Фано вперше описав Уго Фано (U. Fano) у 1961 році для квантових систем, але пізніше цей ефект був виявлений і в електромагнітних структурах – зокрема, у метаматеріалах [15]. У мікрохвильових сенсорах він виникає тоді, коли енергія хвилі одночасно збуджує: ширококутовий резонатор (наприклад, кільце або смугу), і вузький локалізований мод (наприклад, щілинну або паразитну комірку). В результаті формується інтерференційна картина – різкий «пік і провал» у спектрі коефіцієнта відбиття  $|S_{11}|$  або передавання  $|S_{21}|$ . Такі особливості надзвичайно чутливі до навіть незначних змін діелектричних властивостей середовища, що робить

Фано-резонанс ідеальним механізмом для сенсорики [14].

Переваги Фано-резонансних сенсорів:

- надвисока чутливість до зміни показника заломлення;
- можливість мультичастотного сенсингу;
- вузька лінія резонансу → велика добротність;
- висока роздільна здатність при бездротовому зчитуванні [14], [10].

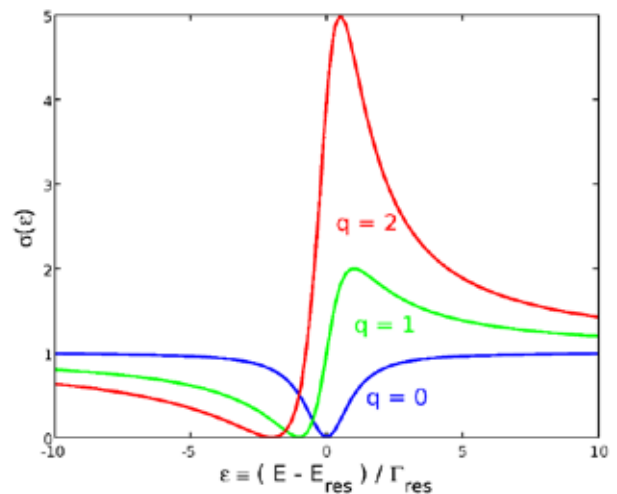


Рис. 10. Схематичне пояснення резонансу Фано

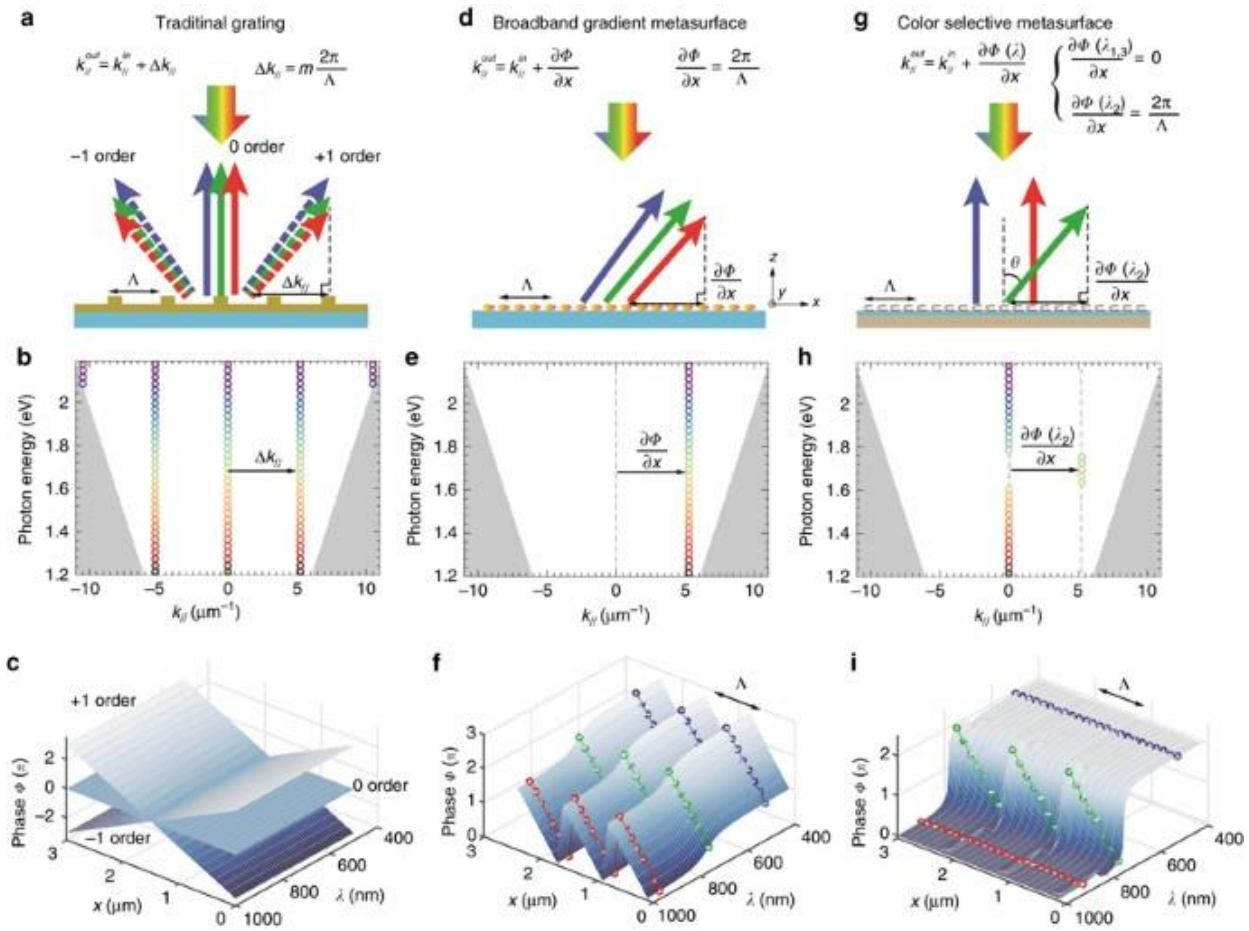


Рис. 11. Реалізація Фано-резонансу в метаматеріалі

**2. Електромагнітно індукована прозорість (ЕІТ)**

ЕІП (electromagnetically induced transparency) – це класичний аналог квантового ефекту, що виникає при взаємодії двох зв’язаних резонаторів (світлого та темного) [16], [17]. Його можна розглядати як окремий випадок резонансу Фано, коли інтерференція настільки сильна, що утворюється вузьке «вікно прозорості» в межах ширшої області поглинання.

У контексті метаматеріальних сенсорів ЕІП-структури дозволяють:

- отримати надвисоку добротність ( $Q > 1000$ ) [16],
- реалізувати точне відстеження зсувів резонансної частоти,
- зменшити вплив втрат і шумів, що особливо важливо для бездротових вимірювань.

Приклад:

Два з’єднані SRR-резонатори – один збуджується зовнішнім полем (світлий), інший – лише через зв’язок (темний) [17]. Коли їх частоти збігаються, у спектрі з’являється вузька «прозора»

смуга – сигнал проходить без втрат. Навіть мінімальна зміна середовища (волога, температура, біомолекули) зміщує цей вузький резонанс, що легко виявляється при зчитуванні.

**3. Ефект Парселла**

Ефект Парселла (Purcell effect) пов’язаний зі зміною швидкості спонтанного випромінювання частинки або диполя, розміщеного в резонаторі [18]. Його відкрив Едвард Парсел у 1946 році. У метаматеріальних сенсорах цей ефект інтерпретується як підсилення локального електромагнітного поля всередині резонансної структури, що безпосередньо підвищує чутливість системи. Фактор Парселла визначається як:

$$Fp = \frac{3}{4\pi^2} \left( \frac{\lambda}{n} \right)^3 \frac{Q}{V}$$

де:

- Q – добротність резонатора,
- V – об’єм моди (зона локалізації поля),
- $\lambda/n$  – ефективна довжина хвилі в середовищі.

Чим менше об’єм V і більше Q, тим сильніше підсилення. Таким чином, сенсор з високою

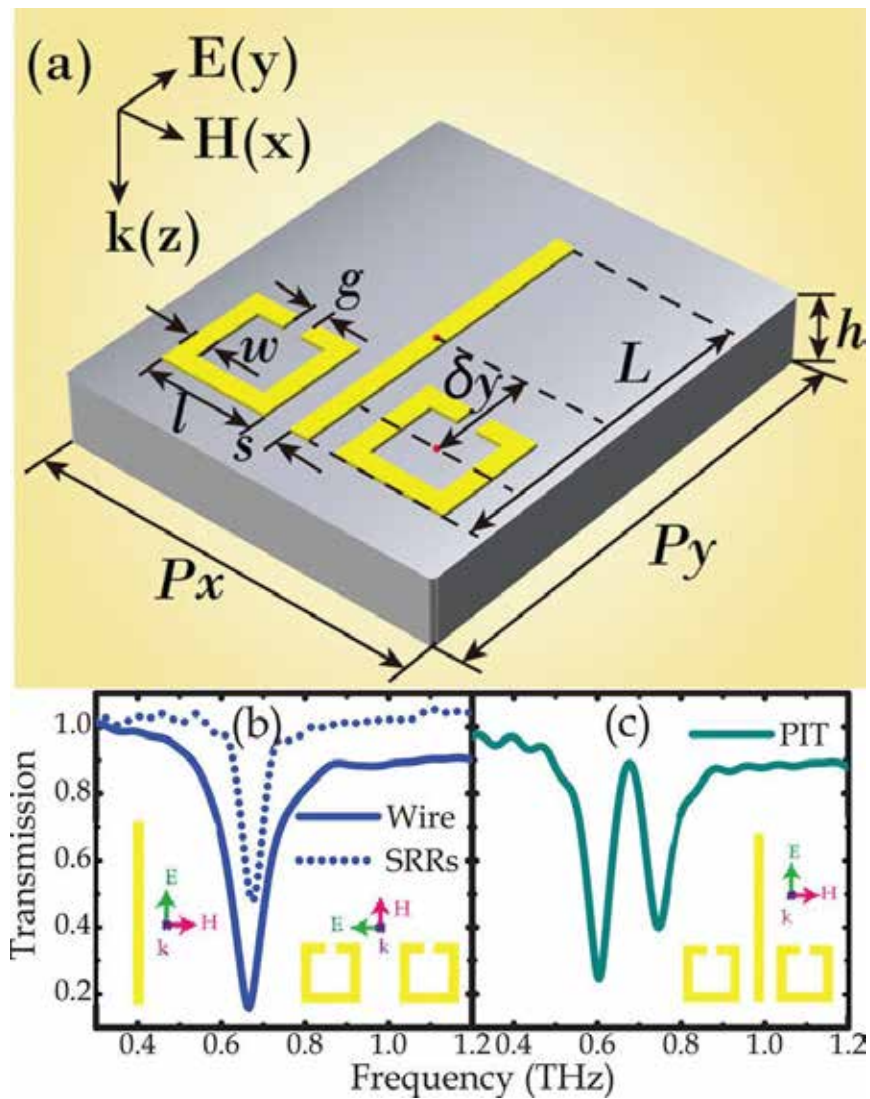


Рис. 12. Електромагнітно індукована прозорість (ЕІТ)

добротністю та щільною локалізацією поля здатен реєструвати надзвичайно малі зміни властивостей середовища [19].

#### 4. Порівняння ефектів

Ефект	Фізична природа	Основна особливість	Застосування в сенсорах
Фано	Інтерференція широкої та вузької мод	Асиметричний резонанс, висока чутливість	Сенсори показника заломлення, газу, вологості
ЕІТ	Класичний аналог квантової прозорості	Вузьке «вікно» прозорості, висока добротність	Прецизійні сенсори для IoT
Парсела	Підсилення локального випромінювання	Посилення сигналу в резонаторі	Підвищення чутливості, біосенсори

#### 5. Роль інтерференційних ефектів у підвищенні чутливості сенсорів

Інтерференційні ефекти, такі як резонанс Фано, електромагнітно індукована прозорість (ЕІТ) та ефект Парсела, суттєво підвищують ефективність метаматеріальних сенсорів. Фано-резонанс забезпечує асиметричну форму спектра, де навіть мінімальні зміни навколишнього середовища спричиняють помітний зсув резонансної частоти. ЕІТ-структури дозволяють реалізувати вузьке «вікно прозорості» з високою добротністю, що збільшує роздільну здатність вимірювань. Ефект Парсела, у свою чергу, підсилює локальне електромагнітне поле та покращує взаємодію сенсорної структури з досліджуванним середовищем.

Комбінація цих трьох механізмів створює базу для високочутливих, енергоефективних і мініатюрних мікрохвильових сенсорів, придатних для застосування в системах Інтернету речей (IoT),

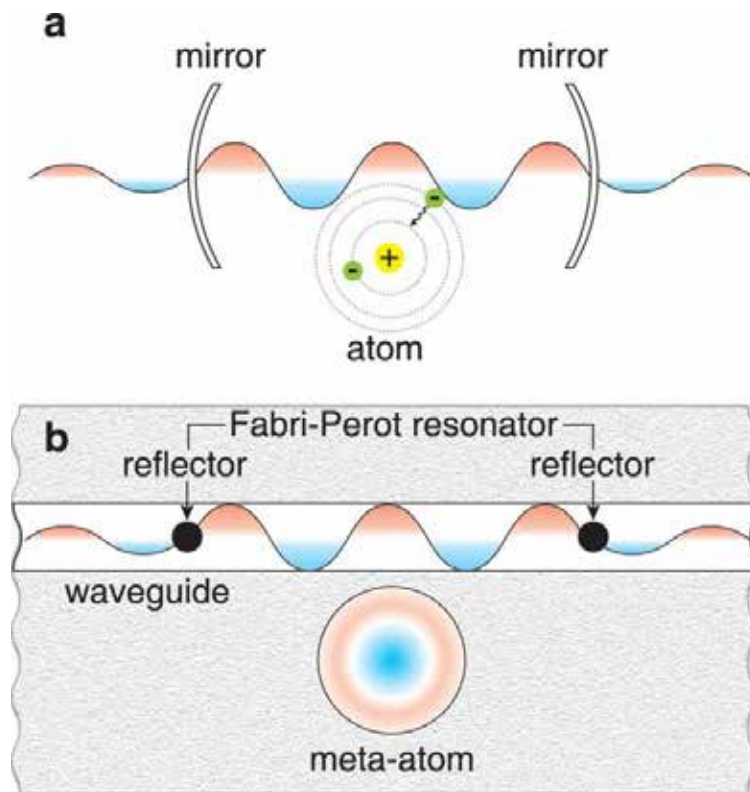


Рис. 13. Ефект Парсела

біомоніторингу та телекомунікаційних платформах 6G.

Отже, резонанс Фано та його варіанти – ЕП і ефект Парсела – формують фізичну основу високочутливих метаматеріальних сенсорів. Вони забезпечують інтерференційне посилення, локалізацію поля та зменшення втрат, що дозволяє досягти високої роздільної здатності навіть при мінімальних змінах середовища. Саме ці ефекти є ключем до розвитку нового покоління мікрохвильових і оптичних сенсорів для Інтернету речей та телекомунікацій.

#### Мостові схеми побудови сенсорів

Мостові вимірювальні схеми є одним із найефективніших способів реєстрації малих змін електромагнітних параметрів у мікрохвильових сенсорах [20], [21]. Вони дозволяють порівнювати сигнал двох або більше гілок, забезпечуючи високу чутливість, компенсацію шумів та стабільність вимірювання в реальному часі. У комбінації з резонансними елементами метаматеріалів такі схеми забезпечують точне визначення зсуву резонансної частоти, зміни амплітуди, добротності та фазових характеристик [22].

#### 1. Принцип роботи мостової вимірювальної схеми

Класичний міст складається з чотирьох гілок, сигнал на яких порівнюється. Баланс мосту дося-

гається тоді, коли різниця сигналів між плечима приблизно дорівнює нулю.

Мікрохвильовий сенсор на метаматеріальній основі в такій схемі вводиться в одну з гілок (активну), а еталонний резонатор – у іншу (компенсаційну).

Чому міст такий чутливий?

- У точці балансу навіть дуже малий зсув резонансної частоти викликає істотну зміну амплітуди або фази вихідного сигналу.
- Це дозволяє детектувати зміни порядку  $10^{-4}$ – $10^{-6}$  у діелектричній проникності досліджуваного середовища.
- Міст автоматично компенсує флуктуації джерела сигналу, нестабільність генератора та температурні зміни.

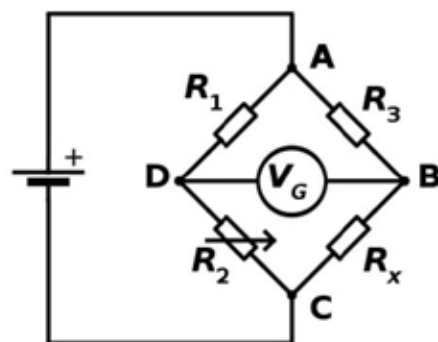


Рис. 14. Мостова схема

## 2. Мостові схеми з метаматеріальними резонаторами

У мікрохвильових сенсорах мостова схема, як правило, реалізується за допомогою:

- двох ідентичних резонаторів на основі SRR/CSRR (один – сенсорний, інший – еталон) [10], [23],
- або одного резонатора і однієї узгодженої лінії передачі,
- або двох гілок метаповерхні з різною чутливістю.

При зміні середовища (вологість, газ, біопро-теїн, механічне напруження):

- резонанс у сенсорному елементі зміщується;
- резонанс в еталонному залишається незмінним;
- це створює розбаланс мосту, який фіксується вимірювальною апаратурою [24].

Такі схеми суттєво підвищують точність і роздільну здатність, оскільки зміна реєструється не за абсолютним значенням параметра, а за різницею між двома гілками, що знижує вплив шумів та дрейфу.

## 3. Посадження мостових схем із резонансом Фано

Резонанс Фано формує асиметричну частотну характеристику, надзвичайно чутливу до зміни властивостей середовища [14], [25].

Коли Фано-резонатор стає частиною мостової схеми, виникає подвійний ефект посилення чутливості:

1. Інтерференційна асиметрія (вузький + широкий резонанс) підсилює реакцію на зовнішні зміни.

2. Баланс мосту переводить систему в режим, де навіть мінімальна зміна амплітуди/фази дає потужний вихідний сигнал.

Загальний результат:

1. зміна резонансної частоти стає більш вираженою,
2. асиметрія Фано-профілю підкреслюється,
3. точність сенсора зростає до рівня високо-чутливих лабораторних систем,
4. а конструкція залишається компактною та придатною для IoT.

## 4. Переваги мостових схем у мікрохвильових сенсорах

Технічні переваги:

- Надвисока чутливість (до 10–100 разів вище, ніж без моста) [26].
- Добра стійкість до шумів та температурних флуктуацій.

- Можливість безперервного моніторингу.
  - Легке узгодження з бездротовими передавачами IoT.
  - Можливість інженерного налаштування (змінне співвідношення плечей).
- Функціональні переваги:
- Частотні, фазові та амплітудні вимірювання в одному модулі.
  - Висока точність при низькому енергоспоживанні.
  - Підтримка мультирезонансних структур (SRR, CSRR, EIT-комірки, Фано-метаповерхні).

## 5. Типові застосування мостових мікрохвильових сенсорів

- Вимірювання вологості матеріалів (будівельні, текстиль, ґрунт).
- Газові сенсори (виявлення CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, летких органічних сполук).
- Біосенсори (виявлення білків, глюкози, вірусних маркерів).
- Сенсори напруження та деформації (композитні матеріали, 3D-структури).
- IoT-платформи моніторингу середовища (розумне місто, агротех).

### Проектування та практична реалізація

У цьому розділі наведемо кілька прикладів мікрохвильових сенсорних та резонансних елементів, які були нами розроблені та експериментально досліджені в попередніх роботах. Частина цих структур уже опублікована у відкритих наукових виданнях та патентних описах. Кожна з конструкцій демонструє характерні резонансні ефекти – зокрема електромагнітно індуквану прозорість (EIT) [27] та асиметричний резонанс Фано, що дозволяє суттєво підвищити чутливість і селективність сенсорних пристроїв. У подальших підпунктах наведено короткий опис геометрії, принципу роботи та основні експериментальні характеристики для однієї або кількох таких структур. Для однієї з конструкцій також продемонстровано результати моделювання, виконаного за допомогою власних програмних засобів, а також порівняння з експериментальними даними.

У одній роботі була запропонована цікава й доволі незвична комбінація двох різних типів резонаторів [27], [29]. Було взято звичайний мікросмушковий кільцевий резонатор – компактний, плоский, простий у виготовленні. А поруч розміщено циліндричний об'ємний діелектричний резонатор із дуже високим Q-фактором. Зазвичай такі елементи не поєднують, але саме взаємодія їхніх мод дала нам змогу отримати ефекти EIT та Фано у мікрохвильовому діапазоні.

Ідея проста:

Мікросмушковий кільцевий резонатор сам по собі має відносно широку резонансну криву, тоді як діелектричний резонатор дає дуже вузький пік. Коли ці два елементи змушені працювати на близьких частотах, їхні моди починають «перемовлятися» – і спектр перетворюється на класичний профіль ЕІТ: між двома провалами виникає вузьке «вікно прозорості», де передача раптово зростає. У іншій конфігурації було отримано асиметричний резонанс Фано, коли широка і вузька мода накладаються так, що утворюється різкий спад і хвіст – тобто характерний викривлений профіль.

У роботі показано, що:

- діелектричний резонатор працює на частоті  $\sim 5.14$  ГГц і має дуже високий  $Q$  (понад 2000),
- мікросмушковий кільцевий резонатор має другу гармоніку, яка якраз і взаємодіє з модою об'ємного резонатора,
- коли вони включені разом, спектр  $S_{21}$  змінюється дуже радикально:
  - о з'являється глибока вузька режекторна смуга (Фано),
  - о або чітке вікно прозорості між двома провалами (ЕІТ).

Фактично, було продемонстровано, що можна створювати малогабаритні високоселективні фільтри та сенсори, керуючи лише простим взаємним розташуванням двох резонаторів [14], [22]. Такі структури чудово працюють і як елементи сенсорів (оскільки високий  $Q$  підсилює чутливість), і як будівельні блоки для метаматеріальних фільтрів. Побудовані експериментальні прото-

типи показали хорошу відповідність із симуляціями, а ефекти ЕІТ та Фано спостерігалися дуже стабільно, що дозволяє застосовувати такі структури в практичних сенсорних і телекомунікаційних системах.

Друга робота присвячена створенню мікросмушкового режекторного фільтра, який базується на комірці метаматеріалу з вираженими властивостями глибокого загасання у вузькій смузі частот, аналогічний схожого типу фільтрам [30-32].

Мікросмушковий режекторний фільтр (фіг. 16) містить основну лінію передачі, що виконує функцію передавання електромагнітного сигналу, по обидва боки від лінії передачі та паралельно їй розташовано короткий півхвильовий резонатор із заклепками для створення короткого замикання та короткий півхвильовий резонатор. При цьому лінія передачі та обидва резонатори розташовані на діелектричній підкладці, що служить основною конструкції. Також, резонатор із заклепками та другий резонатор електромагнітно зв'язані з лінією передачі і та не зв'язані між собою.

У конструкції застосовано модифіковану комірку, геометрія якої підібрана так, щоб забезпечити глибокий режекторний режим без помітного впливу на сусідні частоти та без збільшення габаритів фільтра. Результати моделювання характеристик режекторного фільтра представлені на фіг. 17.

Окремо підкреслимо, що подібні елементи можуть застосовуватися як у режимі фільтрів, так і в режимі сенсорних комірок, оскільки зміни діелектричних властивостей навколишнього середовища впливають на резонансну частоту та глибину “провалу”.

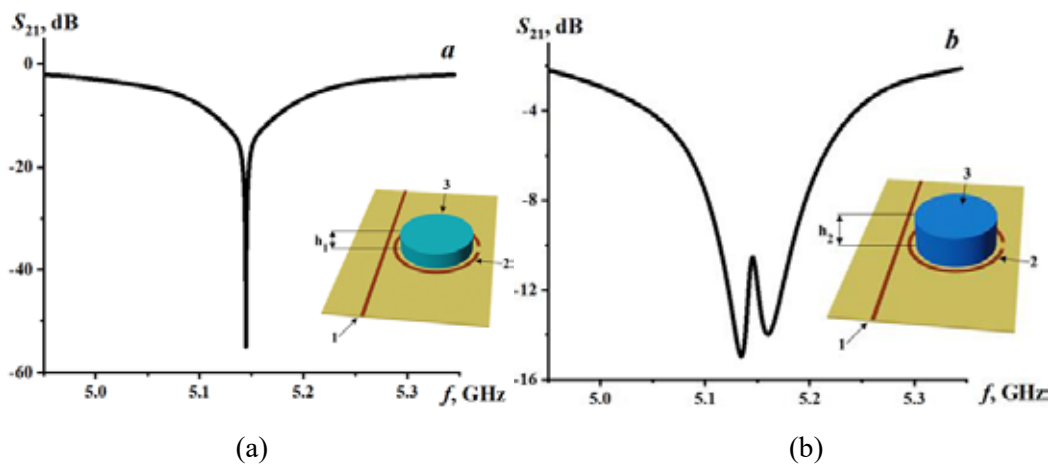


Рис. 15. Спектри передачі заявленого бар'єрного фільтра при реалізації резонансу Фано (а) та бар'єрного фільтра з індукованим вікном прозорості (б). На вставках зображено вигляд заявленого фільтра, що містить лінію передачі (1), мікросмушковий резонатор (2) та тривимірний циліндричний діелектричний резонатор (3) з висотою  $h_1$  (а) та  $h_2$  (б)

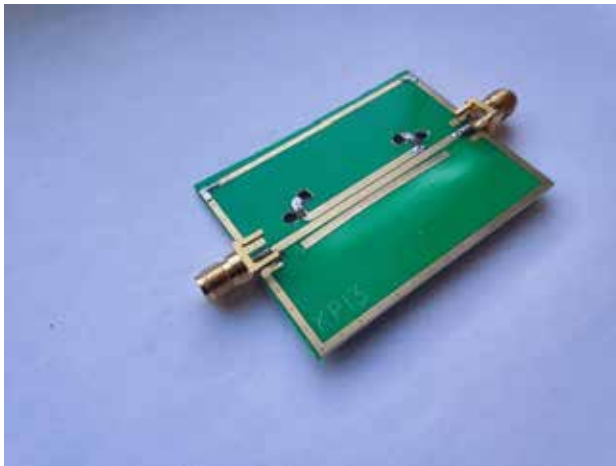


Рис. 16. Фото мікросмужкового режекторного фільтру

Такі структури є перспективними для малогабаритних телекомунікаційних пристроїв, адаптивних фільтрів і мікрохвильових сенсорів.

**Висновки.** Мікрохвильові сенсори на основі метаматеріальних комірок демонструють унікальні властивості, що вирізняють їх серед традиційних резонансних структур і роблять перспективними для сучасних телекомунікаційних систем та технологій Інтернету речей (IoT). Їхня поява стала можливою завдяки розвитку метаматеріалів на початку 2000-х років, коли було показано, що штучно створені резонансні елементи

можуть формувати електромагнітні характеристики, недосяжні в природних матеріалах.

У статті було розглянуто основні типи метаматеріальних сенсорів – SRR/CSRR-структури, комбіновані та гібридні резонатори, а також 3D-діелектричні елементи. Показано, що чутливість таких систем зумовлена значною локалізацією електромагнітного поля та залежністю резонансних характеристик від навколишнього середовища. Метаматеріальні сенсори дозволяють фіксувати зсув резонансної частоти, зміну добротності та амплітуди, що робить їх придатними для контролю вологості, деформацій, концентрації газів, біологічних зразків та інших фізико-хімічних параметрів.

Особливу увагу приділено інтерференційним ефектам, таким як резонанс Фано, електромагнітно індукованій прозорості (ЕІТ) та ефекту Парселла. Ці явища забезпечують формування вузьких, асиметричних та надзвичайно чутливих спектральних особливостей, які значно підвищують роздільну здатність сенсорів. Додаткове застосування мостових схем дозволяє ще сильніше підсилити ці ефекти, розширити динамічний діапазон і підвищити точність вимірювань у реальному часі.

У практичній частині наведено приклади двох власних експериментальних конструкцій, розроблених авторами. Перша структура – моди-

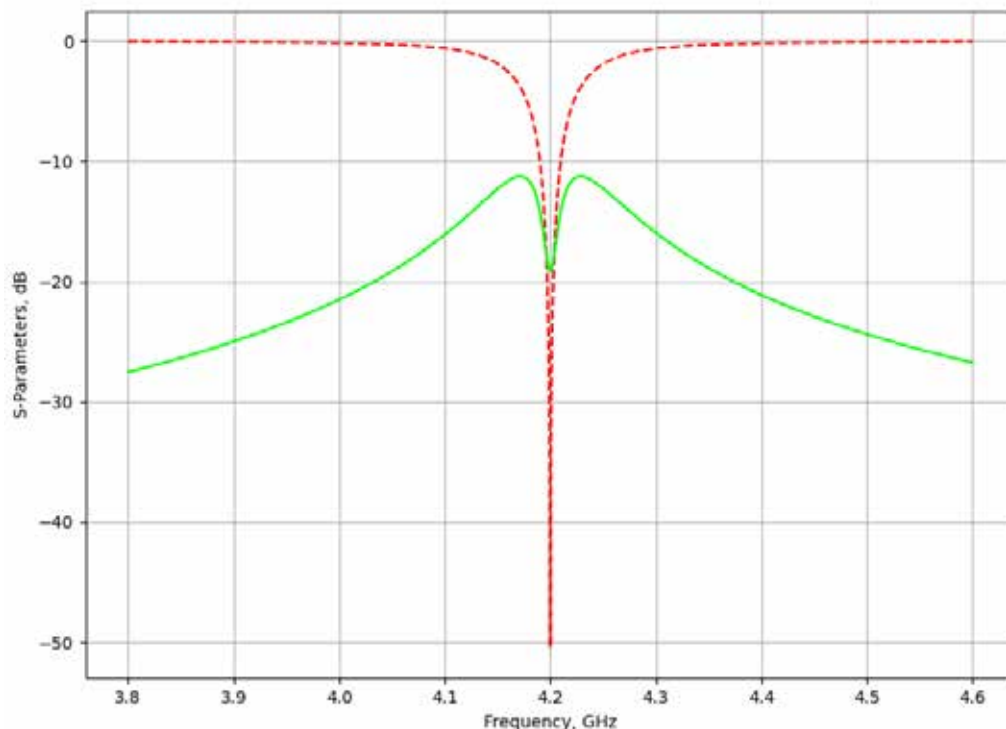


Рис. 17. Результати моделювання характеристик режекторного фільтру, S11 – зелена крива, S21 – червона

фікований SRR-резонатор з ЕІТ-вікном – демонструє керовану інтерференційну взаємодію кількох резонансних мод і формування “прозорості” в діапазоні СВЧ. Друга конструкція – мікросмушковий режекторний фільтр на основі метаматеріальної комірки – забезпечує глибоке локальне загасання з високою добротністю. Показано як експериментальні, так і розрахункові характеристики, що підтверджують можливість точного налаштування резонансної частоти та форми спектра.

Сукупно отримані результати підтверджують, що метаматеріальні сенсори є надзвичайно перспективною платформою для нових поколінь телекомунікаційних систем та IoT-пристроїв. Їх компактність, висока чутливість, можливість інтеграції в друковані плати та адаптації під масове виробництво роблять такі структури природним вибором для майбутніх мереж 5G/6G, систем моніторингу довкілля, біомедичних сенсорів та “розумної” інфраструктури.

Метаматеріальні комірки дозволяють створювати сенсорні системи нового класу – мінімальні за розмірами, але максимальні за функціональністю, що є ключовим фактором у розвитку IoT та телекомунікацій наступного покоління.

Метаматеріальні мікрохвильові сенсори мають ключове значення для розвитку сучасних телекомунікацій та Інтернету речей (IoT).

Їхня компактність і можливість інтеграції в друковані плати дозволяють розміщувати сен-

сорні модулі безпосередньо в елементах телекомунікаційного обладнання – антенах, фільтрах, малопотужних передавачах, модулях 5G/6G та пристроях ближнього радіозв’язку (NFC, RFID, Wi-Fi HaLow).

Висока чутливість до локальних змін параметрів середовища забезпечує нові можливості для безперервного моніторингу параметрів конструкцій, компонентів мережі, віддалених об’єктів, біологічних та технічних систем.

Метаматеріальні резонатори здатні працювати як пасивні сенсорні вузли, що не потребують живлення, або як частина енергоефективних телеметричних модулів.

Завдяки інтерференційним ефектам (Фано, ЕІТ), вони забезпечують вузькі спектральні особливості, які критично важливі для високоточних систем: від адаптивних фільтрів до вузлів вимірювання параметрів сигналів у мережах надвисокої щільності. Таким чином, метаматеріальні сенсори не лише розширюють традиційні можливості СВЧ-технологій, але й формують фундамент для майбутніх архітектур IoT і телекомунікацій наступного покоління.

**Подяка.** Робота проведена при підтримці Swedish Foundation for Strategic Research within the framework of SSF Project “Electromagnetic metamaterials for communications and sensing” (ID UKR24 0008) та NATO project SPS G6002 – «3D Metamaterials for Energy Harvesting and Electromagnetic Sens-ing».

#### Список літератури:

1. Pendry J. B. Negative refraction makes a perfect lens. *Physical Review Letters*. 2000. Vol. 85, No. 18. P. 3966. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.3966>
2. Smith D. R., Pendry J. B., Wiltshire M. C. K. Metamaterials and negative refractive index. *Science*. 2004. Vol. 305, No. 5685. P. 788–792. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1096796>
3. Shelby R. A., Smith D. R., Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction. *Science*. 2001. Vol. 292, No. 5514. P. 77–79. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1058847>
4. Schurig D., Mock J. J., Justice B. J., Cummer S. A., Pendry J. B., Starr A. F., Smith D. R. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies. *Science*. 2006. Vol. 314, No. 5801. P. 977–980. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1133628>
5. Vena A., Sydänheimo L., Tentzeris M. M., Ukkonen L. A fully inkjet-printed wireless and chipless sensor for CO<sub>2</sub> and temperature detection. *IEEE Sensors Journal*. 2015. Vol. 15, No. 1. P. 89–99. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2341263>
6. Hu J., Zhang H., Di B., Bian K., Song L. Meta-material Sensors based Internet of Things for 6G Communications. *arXiv preprint*. 2021. arXiv:2107.01432.
7. Chen H.-T., Taylor A. J., Yu N. A review of metasurfaces: physics and applications. *Reports on Progress in Physics*. 2016. Vol. 79, No. 7. 076401. DOI: <https://doi.org/10.1088/0034-4885/79/7/076401>
8. Ni B., Wang Z., Zhao R. et al. Humidity sensor based on perfect metamaterial absorber. *Proceedings of the International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices*. 2016.
9. Dong L., Wang L., Huang Q. Applying metamaterial-based repeater in LC passive wireless sensors to enhance readout. *IEEE Sensors Journal*. 2018. Vol. 18, No. 5. P. 1755–1760. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2787748>

10. Al-Gburi A. J., Hashim U., Mahdi M. A. Multiband metamaterial-based sensors: A review. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 5. P. 1845. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22051845>
11. Shafique M. F., Rehman M. Z. U., Malik A. Flexible metamaterial strain sensor for structural health monitoring. *Sensors*. 2020. Vol. 20, No. 8. P. 2288. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20082288>
12. Lee H., Lim S., Park S. Metamaterial biosensors for detection of biomolecules: A review. *Biosensors*. 2022. Vol. 12, No. 6. P. 633. DOI: <https://doi.org/10.3390/bios12060633>
13. Fano U. Effects of configuration interaction on intensities and phase shifts. *Physical Review*. 1961. Vol. 124, No. 6. P. 1866–1878. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.124.1866>
14. Luk'yanchuk B., Zheludev N. I., Maier S. A. et al. The Fano resonance in plasmonic nanostructures and metamaterials. *Nature Materials*. 2010. Vol. 9. P. 707–715. DOI: <https://doi.org/10.1038/nmat2810>
15. Hao F., Sonnefraud Y., Van Dorpe P., Maier S. A. Strong interaction between localized plasmon resonances and surface plasmon polaritons. *Nano Letters*. 2011. Vol. 11, No. 2. P. 737–742. DOI: <https://doi.org/10.1021/nl103266y>
16. Zhang S., Genov D. A., Wang Y., Liu M., Zhang X. Plasmon-induced transparency in metamaterials. *Physical Review Letters*. 2008. Vol. 101, No. 4. 047401. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.047401>
17. Tassin P., Zhang L., Koschny T., Economou E. N., Soukoulis C. M. Planar designs for electromagnetically induced transparency in metamaterials. *Optics Express*. 2012. Vol. 20, No. 22. P. 24571–24583. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.20.024571>
18. Purcell E. M. Spontaneous emission probabilities at radio frequencies. *Physical Review*. 1946. Vol. 69. P. 681. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.69.681>
19. Pelton M. Modified spontaneous emission in nanophotonic structures. *Nature Photonics*. 2015. Vol. 9. P. 427–435. DOI: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2015.103>
20. Pozar D. M. *Microwave Engineering*. 4th ed. Hoboken: Wiley, 2011. 732 p.
21. Collin R. E. *Foundations for Microwave Engineering*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2001. 944 p.
22. Chen T., Li S., Sun H. Metamaterials application in sensing. *Electronics*. 2018. Vol. 7, No. 10. P. 1–24. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics7100238>
23. Lee H. J., Son H. Microwave resonator sensors for detection of small dielectric changes. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2015. Vol. 228. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.02.021>
24. Mandal D., Ghosh A., Ghatak R. Differential microwave sensors using resonator pairs. *IEEE Sensors Journal*. 2018. Vol. 18, No. 22. P. 9212–9220. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2871364>
25. Liao S., Zhang J., Wang L. et al. High-sensitivity Fano-resonance metamaterial sensors. *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40307-0>
26. Reuven R., Kaplan G., Carmon Y. Differential microwave bridge circuits for precision sensing. *Measurement Science and Technology*. 2018. Vol. 29, No. 10. 105104. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aad9e6>
27. Abi-Salloum T. Y. Electromagnetically induced transparency and Autler–Townes splitting: Two similar but distinct phenomena in two categories of three-level atomic systems. *Physical Review A*. 2010. Vol. 81, No. 5. 053836. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.81.053836>
28. Ilchenko M., Zhivkov A. Bridge equivalent circuits for microwave filters and Fano resonance. In: *Advances in Information and Communication Technologies*. Springer, 2019. P. 278–298.
29. Papasimakis N., Fedotov V. A., Zheludev N. I., Prosvirnin S. L. Metamaterial analog of electromagnetically induced transparency. *Physical Review Letters*. 2008. Vol. 101, No. 25. 253903. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.253903>
30. М. Е. Ільченко, А. П. Живков, А. Г. Витюк. Режекторний фільтр СВЧ (Режекторний фільтр СВЧ), Авторське свідоцтво № SU1529321A1. Бюл. № 46, 1989.
31. A. Zhivkov, M. Ilchenko, O. Fedorchuk, O. Vyunov, T. Plutenko, A. Belous. Modified Split-Ring Resonator with Electromagnetically Induced Transparency (Модифікований резонатор із розділеним кільцем з електромагнітно індукованою прозорістю), *Research & Development in Material Science*. Published: July 28, 2022.
32. А. Г. Витюк, А. Г. Войтенко, А. П. Живков, М. Е. Ільченко, Т. Н. Наритник, В. І. Приймак. Режекторний СВЧ-фільтр (Режекторний СВЧ-фільтр). Авторське свідоцтво № SU1739408A1. Бюл. № 21, 1992.

### Halytskyi I.I., Zhivkov O.P. MICROWAVE SENSORS BASED ON METAMATERIAL CELLS

*The article discusses modern approaches to the creation of microwave sensors based on metamaterial cells. Due to their unique electromagnetic properties that are not found in natural materials, metamaterials open up new opportunities in the field of highly sensitive sensors. Particular attention is paid to the application of such sensors in the Internet of Things (IoT), telecommunication systems, wireless monitoring and spectroscopy. The paper also highlights the physical principles of sensor construction, types of structures, as well as effects that*

increase sensitivity – in particular, Fano resonance, electromagnetically induced transparency and the Purcell effect. The history of the development of the metamaterial concept and its evolution in the context of sensor applications is presented.

A separate section is devoted to the classification of metamaterial sensors by design features, method of reading information, operating frequency range and nature of interaction with the studied environment. Sensors based on split-ring resonators, electromagnetic absorbers, EIT and Fano structures, as well as multi-resonant and passive wireless sensor systems are considered. The general principles of their operation are analyzed using equivalent LC models and S-matrix parameters.

Considerable attention is paid to the use of interference effects and bridge measurement circuits, which allow to significantly increase the resolution and stability of sensor measurements, reduce the influence of noise and temperature drift. Examples of practical implementation of microwave resonant and sensor structures are given, in which the Fano effects and electromagnetically induced transparency are experimentally demonstrated. It is shown that the proposed approaches are promising for creating compact, energy-efficient and highly sensitive sensors of a new generation for telecommunications and IoT platforms.

**Keywords:** metamaterials, microwave sensors, split-ring resonator (SRR), complementary split-ring resonator (CSRR), interference resonances, Fano resonance, electromagnetically induced transparency (EIT), Purcell effect, microstrip structures, bridge measurement circuits, Internet of Things (IoT), telecommunications, microwave filters, high-sensitivity sensors.

Дата першого надходження статті до видання: 06.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.01.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026