

УДК 621.372

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/14>**Шевцов К.О.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Живков О.П.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МІКРОХВИЛЬОВІ МЕТАМАТЕРІАЛЬНІ СТРУКТУРИ НА БАЗІ SIW ХВИЛЬОВОДІВ ТА РЕЗОНАТОРІВ

У статті розглянуто мікрохвильові структури на основі SIW-резонаторів і хвильоводів, що включають діелектричні резонатори, розташовані в області еліптичної поляризації основного типу хвилі. Діелектричні резонатори розміщуються як у наскрізних отворах SIW структур, так і на їхній діелектричній поверхні в області спеціально створених «вікон» в металевих стінках.

У статті визначено, що збудження в діелектричних резонаторах одночасно двох ортогональних, зміщених по фазі на 90° коливань, які, у загальному випадку, розстроєні по частоті через вплив оточуючих металевих поверхонь, призводить до формування характеристик, притаманних метаматеріальним мікрохвильовим структурам. Продemonстровано характеристики типу резонансу Фано.

Зазначається, що такого роду структури можуть бути використані як мікрохвильові сенсори, антени та ректени. Розглянуто структуру ректен, їх основні компоненти. У статті визначено один із нових перспективних напрямків використання мікрохвильових антен в даний час, в якості ректен – приймальних антен у пристроях збору та накопичення мікрохвильової енергії.

У статті продемонстровано властивості (спрямованість, висока вибірковість) подібних пристроїв, які пізніше знайшли застосування в комірках метаматеріалів. У статті розглянуто як збуджені коливання можуть мати не лише різні резонансні частоти, а й різні ступені зв'язку з лінією передачі (коефіцієнти зв'язку) і різні власні добротності, що зумовлено, наприклад, різними ступенями впливу на них металевих стінок резонаторів.

Визначено, що при розміщенні в областях еліптичної поляризації цих структур діелектричних резонаторів у них збуджуються ортогональні коливання, зміщені по фазі на 90° , які за відповідних розладів частоти та рівнів зв'язку із SIW-структурами можуть реалізовувати характеристики пристроїв у вигляді резонансу Фано, що свідчить про їх метаматеріальні властивості. Продemonстровано як експериментальні характеристики подібних пристроїв, так і теоретичні, отримані на основі адекватних електродинамічних і математичних моделей.

Ключові слова: метаматеріали, SIW резонатори, SIW хвильоводи, діелектричний резонатор, ректена.

Постановка проблеми. Розробка ефективних мікрохвильових структур з метаматеріальними властивостями: так як мікрохвильові структури на основі SIW (Substrate Integrated Waveguide) з використанням діелектричних резонаторів мають потенціал для реалізації метаматеріальних характеристик, зокрема резонансу Фано. Проблемою є розуміння фізичних механізмів і умов для збудження цих характеристик, а також розробка відповідних моделей, що дозволять прогнозувати поведінку таких структур.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З початку цього століття в мікрохвильовій техніці з'явилися нові пристрої як на основі метаматеріалів, так і на базі SIW (Substrate Integrated

Waveguide) структур [6], а згодом і пристрої, що об'єднують обидва ці компоненти [7]. При цьому як комірки метаматеріалів досі розглядалися так звані SRR (Split Ring Resonators) і CSRR (Complimentary Split Ring Resonators) резонатори. Однак останніми роками з'явилися публікації, присвячені новому типу 3D комірок метаматеріалів, сформованих мікрополосковими та діелектричними резонаторами (ДР) [1].

Водночас ще наприкінці 80-х років минулого століття були опубліковані матеріали [2], в яких досліджувалися характеристики хвильоводних структур з ДР, розташованими в області еліптичної поляризації. Було продемонстровано властивості (спрямованість, висока вибірковість)

подібних пристроїв, які пізніше знайшли застосування в комірках метаматеріалів. Оскільки в SIW-хвильоводах і резонаторах структура електромагнітного поля близька до структури поля хвилі H01 прямокутного хвильоводу, дослідження властивостей аналогічних пристроїв на основі SIW-структур із ДР у галузі кругової поляризації є актуальним.

Постановка завдання. Мета статті – дослідження властивостей мікрохвильових компонентів, створених на основі SIW-хвильоводів, резонаторів та ДР, розташованих у областях їхньої еліптичної поляризації, з метою демонстрації можливості реалізації такого роду характеристик, які прийнято відносити до метаматеріальних (надвисока добротність, спрямованість). Мету можна сформулювати так – дослідження нового типу 3D комірок метаматеріалів на основі SIW-структур і ДР.

Виклад основного матеріалу.

S-параметри комірок метаматеріалу. У [3] наведено параметри матриці розсіювання метаматеріальної комірки, що складається з двох резонаторів, загалом різного типу (наприклад, ДР і мікрополоскового), з різними добротностями, а також із різними резонансними частотами:

$$S_{11} = \frac{K_2^*}{1 + K_2^*} - \frac{K_1^*}{1 + K_1^*} \quad (1)$$

$$S_{21} = 1 - \frac{K_1^*}{1 + K_1^*} - \frac{K_2^*}{1 + K_2^*} \quad (2)$$

Де

$$K_i^* = \frac{K_i}{1 + j \cdot \xi_i} \quad (3)$$

$$K_i = \frac{Q_{0i}}{Q_{exti}} \quad (4)$$

$$\xi_i = J \cdot Q_i \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_i} - \frac{\omega_i}{\omega} \right) \quad (5)$$

$$\omega_i = 2 \cdot \pi \cdot f_i \quad (6)$$

Де Q_{0i} ненавантажена добротність i -го резонатора, Q_{exti} зовнішня добротність i -го резонатора f_i – резонансна частота коливання i -го резонатора

Слід зазначити, що ці ж формули можуть застосовуватися не тільки до різних резонаторів, а й до ортогональних коливань одного й того ж резонатора, які можуть збуджуватися в області еліптичної поляризації хвильоводів або інших мікрохвильових ліній передачі, наприклад, у резонаторах кубічної форми.

У подібному випадку збуджені коливання можуть мати не лише різні резонансні частоти, а й різні ступені зв'язку з лінією передачі (коефіцієнти зв'язку) і різні власні добротності, що зумовлено, наприклад, різними ступенями впливу на них металевих стінок резонаторів. У цьому випадку збудження двох ортогональних коливань, зсунутих також і за фазою на 90° , еквівалентне ортогональному розташуванню двох циліндричних ДР в одному перерізі прямокутного хвильоводу [2].

На Рис. 1 для ілюстрації сказаного представлені отримані за допомогою розробленої нами програми «Filter Response Visualization Tool» теоретичні характеристики подібного кубічного ДР в області еліптичної поляризації прямокутного хвильоводу. Параметри коливань, використані при аналізі за допомогою формул (1-6), аналогічні параметрам коливань двох окремих ДР з [2] і представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри коливань модельованого ДР

	Рез. 1	Рез. 2
Резонансна частота, ГГц	9.34	9.36
Коефіцієнт зв'язку	2.3	2.55
Добротність	1100	1000

Джерело: побудовано автором

Як видно, збуджувані одночасно ортогональні коливання (червоне та зелене на Рис. 1) можуть

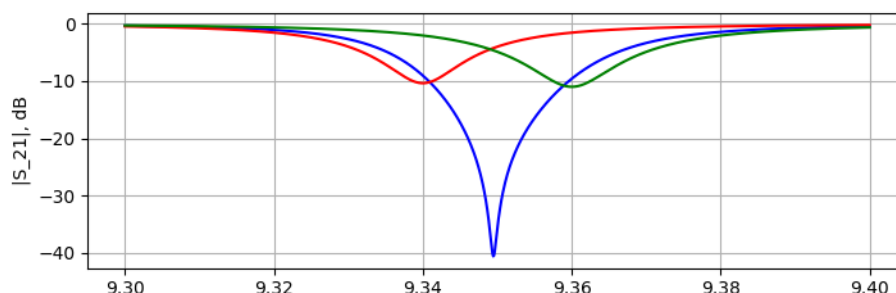


Рис. 1. Інтерференція двох коливань ДР в області еліптичної поляризації прямокутного хвильоводу

Таблиця 2

Параметри коливань модельованої комірки метаматеріалу

	Рез. 1	Рез. 2
резонансна частота, ГГц	8	8.5
Коефіцієнт зв'язку	5.21	5
Добротність	85	80

Джерело: побудовано автором

мати різні резонансні частоти, добротності та ступені зв'язку з хвильоводом, але при деяких їх комбінаціях вони можуть спільно реалізовувати характеристику загасання, що має форму резонансу Фано 5. Наведений приклад знадобиться нам у подальшому для ілюстрації механізму формування вироджених коливань в SIW хвильоводах і резонаторах з ДР.

Діелектричний резонатор в SIW хвильоводі.

На Рис. 2 представлена топологія комірки метамеханізму, утворена відрізком SIW хвильоводу і ДР, розташованим у сквозному отворі хвильоводу в області еліптичної поляризації хвилі H01, змодельовано у програмному комплексі CST.

Структура електромагнітного поля всередині SIW хвильовода подібна структурі поля в прямокутному хвильоводі [6].

На Рис. 3 представлені характеристики розглянутої комірки метаматеріалу, отримані як на основі електродинамічної моделі (Рис. 3 а), так і так і на основі S-параметрів (Рис. 3 б), формули (1)–(6).

Відповідність результатів моделювання свідчить про адекватність використаних моделей. При порівнянні характеристик різних досліджуваних структур (сині криві на Рис. 1 та Рис. 3 б) важливо зауважити, що ширина смуги по рівню – 20 дБ для ДР у прямокутному хвильоводі (Рис. 1) приблизно в 25 разів менша ширини смуги характеристики ДР в SIW хвильоводі (рис. 3), при тому, що в обох випадках використовувалися ДР з власною добротністю одного порядку (1000-1500). Це пов'язано з тим, що в відомій формулі, що зв'язує навантажену Q_L , власну Q_O та зовнішню Q_{ext} добротності, для врахування втрат, пов'язаних

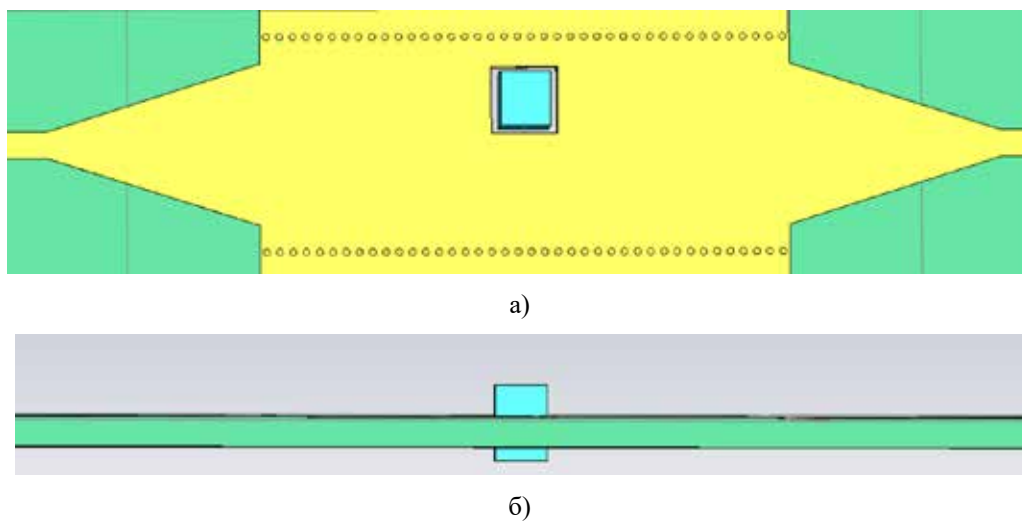


Рис. 2. ДР в формі паралелепіпеда, близького к кубу, а) – вид сверху, б) – вид сбоку

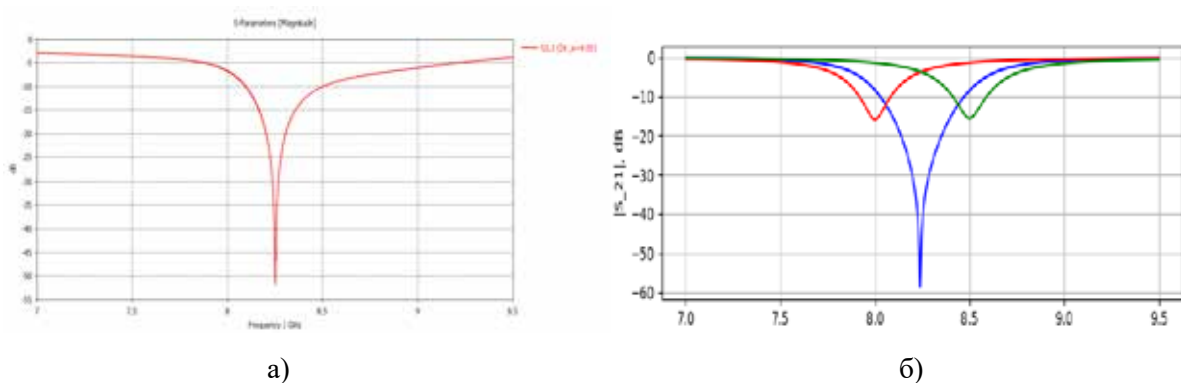


Рис. 3. Резонанс кубического ДР в области эллиптической поляризации SIW волновода

з випромінюванням резонатора, слід додати ще й складову Q_{rad} – радіаційну добротність:

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_{ext}} + \frac{1}{Q_o} + \frac{1}{Q_{rad}} \quad (7)$$

У закритому прямокутному хвилеводі Q_{rad} дуже велике в порівнянні з Q_o і тому може не враховуватися. У структурі з SIW хвилеводом ДР досить сильно випромінює, і тому радіаційна добротність суттєво менша власної (втрати в ДР набагато менші втрат на випромінювання), і тому у формулі (7) власна добротність може не враховуватися. Саме впливом радіаційної добротності (з урахуванням і без урахування втрат на випромінювання) пояснюється суттєва різниця добротностей у таблицях 1 і 2. Досліджена структура може бути успішно використана в якості одного з датчиків, подібних до розглянутих у [7].

Мікрохвильові антени та ректени на основі ДР. Важлива роль метаматеріалів та пристроїв на їх основі в сучасній мікрохвильовій техніці детально представлена в [8], причому як найбільш перспективна область їх застосування виділені саме антени.

Одним із нових перспективних напрямків використання мікрохвильових антен в даний час є їх застосування в якості ректен – приймальних антен у пристроях збору та накопичення мікрохвильової енергії [9, 10]. Як правило, в мікрохвильовому діапазоні такого роду антени є мікрополосковими (найчастіше – патч-антенами).

Водночас порівняння властивостей (характеристик) мікрополоскових і діелектричних антен свідчить про те, що антени на базі діелектричних резонаторів можуть в цілому ряді випадків бути більш енергетично ефективними [11, 12]. Незважаючи на те, що антени на діелектричних резонаторах досить добре і всебічно досліджені, застосування саме їх у складі ректен представляється нам перспективним.

Ректена складається з кількох основних компонентів, які дозволяють їй перетворювати радіочастотну (RF) енергію на електричну.

Антенa. Основний елемент, який приймає радіочастотні сигнали. Антенa може бути різних типів залежно від частоти, на якій працює ректена. Зазвичай використовуються антени, які можуть захоплювати радіохвилі від різних джерел, таких як мобільні мережі, Wi-Fi чи телевізійні передавачі.

Схема узгодження. Пристрій або конфігурація, яка забезпечує оптимальне узгодження імпедансів між антенною (або ректенною) та навантаженням. Основна мета узгодження полягає в максимізації передачі енергії з одного пристрою в інший, зменшуючи відбиття сигналу.

Випрямляч. Компонент, що відповідає за перетворення змінного струму, отриманого від антени, на постійний струм. Найчастіше використовуються високочастотні діоди (діоди шотткі), які мають низьке пряме падіння напруги і можуть працювати на високих частотах, характерних для радіочастотних сигналів.

Корисне навантаження. Енергія, перетворена з радіочастотного сигналу, використовується для живлення корисного навантаження – пристрою, який використовує отриману електричну енергію, наприклад, датчик, мікроконтролер або акумулятор для заряджання.

Діелектричний резонатор в SIW резонаторі. Різні назви типів коливань «парні» і «непарні», так само як «синфазні» і «протифазні», а також «електричні» і «магнітні» можна в загальному випадку кваліфікувати як «нормальні» коливання в тому сенсі, як це представлено в класичній праці [13]. Там же зазначається, що можливий спосіб представлення «нормальних» коливань у вигляді ліво- і правооборотних векторів. У мікрополоскових конструкціях для збудження кругової поляризації в антенах використовуються квадратичні гібридні з'єднувачі [14, 15].

Для збудження такого роду ортогональних коливань придатні, як це продемонстровано вище, і SIW хвилеводи. В якості найбільш перспективної з технологічної точки зору, для побудови антен,

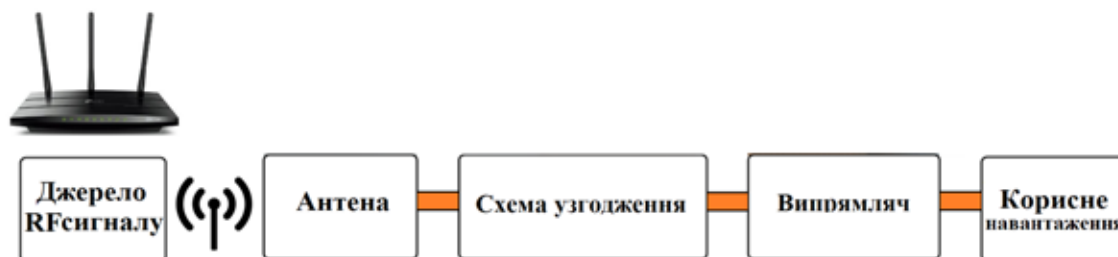


Рис. 4. Основні компоненти ректени

нами запропоновано конструкцію з ДР Рис. 5 а – фото, Рис. 5 б – модель в CST, розташованому на металевій стінці SIW резонатора в районі «вікна», вирізаного в області еліптичної поляризації поля SIW резонатора. Збудження двох близьких за частотою, але не співпадаючих в загальному випадку коливань у ДР досягається також і за рахунок несиметричного розташування ДР щодо металевих країв «вікна».

На Рис. 5 в) представлені експериментальні та теоретичні характеристики досліджуваної структури, яка в даному випадку є мікрохвильовою антеною з полосою пропускання за рівнем – 10 дБ (КСВН = 2) порядку 5%. Слід відзначити достатню відповідність експериментального зразка та електродинамічної моделі.

Для розширення смуги частот антени ДР був розміщений в дещо іншому положенні відносно вікна в стінці SIW хвилевода, так, щоб частоти збуджуваних з ДР ортогональних коливань були більше розстроєні за частотою і знімалося їх «виродження». При цьому ширина смуги частот за рівнем -10 дБ збільшилася до 8%.

У цьому варіанті для моделювання експериментальної характеристики використовувалася «математична» модель антени – тобто параметри матриці розсіяння (формули (1)–(7)), параметри, використані при моделюванні коливань, представлені в таблиці 3.

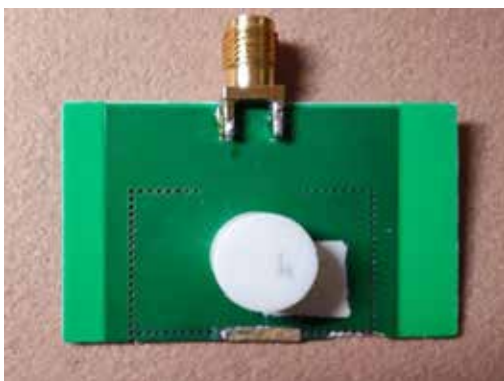
Таблиця 3

Параметри моделювання коливань

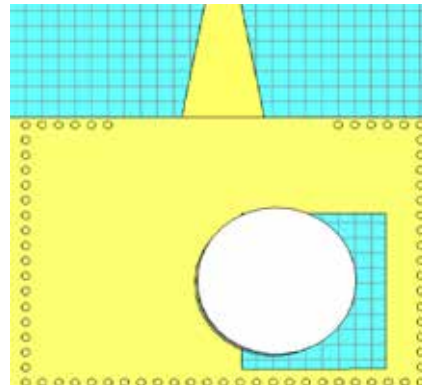
	Рез. 1	Рез. 2
Резонансна частота, ГГц	4.68	5
Коефіцієнт зв'язку	5	6
Добротність	90	90

Джерело: побудовано автором

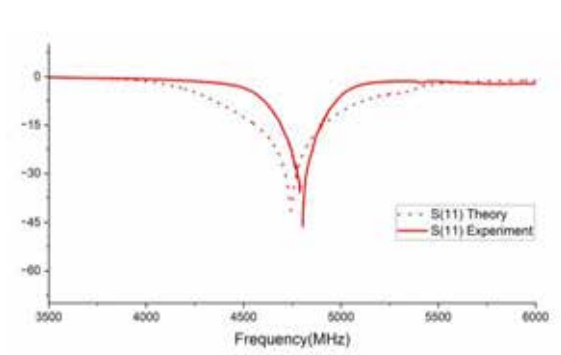
Висновки. Хвилеводи та резонатори на основі SIW-структур мають структуру поля, аналогічну полю хвилі Н01 прямокутного хвилеводу. При розміщенні в областях еліптичної поляризації цих структур діелектричних резонаторів у них збуджуються ортогональні коливання, зміщені по фазі на 90° , які за відповідних розладів частоти та рівнів зв'язку із SIW-структурами можуть реа-



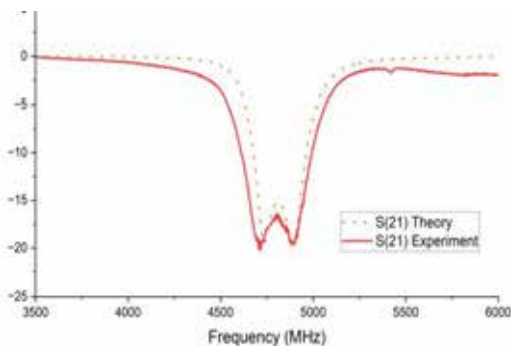
а)



б)



в)



д)

Рис. 5. Експериментальні та теоретичні характеристики мікрохвильової антени а) – фото, б) – модель в CST, в) та д) – експериментальні та теоретичні характеристики у режимі резонансу Фано та довільною розстройкою коливань

лізувати характеристики пристроїв у вигляді резонансу Фано, що свідчить про їх метаматеріальні властивості. SIW-резонатори з ДР на їхній поверхні в районі «вікон» із знятою металізацією досліджено як антени, отримані експериментальні характеристики добре відповідають «метаматеріальним» моделям подібних структур, представленим у статті. Таким чином, можна стверджувати, що в роботі теоретично та експериментально

досліджено мікрохвильові метаматеріальні осередки нового типу

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 Sensing”.

Список літератури:

1. M. Y. Ilchenko et al., “Microwave filter with an induced transparency window based on a modified split-ring resonator,” Ukraine Patent 150 190, Jan. 13, 2022.
2. Ilchenko, M.E., Zhivkov, A.P.: UHF devices based on several dielectric-cavity mode types. *Radioelectronics and Communications Systems* 32(5), 56-59 (1989).
3. M. Y. Ilchenko et al., «Modeling of Electromagnetically Induced Transparency With RLC Circuits and Metamaterial Cell,» in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 71, no. 12, pp. 5104-5110, Dec. 2023, doi: 10.1109/TMTT.2023.3275653.
4. Ilchenko, M.E., Zhivkov, A.P., Orlov, A.T.: Filters based on resonators with modes similar in frequency as cells of metamaterials. *Naukovi Visti NTUU “KPI”* 104(1), 7–14 (2016).
5. Limonov, M., Rybin, M., Poddubny, A. et al. Fano resonances in photonics. *Nature Photon* 11, 543–554 (2017). <https://doi.org/10.1038/nphoton.2017.142>
6. Krushna Kanth, V., Raghavan, S. EM design and analysis of a substrate integrated waveguide based on a frequency-selective surface for millimeter wave radar application. *J Comput Electron* 18, 189–196 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10825-018-1272-z>
7. Alahnomi, R. A., Zakaria, Z., Yussof, Z. M., Althuwayb, A. A., Alhegazi, A., Alsariera, H., & Rahman, N. A. (2021). Review of Recent Microwave Planar Resonator-Based Sensors: Techniques of Complex Permittivity Extraction, Applications, Open Challenges and Future Research Directions. *Sensors*, 21(7), 2267. doi:10.3390/s21072267
8. Brookner, E. (2017). Metamaterial advances for radar and communications. 2017 IEEE Radar Conference (RadarConf). doi:10.1109/radar.2017.7944466
9. Elsheakh, D. (2017). Microwave Antennas for Energy Harvesting Applications. *Microwave Systems and Applications*. doi:10.5772/64918
10. Reynaud, C. A., Duché, D., Simon, J.-J., Sanchez-Adaime, E., Margeat, O., Ackermann, J., ... Escoubas, L. (2020). Rectifying antennas for energy harvesting from the microwaves to visible light: a review. *Progress in Quantum Electronics*, 100265. doi:10.1016/j.pquantelec.2020.100
11. Qinghua Lai, Almpanis, G., Fumeaux, C., Benedickter, H., & Vahldieck, R. (2008). Comparison of the Radiation Efficiency for the Dielectric Resonator Antenna and the Microstrip Antenna at Ka Band. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 56(11), 3589–3592. doi:10.1109/tap.2008.2005551
12. Guha, D., & Kumar, C. (2016). Microstrip Patch versus Dielectric Resonator Antenna Bearing All Commonly Used Feeds: An experimental study to choose the right element. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 58(1), 45–55. doi:10.1109/map.2015.2501231
13. Louisell, William H. *Coupled Mode and Parametric Electronics*. New York and London: J. Wiley and Sons, 1960.
14. W. C. Wong, K. W. Leung, K. M. Luk and E. K. N. Yung, «Circular-polarized dielectric resonator antenna excited by dual conformal strips,» *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Transmitting Waves of Progress to the Next Millennium. 2000 Digest. Held in conjunction with: USNC/URSI National Radio Science Meeting (C, Salt Lake City, UT, USA, 2000, pp. 1021-1025 vol.2, doi: 10.1109/APS.2000.875395.*
15. Agwil, R. O., Benchikh, S., Djillali, H., & Tatu, S. O. (2020). Antenna rectifier using quadrature hybrid coupler for power-harvesting applications. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, e22279. doi:10.1002/mmce.22279

Shevtsov K.O., Zhivkov O.P. MICROWAVE METAMATERIAL STRUCTURES BASED ON SIW WAVEGUIDES AND RESONATORS

The article examines microwave structures based on SIW resonators and waveguides incorporating dielectric resonators located in the region of elliptical polarization of the fundamental wave type. The dielectric resonators are positioned both in through-holes of SIW structures and on their dielectric surface in specially created “windows” in the metallic walls.

The article determines that the excitation of two orthogonal oscillations shifted in phase by 90° , which are generally detuned in frequency due to the influence of surrounding metallic surfaces, in dielectric resonators leads to the formation of characteristics typical of metamaterial microwave structures. Fano resonance-type characteristics are demonstrated.

The article notes that such structures can be used as microwave sensors, antennas, and rectennas. The structure of rectennas and their main components are discussed. The article identifies one of the promising new directions for the use of microwave antennas as rectennas—receiving antennas in devices for collecting and storing microwave energy.

The article demonstrates the properties (directionality, high selectivity) of such devices, which were later applied in metamaterial cells. The study examines how excited oscillations can exhibit not only different resonance frequencies but also varying degrees of coupling with the transmission line (coupling coefficients) and different intrinsic quality factors. These characteristics are determined, for example, by varying degrees of influence from the metallic walls of the resonators.

It is shown that placing dielectric resonators in regions of elliptical polarization of these structures excites orthogonal oscillations, shifted in phase by 90° , which, under appropriate detuning of frequency and coupling levels with SIW structures, can exhibit device characteristics in the form of Fano resonance, indicating their metamaterial properties. Both experimental and theoretical characteristics of such devices, obtained based on adequate electrodynamic and mathematical models, are demonstrated.

Key words: metamaterials, SIW resonators, SIW waveguides, dielectric resonator, rectenna.