

Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова
Національна академія наук України

Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова
Національна академія наук України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Доля Роман Сергійович

УДК 621.378; 537.862

ДИСЕРТАЦІЯ
ПЛАНАРНІ ДІЕЛЕКТРИЧНІ РЕЗОНАТОРИ В РЕЖИМІ ЗБУДЖЕННЯ
МОД ШЕПОЧУЧОЇ ГАЛЕРЕЇ

104 - Фізика та астрономія

10 - Природничі науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ Р. С. Доля

Науковий керівник: Когут Олександр Євгенович
доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник

Харків - 2021

АНОТАЦІЯ

Доля Р. С. Планарні діелектричні резонатори в режимі збудження мод шепочучої галереї. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, Харків, 2020.

Робота присвячена дослідженню збудження мод шепочучої галереї в надтонких, порівняно з довжиною хвилі, резонаторах. Дисертаційна робота також включає в себе дослідження способів підвищення електродинамічних характеристик таких резонаторів – розрідження частотного спектру електромагнітних коливань, підвищення добротності, підвищення параметру зв'язку. В роботі представлений генератор міліметрових довжин хвиль, побудований на резонаторі на модах шепочучої галереї.

В Розділі 1 проведено огляд результатів раніше проведених досліджень за даними літературних джерел. Показано, що найбільш привабливими, за причиною високої добротності і розрідженого спектру, для використання в техніці мм хвиль є відкриті дискові діелектричні резонатори в режимі збудження робочих мод шепочучої галереї. Однак, найменша висота таких резонаторів є обмеженою виконанням умови повного внутрішнього відбиття хвиль від плоских основ діелектричного диска - $H \geq \lambda_d/2$ (λ_d – довжина хвилі в діелектричному матеріалі резонатора). Перехід до тонких планарних діелектричних структур, обмеженим в аксіальному напрямку відбиваючими металевими поверхнями, розширює уявлення про можливості реалізації режиму мод шепочучої галереї в таких резонаторах. Доцільність проведення досліджень особливостей електродинамічних характеристик планарних діелектричних резонаторів визначена двома факторами. По-перше, подібні резонатори в режимі збудження робочих мод шепочучої галереї раніше не досліджувалися. По-друге, використання таких резонаторів може дозволити створити на їх основі пристрої резонансного типу з покращеними масогабаритними та технічними характеристиками. Таким чином, завдання

дослідження планарних діелектричних резонаторів в режимі збудження робочих мод шепочучої галереї цікава, як з фундаментальної, так і прикладної точки зору.

В Розділі 2 розглянуто та розв'язано задачу збудження мод шепочучої галереї в тонкому фторопластовому диску шляхом його електромагнітного зв'язку з локальним елементом збудження – щілиною зв'язку в металевому дзеркалі планарного діелектричного резонатора. Проведеними експериментальними та розрахунковими дослідженнями встановлено, що на відміну до відкритих дискових діелектричних резонаторів, в планарних резонаторах, утворених тонким діелектричним диском, розташованим плоскими основами між двома провідними поверхнями (дзеркалами), досягається режим збудження мод шепочучої галереї. При цьому висота діелектричного диска може бути суттєво меншою, ніж критично допустима для відкритих діелектричних резонаторів. Показано, що навіть в надтонкому планарному діелектричному резонаторі, висота якого на два порядки менше робочої довжини хвилі, реалізується режим збудження мод шепочучої галереї. Причиною даного ефекту є зниження радіаційних втрат за рахунок штучного обмеження резонансного поля уздовж аксіальної координати відбиваючими металевими поверхнями.

Встановлено, що ефективність збудження робочих мод шепочучої галереї в планарних діелектричних резонаторах при їх зв'язку з локальним елементом збудження може бути вище, ніж при збудженні мод шепочучої галереї в подібних класичних відкритих діелектричних резонаторах з більшою висотою. На відміну від класичних, діелектричний резонатор при використанні щілини зв'язку в якості елемента збудження мод шепочучої галереї в планарних діелектричних резонаторах досягається режим сильного закритичного зв'язку. Причиною цього є однорідний розподіл резонансного поля мод шепочучої галереї в аксіальному напрямку та, як слід, висока інтенсивність поля в області розташування щілини зв'язку.

Для підвищення власної добротності планарних діелектричних резонаторів, величина якої є порівняно невисокою $Q_0 \approx 1500$, запропоновано використання кільцевого металевого екрану. Показано, що зростання власної добротності на $30 \div$

40% в діапазоні частот $31 \div 37$ ГГц, досягається за рахунок часткового зміщення резонансного поля мод шепочучої галереї з діелектричного матеріалу резонатора в повітряний зазор між діелектричним диском і металевим екраном.

В Розділі 3 на прикладі тонкого лейоксапфірового планарного діелектричний резонатора, висота якого складає $H \approx \lambda_d/4$, розв'язано задачу суттєвого підвищення (більше ніж в 4,5 рази) власної добротності. Було встановлено, що введення в конструкцію одного або двох повітряних зазорів між плоскими основами тонкого діелектричного диска і металевими дзеркалами дозволяє значно зменшити діелектричні та омичні втрати енергії. При використанні одинарного повітряного зазору певної висоти, яка визначається електрофізичними і геометричними параметрами діелектричного диска, вдається підвищити власну добротність резонатора більш ніж в 2 рази. Використання подвійного повітряного зазору дозволяє підвищити добротність резонатора більш ніж в 4,5 рази. Причиною цього ефекту є зниження діелектричних та омичних втрат енергії за рахунок зміщення максимуму інтенсивності резонансного поля з діелектрика в повітряний зазор і зменшення інтенсивності поля на металевих дзеркалах резонатора.

Показано, що розширити можливості тонких дискових діелектричних структур щодо реалізації режиму збудження мод шепочучої галереї, дозволяє розташування їх хоча б на одній відбиваючій поверхні.

Досліджено спектральні характеристики планарного діелектричного резонатора. Встановлено ефект перетворення модового складу спектра планарного діелектричного резонатора шляхом зміни висоти повітряного зазору при використанні рухомого уздовж аксиальної координати металевого дзеркала. Використання рухомого металевого дзеркала в конструкції планарного діелектричного резонатора дозволяє досягти суттєвої перебудови (до 30%) резонансних частот мод шепочучої галереї.

Для розрідження спектра планарного діелектричного резонатора запропоновано використання його розподіленого електромагнітного зв'язку з діелектричним хвилеводом, яка забезпечує високу ефективність збудження робочих мод шепочучої галереї в резонаторі. Показано, що на відміну від

випромінюючого елемента збудження у вигляді щілини зв'язку, розподілений зв'язок з діелектричним хвилеводом не приводить до збудження небажаних коливань, утворених відбиттям хвиль від площини металевих дзеркал, що покривають плоскі підстави тонкого діелектричного диска.

В Розділі 4 запропоновано використання планарного діелектричного резонатора в активних пристроях мм діапазону довжин хвиль, а саме, в суматорі потужності і в схемі стабілізації частоти твердотільного генератора хвилеводно-коаксіального типу. Вивчено вихідні характеристики таких пристроїв. Проведеними дослідженнями було встановлено, що високий закритичний електромагнітний зв'язок локальних активних елементів з резонансними полями робочих мод шепочучої галереї в планарних діелектричних резонаторах робить привабливим використання таких малогабаритних резонаторів в ряді активних пристроїв мм діапазону довжин хвиль. так:

- використання планарних діелектричних резонаторів в схемі стабілізації частоти твердотільних генераторів дозволяє забезпечити короткочасну нестабільність частоти вихідного сигналу не гірше ніж 10^{-5} :

- суматори потужності на основі планарних діелектричних резонаторів характеризуються високим коефіцієнтом підсумовування - 0,91. При створенні суматора потужності пріоритетною є схема індивідуального живлення діодів Гана, яка дозволяє в порівнянні зі схемою послідовного живлення підвищити коефіцієнт підсумовування і покращити короткочасну нестабільність частоти вихідного сигналу.

Одним з основних переваг активних пристроїв на основі планарних діелектричних резонаторів є їх малі розміри і вага.

Наукова новизна:

Вперше експериментально і методом комп'ютерного моделювання досліджено електродинамічні характеристики тонких планарних діелектричних резонаторів в режимі збудження мод шепочучої галереї. При цьому отримано такі нові результати:

1. Встановлено, що в діелектричних дисках, висота яких значно менше за довжиною хвилі, і, розташованих в плоско-паралельному екрані, досягається режим збудження мод шепочучої галереї шляхом їх електромагнітної зв'язку, як з локальним джерелом, так і при розподіленому зв'язку з діелектричним хвилеводом. Показано існування мод шепочучої галереї в надтонких планарних структурах, висота яких на два порядки менше за робочу довжину хвилі.

2. Ефективність збудження мод шепочучої галереї в планарних діелектричних резонаторах в порівнянні з подібними класичними діелектричними резонаторами, критерієм оцінки якої є параметр зв'язку, є високою. Встановлено, що з такими резонаторами досягається режим сильного закритичного зв'язку, як при використанні локального елемента збудження, так і при розподіленому зв'язку з діелектричним хвилеводом. Причиною цього є однорідний в аксіальному напрямку розподіл поля мод шепочучої галереї, що характеризується високою інтенсивністю в області розташування елемента зв'язку.

3. При розміщенні тонкого діелектричного диска в металевому екрані кільцевої форми з повітряним зазором певної товщини між ними досягається збільшення на 40% власної добротності планарних діелектричних резонаторів. Причиною підвищення добротності є зниження діелектричних втрат за рахунок часткового зміщення полів мод шепочучої галереї з діелектрика в повітряний зазор.

4. При введенні в конструкцію резонатора певного за висотою повітряного зазору між плоскими основами тонкого діелектричного диска і одним з металевих дзеркал, що покривають його плоскі основи, вдається підвищити власну добротність резонатора більш ніж в 2 рази. При введенні двох симетричних зазорів власна добротність планарних діелектричних резонаторів може бути збільшена більш ніж 4,5 рази. При цьому її величина не гірше добротності подібних класичних діелектричних резонаторів більшої висоти. Причиною цього ефекту є зниження діелектричних і омичних втрат за рахунок часткового змуснення резонансного поля з діелектрика в повітряний зазор. При цьому енергія, що запасається в повітряному зазорі може бути більше енергії, що запасається в діелектричному елементі резонатора. Оптимальна, з точки зору найбільшої

добротності, висота повітряного зазору визначається геометричними і електрофізичними параметрами планарного діелектричного резонатора.

5. Встановлено, що при збудженні мод шепочучої галереї в планарному діелектричному резонаторі шляхом його розподіленого зв'язку з діелектричним хвилеводом досягається розрідження спектра. У порівнянні з випромінюючим елементом у вигляді щілини зв'язку, утвореної відкритим кінцем металевого хвилеводу, при розподіленому зв'язку з діелектричним хвилеводом в спектрі планарного діелектричного резонатора відсутні небажані коливання, викликані багаторазовим відбиттям хвиль від площини металевих дзеркал.

6. Запропоновано використання планарного діелектричного резонатора в схемі стабілізації частоти твердотільного генератора хвилеводно-коаксіальної конструкції. Завдяки використанню планарного діелектричного резонатора вдається зменшити більш ніж в 3 рази діапазон електронної перебудови частоти і, тим самим, підвищити стабільність частоти вихідного сигналу по відношенню до випадкової зміни напруги живлення діода Гана. Встановлено, що короткочасна нестабільність генератора, стабілізованого лейкосапфіровим планарним діелектричним резонатором висотою 0,7 мм, не гірше, ніж 10^{-5} .

7. Створено діючу модель малогабаритного двохдіодного суматора потужності на основі лейкосапфірового планарного діелектричного резонатора. Показано, що шляхом його використання досягається режим взаємної частотної синхронізації коливань, що генеруються діодами, яке супроводжується складанням потужностей і підвищенням стабільності частоти вихідного сигналу. При використанні схеми індивідуального живлення діодів Гана досягається коефіцієнт підсумовування, рівний 0,91. За рахунок синхронізації коливань від двох діодів діапазон електронної перебудови частоти зменшується в 2,5 рази в порівнянні з однодіодною генерацією.

Практична значущість.

Отримані результати досліджень електродинамічних характеристик планарних діелектричних резонаторів в режимі збудження мод шепочучої галереї є передумовою для їх використання в ряді активних пристроїв мм діапазону довжин хвиль з покращеними технічними і масо-габаритними характеристиками. Високі

значення параметра зв'язку резонансних полів мод шепочучої галереї в планарних діелектричних резонаторах з локальними елементами збудження є головною причиною використання таких резонаторів в:

1. *Малогабаритних суматорах потужності*. Проведені дослідження показали перспективність використання тонких діелектричних резонансних структур в плоско-паралельному екрані для підсумовування потужностей окремих твердотільних активних елементів. Завдяки використанню планарних діелектричних резонаторів при підсумовуванні потужностей двох діодів Гана досягнутий режим взаємної синхронізації генерованих ними коливань. При цьому ефективність підсумовування висока. Коефіцієнт підсумовування досягає 0,91.

2. *Схемах стабілізації частоти* твердотільних генераторів хвилеводно-коаксіального типу. В роботі показано, що шляхом ефективного електромагнітного зв'язку генератора волноводно-коаксіального типу на діоді Гана з планарним діелектричним резонатором вдається підвищити стабільність частоти його вихідного сигналу по відношенню до випадкової зміни напруги живлення діода Гана. При цьому діапазон електронної перебудови частоти, як характеристика, що відображає короточасну стабільність частоти, при використанні планарного діелектричного резонатора звужується більш ніж в 3 рази в порівнянні з нестабілізованим генератором. Короточасна нестабільність частоти мала і становить 10^{-5} .

Ключові слова: діелектричні резонатори, шепочуча галерея, планарні резонатори, генератор міліметрових довжин хвиль, суматор потужностей, добротність, моди шепочучої галереї.

Список публікацій за темою дисертації: Основні результати дисертації представлено в 7 статтях у профільних журналах:

1. A.E. Kogut, I. K. Kuz'michev, E. A. Kogut, R. S. Dolia, S. O. Nosatiuk, Ye. A. Shulha, He Jaochan, "High-Q shielded dielectric disk resonator with whispering gallery modes," *Radio Physics and Radio Astronomy*, Vol. 22, №4, pp. 310-318, 2017.

2. А.Е. Когут, Р.С. Доля, С.О. Носатюк, Е.А. Шульга, Джаочан Хе, “Возбуждение колебаний шепчущей галереи в дисковом планарном диэлектрическом резонаторе щелью связи,” *Весці Нацыянальнай акадэміі наук Беларусі. Сер. фіз.-тех. наук*, №3, сс. 121-128, 2017.

3. A.E. Kogut, E.A. Kogut, R.S. Dolya, S.O. Nosatiuk, S.N. Kharkovsky, J. He, “Increasing Q-Factor of Planar Dielectric Resonators with Whisper Gallery Modes,” *Radioelectronics and Communications Systems*, Vol. 61, No. 11, pp. 522–528, 2018.

4. А.Е. Когут, Р.С. Доля, С.О. Носатюк, Джаочан Хе, “Экранированный планарный диэлектрический резонатор с модами шепчущей галереи,” *Весці Нацыянальнай акадэміі наук Беларусі. Сер. фіз.-тех. наук*, №4, сс. 478-485, 2018.

5. Zoya Eremenko, Aleksndr Kogut, Roman Dolia, Alexander Shubny, “Comparison of High Loss Liquids Dielectric Properties Measurement using Waveguide and Resonator Methods” *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, № 12(9), pp. 892-899, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1017/S1759078720000628>.

6. A. E. Kogut, Z. E. Eremenko, I. K. Kuzmichev, R. S. Dolia and M. T. Islam, "Power Summation of the Gunn-Diodes in the Ultra-Thin Planar Dielectric Resonator," *2019 49th European Microwave Conference (EuMC)*, 2019, pp. 336-339, doi: 10.23919/EuMC.2019.8910948.

7. A.E. Kogut, M. T. Islam, E. A. Kogut, Z. E. Eremenko, R. S. Dolia, “Increasing the Q-factor of thin planar dielectric resonator with whispering gallery modes,” *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, №12(10), pp. 960-968, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1017/S1759078720000525>.

та в 5 тезах, опублікованих у збірниках доповідей на міжнародних і українських конференціях, серед яких:

8. A. Kogut, I. Kuz'michev, R. Dolia, S. Nosatiuk and Y. Shulha, "Excitation of whispering gallery modes in a high double-layer disc shielded dielectric resonator," *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kiev, 2017, pp. 102-105, doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100433.

9. A.E. Kogut, R.S. Dolya, Z.E.Eremenko, “Millimeter wave active devices based on dielectric resonators with whispering gallery modes,” *Тези XI Міжн. наук.-техн. конф.*

"Метрологія та вимірювальна техніка" MVT-2018, Харків, Україна, 9 жовтня, 2018.

10. Aleksandr Kogut, Roman Dolia, Zoya Eremenko, Mohammad Islam, "Increasing the Q-factor of Thin Planar Dielectric Resonators with Whispering Gallery Modes," *Proceedings of European Microwave Conference in Central Europe (EuMCE2019)*, Prague, Czech Republic, 13-15 May, 2019, pp. 545-548.

11. Mohammad Tariqul Islam, Aleksandr Kogut, Iskandar Yahya, Roman Dolia, "On the Possibility of Use of Planar Dielectric Resonators for Solving the Problems of Frequency Stabilization of Millimeter Waves Oscillators," *Proceed. Of 2019 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE)*, Malacca, Malaysia, 25 - 27 November 2019, pp. 130-132.

12. Zoya Eremenko, Aleksandr Kogut, Roman Dolia, Alexander Shubny, "Comparison of High Loss Liquids Dielectric Properties Measurement using Waveguide and Resonator Methods," IEEE Xplore: 17 October 2019, Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8874733>. Published in: 2019 European Microwave Conference in Central Europe (EuMCE).

ANNOTATION

Dolia R.S. Planar dielectric resonators in the mode of excitation of the whispering gallery modes. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy on a specialty 01.04.03 - radio physics. Institute of Radiophysics and Electronics. O. Ya. Usykova, National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2020.

The work is devoted to the study of the excitation of the whispering gallery modes in ultrathin resonators compared to the wavelength. The dissertation also includes research on ways to increase the electrodynamic characteristics of such resonators - rarefaction of the frequency spectrum of electromagnetic oscillations, increasing the quality factor, increasing the coupling parameter. The dissertation presents a millimeter wavelength generator built on a resonator in the whispering gallery mods.

Part 1 reviews the results of previous research based on literature sources. It is shown that the most attractive, due to the high quality factor and sparse spectrum, for use in the technique of mm waves are open disk dielectric resonators in the mode of excitation of the operating modes of whisper gallery modes. However, the smallest height of such resonators is limited by the condition of complete internal reflection of waves from the flat bases of the dielectric disk - $H \geq \lambda_d / 2$ (λ_d is the wavelength in the dielectric material of the resonator). The transition to thin planar dielectric structures bounded in the axial direction by reflective metal surfaces expands the idea of the possibility of implementing the mode of whispering gallery modes in such resonators. The expediency of conducting research on the features of the electrodynamic characteristics of planar dielectric resonator is determined by two factors. First, such resonators in the mode of excitation of the operating modes of whispering gallery modes have not been previously studied. Secondly, the use of such resonators can allow to create on their basis devices of resonant type with improved mass and size and technical characteristics. Thus, the task of studying planar dielectric resonators in the mode of excitation of working modes of whispering gallery modes is interesting, both from the fundamental, and applied point of view.

Part 2 considers and solves the problem of excitation of whispering gallery modes in a thin teflon disk by its electromagnetic coupling with a local excitation element - a coupling gap in a metal mirror of a planar dielectric resonator. Experimental and computational studies have shown that in contrast to open disk dielectric resonators, in planar resonators formed by a thin dielectric disk located on flat bases between two conductive surfaces (mirrors), the excitation mode of whispering gallery modes is achieved. The height of the dielectric disk can be significantly less than the critical allowable for open dielectric resonator. It is shown that even in an ultrathin planar DR, the height of which is two orders of magnitude less than the working wavelength, the mode of excitation of whispering gallery modes is realized. The reason for this effect is the reduction of radiation losses due to the artificial restriction of the resonant field along the axial coordinate by reflective metal surfaces.

It is established that the efficiency of excitation of working modes of whispering gallery modes in planar DR at their connection with a local element of excitation can be

higher, than at excitation of modes of whispering gallery modes in similar classical open dielectric resonator with bigger height. In contrast to classical dielectric resonator, when using the communication slit as an element of excitation of whispering gallery modes in planar dielectric resonators, a regime of strong supercritical communication is achieved. The reason for this is the uniform distribution of the resonant field of the whispering gallery modes in the axial direction and, as follows, the high field intensity in the region of the coupling gap.

To increase the intrinsic quality factor of planar DRs, the value of which is relatively low $Q_0 \approx 1500$, the use of a ring metal screen is proposed. It is shown that the increase in the intrinsic Q -factor by $30 \div 40\%$ in the frequency range $31 \div 37$ GHz is achieved due to the partial shift of the resonant field of the whispering gallery modes from the dielectric material of the resonator into the air gap between the dielectric disk and the metal screen.

In Part 3, the problem of a significant increase (more than 4.5 times) in the Q -factor is solved on the example of a thin sapphire planar dielectric resonator, the height of which is $H \approx \lambda_d / 4$. It was found that the introduction into the structure of one or two air gaps between the flat bases of a thin dielectric disk and metal mirrors can significantly reduce the dielectric and ohmic energy losses. When using a single air gap of a certain height, which is determined by the electrophysical and geometric parameters of the dielectric disk, it is possible to increase the unloaded Q -factor of the resonator more than 2 times. The use of a double air gap allows to increase the Q -factor of the resonator by more than 4.5 times. The reason for this effect is the reduction of dielectric and ohmic energy losses by shifting the maximum of the resonant field intensity from the dielectric to the air gap and reducing the field intensity on the metal mirrors of the resonator. It is shown that to expand the possibilities of thin disk dielectric structures with respect to the realization of the mode of excitation of whispering gallery modes, allows their location on at least one reflective surface.

The spectral characteristics of planar dielectric resonator are investigated. The effect of transforming the mode composition of the planar dielectric resonator spectrum by changing the height of the air gap when using a metal mirror moving along the axial

coordinate is established. The use of a movable metal mirror in the design of a planar dielectric resonator allows to achieve a significant adjustment (up to 30%) of the resonant frequencies of the whispering gallery modes.

To dilute the spectrum of planar dielectric resonator, it is proposed to use its distribution electromagnetic connection with the dielectric waveguide, which provides high efficiency of excitation of the operating modes of the whispering gallery modes in the resonator. It is shown that, in contrast to the radiating excitation element in the form of a coupling gap, the distributed bond with dielectric waveguide does not excite unwanted oscillations formed by the reflection of waves from the plane of metal mirrors covering the flat bases of a thin dielectric disk.

Part 4 proposes the use of planar dielectric resonator in active devices of the mm wavelength range, namely, in the power adder and in the frequency stabilization circuit of a solid-state generator of waveguide-coaxial type. The initial characteristics of such devices are studied. Studies have shown that the high supercritical electromagnetic coupling of local active elements with the resonant fields of the operating modes of whispering gallery modes in planar dielectric resonator makes it attractive to use such small resonators in a number of active devices in the mm wavelength range. so:

- the use of planar dielectric resonator in the frequency stabilization scheme of solid-state generators allows to provide short-term instability of the frequency of the output signal not worse than 10^{-5} :
- power adders based on planar dielectric resonator are characterized by a high summation factor - 0.91. When creating a power adder, the priority is the circuit of individual power supply of Gunn diodes, which allows in comparison with the circuit of series power to increase the summation factor and improve the short-term instability of the frequency of the output signal.

One of the main advantages of active devices based on planar dielectric resonator is their small size and weight.

Scientific novelty:

For the first time, the electrodynamic characteristics of thin planar DRs in the mode of excitation of whispering gallery modes were investigated experimentally and by the method of computer modeling. The following new results were obtained:

1. It is established that in dielectric disks, the height of which is much less than the wavelength, and located in a flat-parallel screen, the mode of excitation of whispering gallery modes is achieved by their electromagnetic connection, both with a local source and with a distributed connection. with a dielectric waveguide. The existence of whispering gallery modes in ultrathin planar structures, the height of which is two orders of magnitude less than the working wavelength, is shown.
2. The efficiency of excitation of whispering gallery modes in planar dielectric resonators in comparison with similar classical dielectric resonators, the evaluation criterion of which is the coupling parameter, is high. It is established that a mode of strong supercritical connection is achieved with such resonators, both when using a local excitation element and when distributed communication with a dielectric waveguide. The reason for this is the uniform axial distribution of the whispering gallery modes field, which is characterized by a high intensity in the region of the communication element.
3. When placing a thin dielectric disk in a metal screen of annular shape with an air gap of a certain thickness between them, an increase of 40% of the intrinsic quality factor of planar dielectric resonator is achieved. The reason for the increase in quality factor is the reduction of dielectric losses due to the partial displacement of the fields of the whispering gallery modes from the dielectric into the air gap.
4. When introducing into the design of the resonator a certain height of the air gap between the flat bases of a thin dielectric disk and one of the metal mirrors covering its flat bases, it is possible to increase the quality factor of the resonator more than 2 times. With the introduction of two symmetrical gaps, the intrinsic quality factor of planar dielectric resonator can be increased more than 4.5 times. In this case, its value is not worse than the quality factor of such classic dielectric resonator of greater height. The reason for this effect is the reduction of dielectric and ohmic losses due to the partial displacement of the resonant field from the dielectric into the air gap. In this case, the energy stored in the air gap may be greater than the energy stored in the dielectric element

of the resonator. The optimal, in terms of the highest quality factor, the height of the air gap is determined by the geometric and electrophysical parameters of the planar dielectric resonator.

5. It is established that at excitation of whispering gallery modes in planar dielectric resonator by its distributed connection with a dielectric waveguide the rarefaction of the spectrum is achieved. Compared with the radiating element in the form of a communication slit formed by the open end of the metal waveguide, with distributed communication with the dielectric waveguide in the spectrum of planar dielectric resonator there are no unwanted oscillations caused by repeated reflection of waves from the plane of metal mirrors.

6. The use of planar dielectric resonator in the frequency stabilization circuit of a solid-state generator of a waveguide-coaxial structure is proposed. Due to the use of planar dielectric resonator it is possible to reduce more than 3 times the range of electronic frequency tuning and, thus, increase the stability of the frequency of the output signal with respect to random changes in the supply voltage of the Gunn diode. It is established that the short-term instability of the generator stabilized by sapphire planar dielectric resonator with a height of 0.7 mm is not worse than 10^{-5} .

7. The current model of small-sized two-diode power adder based on sapphire planar dielectric resonator is created. It is shown that by its use the mode of mutual frequency synchronization of oscillations generated by diodes is achieved, which is accompanied by power addition and increase of frequency stability of the output signal. When using the circuit of individual power supply of Gunn diodes the summation factor equal to 0,91 is reached. Due to the synchronization of oscillations from the two diodes, the range of electronic frequency tuning is reduced by 2.5 times compared to single-diode generation.

Practical significance.

The obtained results of researches of electrodynamic characteristics of planar DR in the mode of excitation of whispering gallery modes are a precondition for their use in a number of active devices of mm of a range of wavelengths with the improved technical and mass-dimensional characteristics. High values of the parameter of the connection of

the resonant fields of the whispering gallery modes in planar dielectric resonator with local excitation elements are the main reason for the use of such resonators in:

1. Small-size power adders. Studies have shown the prospects for the use of thin dielectric resonant structures in a flat-parallel screen to sum up the capacities of individual solid-state active elements. Due to the use of planar dielectric resonators in summing the powers of two Gunn diodes, the mode of mutual synchronization of the oscillations generated by them is achieved. The efficiency of summation is high. The summation coefficient reaches 0.91.

2. Frequency stabilization schemes of solid-state generators of waveguide-coaxial type. It is shown that by effective electromagnetic coupling of a waveguide-coaxial generator on a Gunn diode with a planar dielectric resonator it is possible to increase the stability of the frequency of its output signal with respect to a random change in the supply voltage of the Gunn diode. The range of electronic frequency tuning, as a characteristic that reflects the short-term stability of the frequency, when using planar dielectric resonator is narrowed by more than 3 times compared to the unstabilized generator. Short-term frequency instability is small and is 10^{-5} .

Keywords: dielectric resonators, whispering gallery, planar resonators, millimeter wavelength generator, power adder, Q-factor, whispering gallery modes.

List of publications on the topic of the dissertation: The main results of the dissertation are presented in 7 articles in profile journals:

1. A.E. Kogut, I. K. Kuz'michev, E. A. Kogut, R. S. Dolia, S. O. Nosatiuk, Ye. A. Shulha, He Jaochan, "High-Q shielded dielectric disk resonator with whispering gallery modes," *Radio Physics and Radio Astronomy*, Vol. 22, №4, pp. 310-318, 2017.

2. А.Е. Когут, Р.С. Доля, С.О. Носатюк, Е.А. Шульга, Джаочан Хе, "Возбуждение колебаний шепчущей галереи в дисковом планарном диэлектрическом резонаторе целью связи," *Весті Національної академії наук Беларусі. Сер. фіз.-тех. наук*, №3, сс. 121-128, 2017.

3. A.E. Kogut, E.A. Kogut, R.S. Dolya, S.O. Nosatiuk, S.N. Kharkovsky, J. He, "Increasing Q-Factor of Planar Dielectric Resonators with Whisper Gallery Modes," *Radioelectronics and Communications Systems*, Vol. 61, No. 11, pp. 522–528, 2018.
4. А.Е. Когут, Р.С. Доля, С.О. Носатюк, Джаочан Хе, "Экранированный планарный диэлектрический резонатор с модами шепчущей галереи," *Весці Нацыянальнай акадэміі наук Беларусі. Сер. фіз.-тех. наук*, №4, сс. 478-485, 2018.
5. Zoya Eremenko, Aleksndr Kogut, Roman Dolia, Alexander Shubny, "Comparison of High Loss Liquids Dielectric Properties Measurement using Waveguide and Resonator Methods" *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, № 12(9), pp. 892-899, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1017/S1759078720000628>.
6. A. E. Kogut, Z. E. Eremenko, I. K. Kuzmichev, R. S. Dolia and M. T. Islam, "Power Summation of the Gunn-Diodes in the Ultra-Thin Planar Dielectric Resonator," *2019 49th European Microwave Conference (EuMC)*, 2019, pp. 336-339, doi: 10.23919/EuMC.2019.8910948.
7. A.E. Kogut, M. T. Islam, E. A. Kogut, Z. E. Eremenko, R. S. Dolia, "Increasing the Q-factor of thin planar dielectric resonator with whispering gallery modes," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, №12(10), pp. 960-968, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1017/S1759078720000525>.

and in 5 abstracts published in collections of reports at international and Ukrainian conferences, including:

8. A. Kogut, I. Kuz'michev, R. Dolia, S. Nosatiuk and Y. Shulha, "Excitation of whispering gallery modes in a high double-layer disc shielded dielectric resonator," *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kiev, 2017, pp. 102-105, doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100433.
9. A.E. Kogut, R.S. Dolya, Z.E.Eremenko, "Millimeter wave active devices based on dielectric resonators with whispering gallery modes," *Тези XI Міжн. наук.-техн. конф. "Метрологія та вимірювальна техніка" MVT-2018*, Харків, Україна, 9 жовтня, 2018.
10. Aleksandr Kogut, Roman Dolia, Zoya Eremenko, Mohammad Islam, "Increasing the Q-factor of Thin Planar Dielectric Resonators with Whispering Gallery Modes,"

Proceedings of European Microwave Conference in Central Europe (EuMCE2019), Prague, Czech Republic, 13-15 May, 2019, pp. 545-548.

11. Mohammad Tariqul Islam, Aleksandr Kogut, Iskandar Yahya, Roman Dolia, “On the Possibility of Use of Planar Dielectric Resonators for Solving the Problems of Frequency Stabilization of Millimeter Waves Oscillators,” *Proceed. Of 2019 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE)*, Malacca, Malaysia, 25 - 27 November 2019, pp. 130-132.

12. Zoya Eremenko, Aleksandr Kogut, Roman Dolia, Alexander Shubny, “Comparison of High Loss Liquids Dielectric Properties Measurement using Waveguide and Resonator Methods,” IEEE Xplore: 17 October 2019, Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8874733>. Published in: 2019 European Microwave Conference in Central Europe (EuMCE).

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	22
ВСТУП.....	24
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ДАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ.....	33
1.1. Пристрої, що забезпечують частотну селекцію в мм діапазоні довжин хвиль.....	33
1.2. Діелектричні резонатори в режимі збудження мод шепочучої галареї.....	35
Висновки до Розділу 1.....	42
РОЗДІЛ 2. ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНАРНОГО ДР ПРИ ЩІЛЬНОМУ ПРИЛІГАННІ ВІДБИВАЮЧИХ ПОВЕРХОНЬ ДО ПЛОСКІХ ОСНОВ ДІЕЛЕКТРИЧНОГО ДИСКА	43
2.1. Режим збудження мод ШГ в частково екранованому фторопластовому планарному ДР	43
2.2. Порівняння характеристик планарного ДР зі спектральними та енергетичними характеристиками класичних дискових ДР	53
2.3. Підвищення власної добротності дискових ДР. Класичний дисковий ДР в півсферичному екрані.....	59
2.4. Підвищення добротності планарного ДР шляхом використання кільцевого металевого екрану.....	69
Висновки до Розділу 2.....	77
РОЗДІЛ 3. ПЛАНАРНИЙ ДР В ПЛОСКО-ПАРАЛЕЛЬНОМУ ЕКРАНІ З ПОВІТРЯНИМИ ЗАЗОРАМИ: СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ДОБРОТНОСТІ.....	78
3.1. Лейкосапфіровий ДР в плоскопараллельному екрані з одним повітряним зазором.....	80
3.2. Високодобротний планарний ДР в плоско-паралельному екрані з подвійним повітряним зазором	91
3.3. Перетворення спектральних характеристик планарних ДР шляхом введення повітряних зазорів.....	99
Висновки до Розділу 3.....	115

РОЗДІЛ 4. МАЛОГАБАРИТНІ АКТИВНІ ПРИСТРОЇ МІЛІМЕТРОВИХ ХВИЛЬ НА ОСНОВІ ПЛАНАРНИХ ДР	117
4.1. Стабілізація частоти твердотільних генераторів мм діапазону довжин хвиль.....	117
4.2. Суматор потужності на основі планарного ДР	125
Висновки до Розділу 4.....	132
ВИСНОВКИ.....	133
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	135
ДОДАТОК А СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	154

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

НВЧ – надвисокі частоти

мм хвилі – міліметрові хвилі

субмм жвилі– субміліметрові хвилі

ДР – діелектричний резонатор

ДХ – діелектричний хвилевід

моди ШГ – моди шепочучої галереї

ϵ – відносна діелектрична проникність

$\text{tg}\delta$ – тангенс кута втрат

λd – довжина хвилі в діелектрику

f - частота

p – параметр зв'язку хвилеводу з полями коливань в резонаторі

КСХН – коефіцієнт стоячої хвилі за напругою

f_n –резонансна частота

δf_n – період сітки резонансних частот

Δf_n – змінення резонансної частоти

Q_n – навантажена добротність

Q_0 – власна добротність

Q_{cv} –добротність, що визначається втратами на зв'язок з хвилеводом

n – азимутальний індекс мод шепочучої галереї

m – радіальний індекс мод шепочучої галереї

l – аксіальний індекс мод шепочучої галереї

H – висота дискового діелектричного резонатора

h – відстань між металевими дзеркалами в планарному ДР

D – діаметр дискового діелектричного резонатора

R – радіус плоскої основи діелектричного диска

Δh – висота повітряного зазору

h_0 – аксіальна координата

A_0 – амплітуда резонансного відгуку

A_{max} – найбільша амплітуда резонансного відгуку

I_0 – поточне значення інтенсивності резонансного поля (електричної компоненти)

I_{max} - найбільше значення інтенсивності резонансного поля (електричної компоненти)

r_i – радіальна координата середини щілини зв'язку

U – напруга живлення діода Гана

P – потужність генерації

Δf – змінення частоти вихідного сигналу генератора

χ – короткочасна нестабільність частоти вихідного сигналу генератора

ККД – коефіцієнт корисної дії

ВСТУП

Актуальність теми. Великий інтерес до задач частотної селекції обумовлений інтенсивним розвитком техніки, що використовує електромагнітні хвилі. Розвиток нових напрямків і технологій вимагає створення нової елементної бази, для чого потрібне проведення комплексних досліджень. Так, розв'язання задач частотної селекції необхідно у всіх основних сферах радіофізичної науки і техніки, пов'язаних з генеруванням електромагнітних хвиль, виділенням частотних каналів їх передачі, приймання та обробки даних [1-5]. Пристроями, покликаними вирішувати такі завдання є резонатори різних типів. Спостережуваний в даний час розвиток техніки в короткохвильовій частини електромагнітного спектра, а саме, в міліметровому (мм) і субміліметровому (субмм) діапазонах довжин хвиль, вимагає створення адекватних пристроїв резонансного типу з високими показниками технічних характеристик.

У більшості випадків резонатори, які використовувалися в більш довгохвильовій частині електромагнітного спектру (НВЧ), через свої незадовільні масо-габаритні або вихідні характеристики не відповідають вимогам, що пред'являються до пристроїв подібного типу в мм і субмм діапазонах. До числа таких резонаторів відносяться резонатори хвилеводного типу [6-11], квазіоптичні відкриті резонатори, утворені металевими дзеркалами [12-16], і відкриті діелектричні резонатори, що збуджуються на нижчих модах коливань [17-22]. Особливості їх електродинамічних характеристик, також як і причини їх невідповідності вимогам до резонаторів мм і субмм діапазонів, розглянуті нижче, в Розділі 1.

Найбільш привабливими з позицій спектральних і енергетичних характеристик є відкриті діелектричні резонатори (ДР), що збуджуються на вищих типах коливань типу шепочучої галереї (ШГ) [17, 23-32]. На відміну від резонаторів хвилеводного типу вони мають більш високу добротність. У порівнянні з відкритими квазіоптичними резонаторами на основі системи металевих дзеркал ДР з модами ШГ характеризуються розрідженим спектром і покращеними масо-габаритними характеристиками. Головною перевагою таких ДР з позицій

електродинаміки є висока власна добротність, обумовлена малими радіаційними втратами, незважаючи на їх відкритий характер. Резонансні поля робочих мод ШГ в ДР формуються хвилями, що поширюються уздовж криволінійної поверхні діелектричних структур у формі диска, кільця або кулі під такими пологими кутами, що коефіцієнт їх відбиття від межі розділу середовищ діелектрик-повітря близький до одиниці. У разі, коли ціле число довжин хвиль укладається уздовж криволінійної поверхні діелектричної структури спостерігається резонанс. Іншою важливою умовою досягнення резонансу є виконання умови повного внутрішнього відбиття хвиль від криволінійної межі розділу середовищ діелектрик - навколишній простір [27]. Для цього, по-перше, відносна діелектрична проникність матеріалу резонатора повинна бути більше діелектричної постійної навколишнього простору, а, по-друге, кут падіння хвиль на границю розділу середовищ повинен бути більше кута повного внутрішнього відбиття. Високий коефіцієнт відбиття мод ШГ від межі розділу середовищ діелектрик - повітря (близький до одиниці) визначає малі втрати енергії на випромінювання у вільний простір. На відміну від ДР на нижчих модах коливань такі резонатори не вимагають використання матеріалів з високим значенням відносної діелектричної проникності, які в більшості випадків важко піддаються механічній обробці і є дорогими.

Простотою своєї моделі і розрідженим спектром коливань в ряду ДР з модами ШГ виділяються дискові ДР, які в зарубіжній науковій літературі завдяки наявності плоских поверхонь отримали назву «planar DR» [27, 28, 33, 34]. В даний час вони широко використовуються в різних активних і пасивних пристроях мм діапазону довжин хвиль [28, 34-46]. В роботі [27] представлено модель дискових ДР, що описує зв'язок електродинамічних характеристик з їх геометричними і електрофізичними параметрами. Було показано, що найменша висота відкритих дискових ДР не може перевищувати половини робочої довжини хвилі в діелектрику. За менших висот не виконується умова повного внутрішнього відбиття від плоскої межі розділу середовищ діелектрик-повітря. Раніше проведені експерименти по дослідженню електродинамічних характеристик тонких дискових ДР підтвердили це [47-50]. З цієї обставини аксіальні розміри відкритих дискових

ДР можна порівняти з робочою довжиною хвилі. Це ускладнює використання таких резонаторів в мікроелектроніці і інтегральних схемах. Крім того, як показали раніше проведені дослідження, параметр електромагнітної зв'язку з класичними дисковими ДР є відносно невисоким. У більшості випадків він є меншим параметру критичного зв'язку, що особливо важливо при створенні активних пристроїв мм хвиль. Причиною цього є переважна локалізація полів робочих мод ШГ всередині матеріалу резонатора. За його межами інтенсивність резонансного поля швидко знижується вже на відстанях, менших за робочу довжину хвилі.

У зв'язку з вищесказаним важливою радіофізичною задачею є пошук шляхів створення малорозмірних ДР на основі тонких в порівнянні з довжиною хвилі діелектричних дисків - планарних ДР. Термін «планарний», на наш погляд, є найбільш адекватним для подання тонких структур резонансного типу, незважаючи на деяку формальну невідповідність до зарубіжної термінології. Раніше термін «планарний» був введений нами при описі надтонких хвилеводних структур мм діапазону довжин хвиль [51-57]. Для опису таких тонких ліній передачі іноді використовувався термін «щілинні» за аналогією з щілинним зазором між двома плоскими провідними поверхнями, продольні розміри яких значно перевищують робочу довжину хвилі.

Таким чином, задача створення і дослідження надтонких, в порівнянні з робочою довжиною хвилі, планарних ДР є цікавою, як з фундаментальної точки зору, оскільки раніше не були зроблені спроби в цьому напрямку, так і з позицій прикладного призначення. Розв'язання поставленої задачі дозволить покращити масо-габаритні характеристики існуючих активних пристроїв мм діапазону довжин хвиль і може отримати продовження в розвиток інтегральної техніки.

Викладене вище визначає актуальність теми дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами , планами , темами.

Дисертаційна робота виконувалась у відділі радіофізики твердого тіла Інститута радіофізики та електроніки ім О.Я.Усикова НАН України у відповідності до планів виконаних НДР або НДР, що виконуються у цей час:

1. «Вивчення взаємодії електромагнітних та звукових хвиль, а також заряджених часток з твердотільними структурами» (шифр теми «Кентавр-5») виконувалась з 2012 по 2016 р.р. (№ держреєстр. 0112U000211).
2. «Дослідження взаємодії електромагнітних та звукових хвиль, а також заряджених частинок з наноструктурами та мета матеріалами», (шифр теми «Кентавр-6») виконується з 2017 по 2021 р.р. (№ держреєстрації 0117U004038).
3. «Теоретичне та експериментальне дослідження взаємодії електромагнітних хвиль гіга-, терагерцевого та оптичного діапазонів у природних та штучних структурах з метою розробки перспективних функціональних пристроїв антенної техніки, з квазіоптики, мікрохвильової електроніки та нових радіофізичних технологій у біології та медицині» (шифр теми «БУКСИР 5») виконується з 2017 по 2021 р.р, (номер держреєстрації 0117U004033).

Мета та задачі досліджень.

Метою роботи є створення надтонких у порівнянні з робочою довжиною хвилі планарних ДР та їх використання в малогабаритних активних пристроях мм діапазону довжин хвиль. Для досягнення цієї мети доцільним є розв'язання наступних задач:

1. Визначення шляхом комп'ютерного моделювання та експериментально основних спектральних і енергетичних характеристик дискових діелектричних резонансних структур, що знаходяться в плоско-паралельному екрані.
2. Встановлення їх зв'язку з геометричними параметрами резонатора, а саме, з висотою.
3. Визначення мінімальної висоти діелектричного диска, що знаходиться в плоско-паралельному екрані, достатньої для реалізації режиму збудження мод ШГ.
4. Визначення електродинамічних характеристик планарних ДР і встановлення принципів їх формування в залежності від геометричних і електрофізичних параметрів резонатора.

5. Пошук шляхів покращення енергетичних і спектральних характеристик планарних ДР, як шляхом використання конструкційних особливостей, так й шляхом оптимізації умов збудження робочих мод ШГ.
6. Створення на основі планарних ДР малорозмірних активних пристроїв мм хвиль, а саме, генератора та суматора потужності.

Об'єктом досліджень є планарні діелектричні резонатори в режимі збудження мод шепочучої галереї.

Предмет досліджень – розподіл інтенсивності полів робочих мод ШГ в планарних ДР, параметр їх електромагнітного зв'язку, як з локальним джерелом збудження, так і при розподіленому зв'язку з діелектричним хвилеводом; спектральні та енергетичні характеристики планарних ДР: вихідні характеристики генератора та суматора потужності на основі таких резонаторів.

Методи досліджень.

В роботі використовувалися радіофізичні методи вимірювань спектральних, енергетичних і поляризаційних характеристик мод ШГ, а також розподілів їх полів в планарних ДР [58, 59].

Експериментальні дослідження здійснювались за допомогою аналізатора ланцюгів Pna-L N5230a 10MHz ÷ 40GHz Agilent Technologies та панорамного вимірювача KCXN P2-65. Аналізатор ланцюгів використовувався для уточнення найбільш важливих результатів експериментальних досліджень. В роботі було використано дві різні схеми включення планарних ДР в хвилеводно-вимірювальну лінію.

1. **Схема «на відбиття»**. Підвід енергії зовнішнього електромагнітного поля від широкосмугового джерела до резонатора ті її вивід здійснюється шляхом використання одного елемента зв'язку. Хвилевідна лінія при цьому містить спрямований відгалужувач. Така схема включення планарного ДР до хвилевідної лінії дозволяє визначити власну добротність резонатора.

Для визначення власної добротності як основної енергетичної характеристики резонатора використовувався метод вимірювання повного опору [58] (резонансний метод). Суть цього методу полягає у вимірюванні резонансної частоти f_n і ширини Δf резонансного відгуку за рівнем КСХН, відповідним до половинної потужності. Ці величини дозволяють визначити навантажену добротність Q_n як $Q_n = f_n / \Delta f$.

Прямими вимірюваннями по відповідній шкалі панорамного вимірювача КСХН визначається КСХН резонансів за їх найменшим значенням. Похибка вимірювання КСХН згідно з технічним описом панорамного вимірювача КСХН в процентах не перевищує величини, яка визначається за формулою:

$$\delta K_{BCH} = \pm(5K_{CBH} + 2),$$

і в досліджуваному діапазоні частот вона складає $7 \div 9$ %. Режим зв'язку з хвилеводом контролюється шляхом внесення в поле коливань малого в порівнянні з довжиною хвилі поглинаючого тіла [59]. Змінення амплітуди резонанса є головним критерієм визначення режиму зв'язку. Якщо при внесенні поглинаючого тіла амплітуда резонансного відгуку зменшується, то режим зв'язку – слабкий (параметр зв'язку $p < 1$). Навпаки, якщо амплітуда резонансного відгуку збільшується, то режим зв'язку – сильний, закритичний ($p > 1$).

Урахування втрат в планарних ДР визначається за наступним виразом, що використовується для об'ємних резонаторів:

$$1/Q_n = 1/Q_0 + 1/Q_{cv}.$$

В цьому виразі загальні втрати енергії $1/Q_n$ представляються як сума власних втрат $1/Q_0$ в резонаторі та втрат на зв'язок $1/Q_{cv}$ з елементом підведення (відведення) енергії.

Для слабого зв'язку ($p < 1$) величина $Q_{cv} \rightarrow \infty$ і навантажена добротність наближена до власної $Q_n \approx Q_0$.

При критичному зв'язку з резонатором ($p = 1$) $Q_{cv} = Q_0$ і $Q_n = Q_0/2$.

Для сильного, закритичного зв'язку ($p > 1$) $Q_n \approx Q_{cv}$.

В експериментах систематична похибка визначення навантаженої добротності не перевищувала 10%.

При використанні аналізатора ланцюгів Pna-L N5230a 10MHz ÷ 40GHz Agilent Technologies власна добротність визначалась прямими вимірюваннями ширини резонансного відгуку за рівнем половинної потужності.

Вимірювання частот при використанні панорамного вимірювача KCXN P2-65 здійснювалась за допомогою резонансного хвилеміра на основі об'ємного резонатора з функцією перебудови резонансного об'єма та/або за цифровою шкалою, вбудованого вимірювача частоти при використанні аналізатора ланцюгів Pna-L N5230a 10MHz ÷ 40GHz Agilent Technologies. При використанні хвилеміра, систематична похибка визначення частоти в експерименті була порівняно невелика і в середньому становила 0,05 %. При збільшенні частоти похибка вимірювань зменшувалася.

2. Схема «на прохід» передбачала два елементи зв'язку зовнішньої хвилеводної лінії з досліджуваним резонатором, за допомогою яких здійснювався підведення і відведення енергії з резонатора. Методика визначення навантаженої добротності Q_n також як і власної є резонансною. Вимірювання навантаженої добротності здійснюється за рівнем -3дБ щодо амплітуди резонансного відгуку на його центральній частоті, що відповідає найменшому ослабленню сигналу за шкалою дБ [58].

Для ідентифікації поляризації збуджуваних в резонаторі мод ШГ використовувався метод збурюючої неоднорідності. Пробне тіло з відбивними властивостями розміщувалось в полі резонансних мод ШГ. Належність мод ШГ до HE - або EH – поляризації в планарних ДР оцінювалось за зсувом резонансного відгуку в бік більш високих або низьких частот.

Через малі розміри планарних ДР та їх екранування плоско-паралельними провідними поверхнями експериментальне дослідження розподілу інтенсивності резонансних полів робочих мод ШГ було ускладнено. Тому, для їх вивчення використовувалося комп'ютерне моделювання, виконане на основі стандартного пакета програмного забезпечення CST Microwave Studio 2013, наданого Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM), Малайзія в ході спільних наукових досліджень. Поведінка інтенсивності резонансного поля, а саме, його електричної компоненти

описувалося шляхом порівняння інтенсивності поля в поточній точці з максимальним значенням.

Крім того, шляхом комп'ютерного моделювання вивчалися спектральні (S-parameter) і амплітудні характеристики планарного ДР, які зіставлялися з подібними характеристиками, отриманими в ході експерименту.

Особистий внесок автора дисертації полягає в проектуванні лабораторних макетів пристроїв, проведенні комп'ютерного моделювання планарних ДР і розрахунку їх електродинамічних характеристик, а також виборі методик експериментальних досліджень, проведенні вимірювань, і участі в обговоренні отриманих результатів.

Так, в роботах [60-71] автором проведено експериментальні дослідження електродинамічних характеристик планарних ДР в режимі збудження мод ШГ.

У роботах [60, 62] експериментально і шляхом комп'ютерного моделювання досліджено спектральні та енергетичні характеристики фторопластового дискового планарного ДР. На основі досліджень, проведених з класичним дисковим ДР [61], в роботі [62] автором запропоновано використання екрану кільцевої форми для підвищення добротності планарного ДР.

У роботах [63, 64, 67, 69] досліджено електродинамічні характеристики лейкосапфірового планарного ДР. Автором проведено цикл розрахункових досліджень на основі комп'ютерного моделювання, результати яких були підтверджені їм експериментально. У роботах [63, 64, 69] з метою суттєвого підвищення добротності планарних ДР автором запропоновано перехід до тонких резонансним структурам з повітряним зазором між плоскими основами діелектричного диска і плоскими металевими дзеркалами. Проведено розрахунок розподілу полів робочих мод ШГ в такому резонаторі, на основі якого створено модель високодобротного тонкого планарного ДР. Основні положення підтверджено автором шляхом проведених експериментальних досліджень.

У роботах [65, 66, 68, 70] автором запропоновано низку прикладних застосувань як планарних, так і класичних дискових ДР. У роботах [65, 71]

експериментально досліджено спектральні та енергетичні характеристики класичних дискових ДР з робочими модами ШГ і вплив на їх поведінку рідин, що характеризуються високими втратами. У роботах [66, 68, 70] запропоновано ряд активних пристроїв мм діапазону довжин хвиль на основі лейкосапфірового планарного ДР. Так, в роботі [66] запропоновано створення малогабаритного суматора потужності. Автором проведено експериментальні дослідження основних вихідних характеристик двохдіючого суматора потужності на основі планарного ДР. В роботі [70] запропоновано використання планарного ДР в схемі стабілізації частоти вихідного сигналу твердотільного генератора волноводно-коаксіальної конструкції. Проведено цикл експериментальних досліджень.

Структура та об'єм дисертації

Дисертація складається з переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел наукової літератури. Обсяг дисертації становить 153 сторінки, з яких 122 сторінки основного тексту. Дисертація містить 62 рисунка. Список використаних джерел наукової літератури на 19 сторінках налічує 175 найменувань.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ДАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ.

Одним з перспективних напрямків розвитку сучасної радіофізики є освоєння короткохвильової частини спектра електромагнітного випромінювання - міліметрового (мм) і субміліметрового (субмм) діапазонів довжин хвиль. Такі напрямки розвитку головним чином визначаються потребами сучасної техніки в різних областях. В даний час мм хвилі знаходять застосування в системах 5G-мобільного зв'язку [72, 73] і телекомунікаційних системах [74-77], навігаційних системах [78-80], ближньої і далекої радіолокації [81-84], в приладах медичного призначення [85-88], охоронних системах і системах безпеки [89]. При цьому особливу та важливе значення в ряду інших завдань радіофізики мають завдання частотної селекції коливальних. Їх рішення особливо важливо при створенні випромінюючих твердотільних [90-97] і електронно-вакуумних джерел [98-100] систем мм хвиль, розв'язанні задач електромагнітної сумісності джерел електромагнітного випромінювання з різними пристроями мм діапазону довжин хвиль [101, 102], при оптимізації умов поширення радіохвиль [103-106], при прийомі і обробці сигналу [107].

1.1. Пристрої, що забезпечують частотну селекцію в мм діапазоні довжин хвиль.

Поклиакними до вирішення проблем частотної селекції в мм діапазоні довжин хвиль є резонатори з розподіленими параметрами. Їх розміри є порівнянними або більшими за робочу довжини хвилі. Основною електродинамічною характеристикою таких резонаторів, також як і коливальних контурів із зосередженими параметрами, є власна добротність, яка визначає ширину смуги пропускання поблизу робочих частот.

Найбільш широке застосування в довгохвильовій частині мм діапазону довжин хвиль отримали об'ємні резонатори хвилеводного типу, які створюються на

основі відрізків металевих хвильоводів [6, 7, 108, 109]. У таких структурах резонансне поле займає весь об'єм, обмежений металевими стінками. Такі резонатори характеризуються порівняно невисокою добротністю, обмеженою омичними втратами в металевих стінках. Оскільки резонансне поле займає весь об'єм резонаторів хвильоводного типу, то такі втрати досить великі. Підвищити добротність за рахунок концентрації резонансного поля в середині порожнини резонатора і зниження омичних втрат енергії дозволяють хвильоводо - діелектричні резонатори [8-11]. Однак з переходом в короткохвильову область мм діапазону застосування таких резонаторів стає проблематичним. Це пов'язано зі складністю їх виготовлення, оскільки розміри резонаторів хвильоводного типу можна порівняти з робочою довжиною хвилі.

Принцип об'ємного резонансу, коли резонансне поле займає весь об'єм резонатора, лежить в основі створення і відкритих діелектричних резонаторів (ДР), які використовуються на основних (нижчих) модах коливань [17-22, 110]. Як матеріал таких резонаторів, зазвичай, вибирають діелектрики з відносною діелектричною проникністю не менше кількох десятків. При таких електрофізичних параметрах резонансне поле головним чином зосереджено всередині діелектрика і за його межами інтенсивність електричної компоненти знижується до мінімальних значень вже на відстанях, порівняних з робочою довжиною хвилі. Власна добротність ДР на основних модах головним чином визначається їх формою, розмірами і значенням тангенса кута втрат матеріалу, з якого вони виготовлені. Головним фактором, що ускладнює використання відкритих ДР на основних модах, особливо в короткохвильовій області мм діапазону, є низька технологічність. Як правило, матеріали з яких вони виготовляються важко підлягають механічній обробці через їхню високу твердість. Крім того, також, як і для резонаторів хвильоводного типу, розміри ДР повинні бути порівнянні з робочою довжиною хвилі. Тому виготовлення таких резонаторів, для малих довжин хвиль, є складним.

Більш перспективними щодо використання в широкому діапазоні довжин хвиль є відкриті квазіоптичні резонатори, розміри яких суттєво перевищують

робочу довжину. Добре відомі відкриті квазіоптичні резонатори на основі двох і більше плоских і сферичних металевих дзеркал [12-16]. Резонансні поля робочих мод в таких резонаторах в основному зосереджені в повітряному об'ємі, обмеженому металевими дзеркалами. Радіаційні втрати на випромінювання у вільний простір у відкритих квазіоптичних резонаторах є малими за рахунок утворення каустик поля, що обмежують радіаційні втрати. Це є причиною високої добротності таких відкритих резонаторів, яка становить від декількох тисяч до декількох десятків тисяч. Основним недоліком відкритих квазіоптичних резонаторів є їх багатомодовість, яка визначає густий спектр збуджуваних коливань. Суттєво розрізати частотний спектр відкритих квазіоптичних резонаторів дозволяє перехід до металевих дзеркал, одне з яких замінено відбивною дифракційною решіткою - ешелетом [111-114]. Розмір ешелету визначається робочою довжиною хвилі. На основній частоті промінь відбивається від решітки в тому ж напрямку, що і падає. Для інших частот падаючий і відбитий промені утворюють кут, пропорційний відносного зсуву частот. Моді, частоти яких не відповідають основній робочій частоті, при цьому не збуджуються за рахунок високих радіаційних втрат або ефективність їх збудження суттєво мала в порівнянні з робочою модою.

Однак, поряд з очевидними перевагами відкриті квазіоптичні резонатори мають певні недоліки, які ускладнюють їх використання в конкретних пристроях мм хвиль. Головними з них є великі розміри і вага. По-друге, в конструктивних особливостях таких резонаторів є незручності, пов'язані з розташуванням активних елементів, елементів їх узгодження і підведення живлення, при створенні генераторів на основі відкритих квазіоптичних резонаторів.

1.2. Діелектричні резонатори в режимі збудження мод шепочучої галарей.

Найбільш перспективними, завдяки високим показникам своїх електродинамічних характеристик і технологічності, є відкриті діелектричні

резонатори (ДР), що працюють в режимі збудження вищих типів коливань [17, 26]. Синонімом вищим типам коливань є термін моди шепочучої галереї, який набув найбільшого поширення, як у вітчизняній, так і зарубіжній науковій літературі [23-25, 27-30, 32, 33, 96, 115-120]. Термін «шепочуча галерея» спочатку використовувався стосовно акустичних мод, які існують у кільцевих замкнутих системах і характеризуються аномально малим затуханням [121]. Найбільш відомим прикладом існування таких акустичних коливань є собор святого Павла в Лондоні (рис.1.1).



Рис. 1.1. Собор Св. Павла в Лондоні як приклад архітектури «шепочучої галереї».

Ще з давніх часів монахи використовували принцип шепочучої галереї для підслуховування таємних переговорів, прикладаючи вухо до стіни галереї, що має форму кільця або спіралі (Рис. 1.1б). Акустичні хвилі поширюються уздовж криволінійної поверхні і падають на неї під дуже пологими кутами. При цьому коефіцієнт їх відбиття наближений до одиниці. Моди шепочучої галереї формуються хвилями з багаторазовим відбиттям акустичних хвиль від криволінійної поверхні розділу двох середовищ.

Акустичний принцип шепочучої галереї спостерігається і в електромагнітних хвилях. На цьому принципі заснована робота ДР в формі диска (кільця) і кулі [17, 23-32, 115-120]. Електромагнітні моди шепочучої галереї (ШГ) формуються в них хвилями, падаючими на внутрішню криволінійну поверхню діелектричної структури також під дуже пологими кутами β (рис. 1.2а). Вони поширюються в

діелектричному матеріалі з відносною діелектричною проникністю ϵ_1 , більшою за діелектричну проникність ϵ_2 оточуючого простору. Виконання умови $\epsilon_1 > \epsilon_2$ є необхідним для задовільнення умови повного внутрішнього відбиття хвиль від межі розділу двох середовищ.

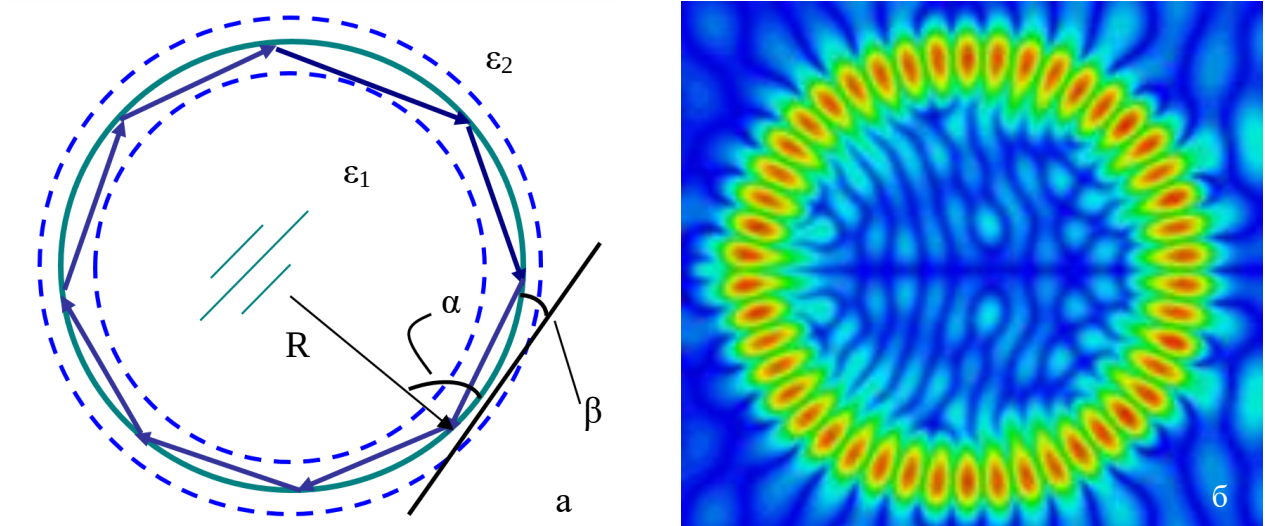


Рис. 1.2. Геометрооптичне уявлення режиму мод ШГ в дисковому ДР (а) і розподіл їх полів (б).

Це забезпечує умови для запасаання енергії електромагнітного поля всередині діелектричної структури у формі диска або кулі. Оскільки коефіцієнт відбиття хвиль від внутрішньої поверхні відкритої діелектричної структури близький до одиниці, то радіаційні втрати мізерно малі. Завдяки цьому ДР з модами ШГ характеризуються високою добротністю, величина якої в основному визначається втратами в матеріалі резонатора. Резонансні поля мод ШГ локалізуються переважно всередині діелектричного матеріалу резонатора поблизу його криволінійної поверхні і обмежені внутрішньою (з боку діелектрика) і зовнішньою (з боку вільного простору) каустикою. Форма каустик збігається з формою криволінійної поверхні ДР. Форми електричних полів мод ШГ за формою нагадують пелюстки, розташовані уздовж криволінійної поверхні резонатора і характеризуються максимумами і мінімумами інтенсивності (Рис. 1.2б).

Характерною ознакою мод ШГ в ДР є відсутність резонансного поля всередині діелектричної резонансної структури поблизу її центру.

Найбільш простою моделлю ДР є діелектричний диск. З позицій електродинаміки дискові ДР є найбільш привабливими в силу найбільшої розрідженості спектральних характеристик. У зарубіжній науковій літературі для опису дискових ДР часто користуються терміном «planar», який передбачає наявність плоских поверхонь в конструкції резонатора [27, 28, 33, 34].

Дискові ДР, що працюють в режимі збудження мод ШГ, мають безпосереднє прикладне призначення. Вони досліджуються і використовуються в різних пристроях в діапазоні частот від СВЧ до оптичного випромінювання [17, 26, 28, 122-137]. Великий внесок у розвиток тематики дискових ДР з робочими модами ШГ внесли вчені і дослідники Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я.Усикова НАН України [26, 32, 138-140]. Поштовхом до розвитку фундаментальних робіт з вивчення електродинамічних властивостей таких резонаторів стало їх прикладне використання в різних пристроях мм діапазону довжин хвиль. Було запропоновано оригінальні конструкції генераторів [41-44, 96] і суматорів потужності [32]. Дискові ДР стали основою діелектрометрів - пристроїв для вивчення електрофізичних властивостей твердих матеріалів [141-146] і рідин з високими втратами енергії [44, 147, 148]. На основі дискового ДР була запропонована конструкція релятивістського генератора, який збуджується пучком електронів [149-151]. Причиною широкого спектра застосувань дискових ДР стали простота їх виготовлення, висока добротність і розріджений спектр збуджуваних коливань. Недоліком таких резонаторів є відсутність точного математичного апарату для визначення їх власних електродинамічних характеристик. Причиною цього є наявність різких меж - плоских сторін, що обмежують циліндричну поверхню в аксіальному напрямку. В роботі [27] було запропоновано наближений підхід щодо визначення спектральних характеристик дискових ДР і їх зв'язку з геометричними параметрами резонатора і електрофізичними властивостями матеріалу, з якого вони виготовлені.

Розглянемо найбільш простий випадок дискового ДР, виготовленого з ізотропного матеріалу з малими втратами, діаметр якого забагато більший висоти. Малі радіаційні втрати в такому резонаторі обумовлені виконанням умови повного внутрішнього відбиття хвиль від внутрішньої поверхні діелектричного диска [26, 27]. В такому ДР збуджуються гібридні EH_{nml} та HE_{nml} моди ШГ. Три модальних індекси n , m і l визначають число варіацій резонансного поля уздовж азимутальної, радіальної і аксіальної координат, відповідно. Наближений аналітичний опис резонансних мод ШГ в дискових ДР також представлено в роботах [26, 27, 132, 133, 152]. Поведінка поля всередині резонатора описується в циліндричній системі координат наступним виразом:

$$J_n(\beta\rho) \begin{Bmatrix} \cos(hz) \\ \sin(hz) \end{Bmatrix} e^{i(n\phi+\omega t)} \quad (1.1)$$

де $J_n(\beta\rho)$ - функція Бесселя першого роду, β і h – поперечна і поздовжня постійні поширення, відповідно, визначаються рівністю [27, 152]:

$$\beta^2 = k^2 - h^2 \quad (1.2)$$

де $k = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon\mu}$, c – швидкість світла в вакуумі, ω – кутова частота; ϵ і μ - дійсні частини діелектричної і магнітної проникності матеріалу резонатора. Надалі будемо вважати магнітну проникність $\mu = 1$. Вираз (1.2) є основним для обчислення спектральних характеристик дискових ДР, які обумовлені їх електрофізичними і геометричними параметрами. В цьому випадку поздовжня постійна поширення багато в чому залежить від висоти дискового ДР [27, 152]:

$$h = \frac{\pi(l+1)}{H} \gamma \quad (1.3).$$

Коефіцієнт γ поздовжнього складової поширення близький до 1 і стає рівним 1, коли поле близьке до нуля на плоских стінках резонатора, як у випадку металевих поверхонь. Таким чином, вираз (2) набуває вигляду:

$$\beta = \sqrt{k^2 - h^2} = \sqrt{\epsilon \frac{\omega^2}{c^2} - \left[\frac{\pi(l+1)}{H} \gamma \right]^2} \approx \sqrt{\epsilon \frac{\omega^2}{c^2} - \left[\frac{\pi(l+1)}{H} \right]^2} \quad (1.4).$$

Для дискового ДР, розміщеного плоскими основами між двома провідними поверхнями (дзеркалами), виконання даного рівняння особливо важливо, оскільки дозволяє точно визначити мінімальну висоту діелектричного диска, достатню для збудження в ньому мод ШГ. Виходячи із значення аксіального індексу l мод ШГ і використовуючи вираз (1.4) можна отримати мінімальне значення висоти H дискового ДР, необхідної для існування даної моди:

$$H = \frac{\pi(l+1)}{\sqrt{\varepsilon \frac{\omega^2}{c^2} - \beta^2}} \quad (1.5).$$

Легко помітити, що найменше значення висоти дискового ДР відповідає випадку, коли поперечна постійна поширення β близька до нуля. При $\beta = 0$ здійснюється перехід від об'ємних хвиль, окремим випадком яких є моди ШГ, до поверхневих [26]. Очевидно, що свого мінімального значення - $H_{\min}$, висота дискового ДР набуває для моди ШГ з аксіально однорідним розподілом поля ($l = 0$). Таким чином, мінімальне значення висоти дискового ДР визначається виразом:

$$H_{\min} = \frac{\pi}{\frac{\omega}{c}\sqrt{\varepsilon}} = \frac{\lambda_d}{2} \quad (1.6),$$

де λ_d – довжина хвилі в діелектричному матеріалі резонатора.

Очевидно, що в разі відкритого ДР вираз (1.6) визначає найменшу висоту діелектричного диска, достатню для виконання умови повного внутрішнього відбиття хвиль ШГ від його плоских сторін. При менших висотах резонатора поле робочих мод ШГ не формується через високі радіаційні втрати. Проведені раніше експериментальні дослідження тонких дискових ДР це цілком підтверджують [29, 47-50].

У роботах [29, 48-50, 152] було зроблено спроби збудження мод ШГ в тонких діелектричних дисках, висота яких менше граничної $H < H_{\min}$, яка визначається виразом (1.6). Було показано, що частково вирішити це завдання дозволяють композитні ДР, що складаються з набору тонких дисків. Збудження мод ШГ в них досягалося навіть при повітряних зазорах між їх плоскими основами. Однак перехід до таких багатоскладових структур приводив до збільшення геометричних їх

розмірів, а саме, висоти. Резонансне поле робочих мод ШГ в таких композитних структурах формувалося за рахунок електромагнітного зв'язку сусідніх тонких діелектричних дисків.

Очевидно, що можливості використання надтонких дискових ДР, висота яких є меншою ніж $H < H_{\min}$, для збудження в них мод ШГ до кінця не вичерпано. Основою для такого припущення є роботи по дослідженню планарних ліній передачі [51-57, 153]. У цих роботах було показано, що лінія, утворена тонким повітряним зазором між двома плоскими провідними поверхнями, поздовжні розміри яких багато більше робочої довжини хвилі, є ефективним хвилеводним каналом для передачі енергії електромагнітного поля. Для 8-мм діапазона довжин хвиль висота такої планарної лінії може складати всього кілька десятків мікрон. Поширення хвиль в таких тонких структурах є можливим завдяки виконанню умови повного внутрішнього відбиття хвиль від металевих стінок такої хвилеведучої лінії. Раніше було запропоновано використання планарних ліній передачі для ефективного збудження мод ШГ в екранованих ДР.

У даній роботі пропонується використання принципу планарних ліній для реалізації режиму збудження мод ШГ в надтонких дискових ДР, висота яких є за багато меншою за робочу довжину хвилі. Використання металевих поверхонь, розташованих на плоских основах тонкого діелектричного диска, за аналогією з подібними хвилеведучими лініями, забезпечує виконання умови повного внутрішнього відбиття хвиль. При цьому резонансне поле мод ШГ надтонкому діелектричному диску є обмеженим в аксіальному напрямку провідними поверхнями, а формування режиму мод ШГ є можливим завдяки виконанню резонансної умови щодо поширення хвиль уздовж його криволінійної поверхні. За аналогією з подібними хвилеведучими структурами для опису таких надтонких ДР будемо використовувати термін «планарний». Звернемо увагу на деяку невідповідність термінології в науковій літературі, зустрічається при описі дискових ДР. Як згадувалося раніше, для опису дискових ДР, висота яких може бути більше робочої довжини хвилі, в зарубіжній літературі використовують термін «planar». Ми під цим терміном будемо розуміти «надтонкий» в порівнянні з

робочою довжиною хвилі. Очевидно, що дана задача цікава не тільки з фундаментальної точки зору, через наукову новизну, а й має безпосереднє прикладне значення. Перехід до надтонких резонансних структур дозволить покращити масо-габаритні характеристики пристроїв мм хвиль резонансного типу.

Висновки до Розділу 1.

Проведений огляд результатів досліджень за даними літературних джерел дозволяє зробити висновок про необхідність проведення досліджень планарних резонансних структур на основі надтонких в порівнянні з робочою довжиною хвилі діелектричних дисків. Доцільність та привабливість таких досліджень продиктовані двома факторами. По-перше, подібні резонатори в режимі збудження робочих мод ШГ раніше не досліджувалися. По-друге, використання таких резонаторів може дозволити створити на їх основі пристрою резонансного типу з поліпшеними технічними характеристиками. Таким чином, завдання дослідження планарних ДР в режимі збудження робочих мод ШГ цікава, як з фундаментальної, так і прикладної точки зору. Його вирішенню присвячена дана дисертаційна робота.

РОЗДІЛ 2. ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНАРНОГО ДР ПРИ ЩІЛЬНОМУ ПРИЛІГАННІ ВІДБИВАЮЧИХ ПОВЕРХНЕЙ ДО ПЛОСКИХ ОСНОВ ДІЕЛЕКТРИЧНОГО ДИСКА.

2.1. Режим збудження мод ШГ в частково екранованому фторопластовому планарному ДР.

Розглянемо можливість реалізації режиму збудження мод ШГ в планарних дискових ДР, виготовлених з Фторопласту-4. Попередні роботи [32, 37, 52-57, 154, 155] з вивчення властивостей ДР різних форм з модами ШГ показали придатність даного матеріалу, який характеризується достатньо високою технологічністю і порівняно малими втратами енергії електромагнітного поля $\text{tg}\delta \approx 1,8 \times 10^{-4}$. Висота планарних ДР вибиралася відповідно до умов поставленого завдання, а саме меншою за половину робочої довжини хвилі в діелектрику $H < \lambda_d/2$. З урахуванням того, що відносна діелектрична проникність використовуваного діелектричного матеріалу становить $\epsilon = 2.08$, то висота тонкого диска як базової основи планарного ДР, в 8-мм діапазоні довжин хвиль повинна бути менше ніж $H < 2,76$ мм.

Даний розділ присвячено вивченню можливості ефективного збудження мод ШГ в планарних ДР. Основні результати опубліковано в роботах [60-62].

Об'єкт досліджень представлено на рис.2.1.

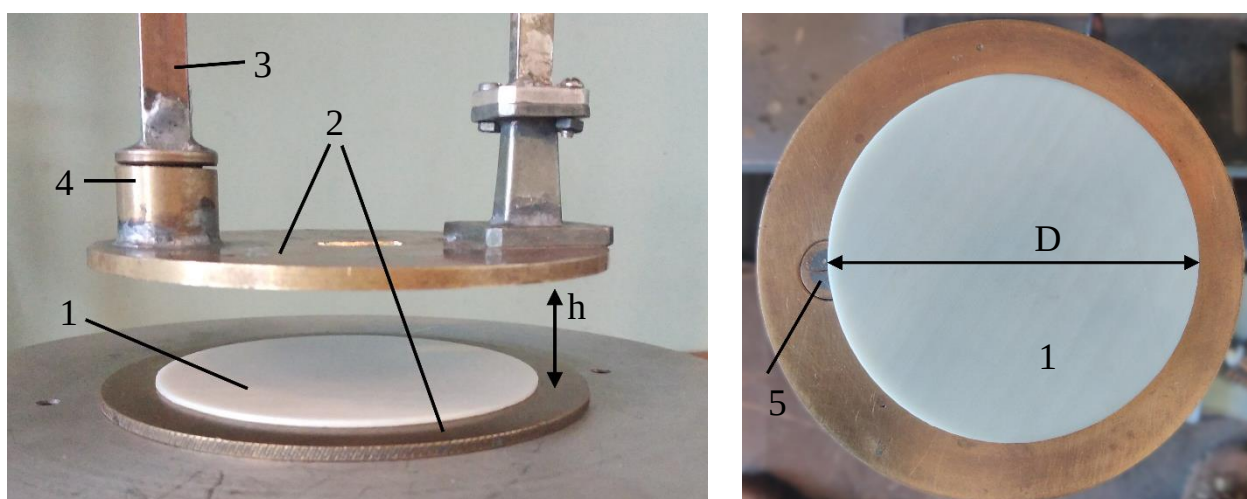


Рис. 2.1. Планарний ДР виготовлений із фторопласту.

Діелектричний диск 1, виготовлений із фторопласта-4 розташовувався між двома металевими дзеркалами таким чином, що останні щільно прилягали до його плоских основ. Диск мав діаметр $D = 78$ мм і висоту $H = 1$ мм. Таким чином, висота планарного ДР була навіть менша ніж чверть робочої довжини хвилі в діелектрику $H < \lambda_d/4$. Дзеркала виготовлялися з міді та мали круглу форму. Діаметр дзеркал перевершував діаметр діелектричного диска і становив 110 мм. З боку криволінійної поверхні тонкий фторопластовий диск був відкритий. Таким чином, має місце часткове екранування тонкого діелектричного диска провідними поверхнями у вигляді металевих дзеркал.

В основу запропонованого способу збудження був покладений принцип збудження коливань ШГ в класичних дискових ДР відкритим кінцем металевого хвилеводу з боку плоскої основи діелектричного диска [156, 157]. Звужений уздовж вузької стінки кінець стандартного металевого хвилеводу 3 розташовувався всередині металевої обойми 4, циліндричної форми з зовнішнім діаметром 13 мм. Одна з торцевих частин циліндричної обойми була частково металізована таким чином, що на її поверхні залишалася лише щілина зв'язку 5 (Рис. 2.1) прямокутної форми з розмірами $7,2 \times 0,5$ мм. Саме вона виконувала функції елемента збудження коливань ШГ в планарному ДР. Через круглий отвір з діаметром, рівним зовнішньому діаметру циліндричної обойми, елемент збудження розташовувався в одному з дзеркал. При цьому щілина зв'язку перебувала в площині металевого дзеркала. Грунтуючись на даних експериментальних досліджень, представлених в роботі [158], з метою підвищення ефективності збудження мод ШГ в діелектричному диску щілина зв'язку орієнтувалася на металевому дзеркалі таким чином, що її середина співпадала з краєм діелектричного диска. При цьому широка сторона щілини зв'язку була паралельна радіусу плоскої основи диска. Такий спосіб збудження забезпечує режим стоячої хвилі в ДР. При подібній орієнтації щілини зв'язку в дисковому ДР збуджуються гібридні коливання HE -поляризації.

Дослідження було проведено в смузі частот $31.0 \div 37.0$ ГГц. В експерименті вимірювання було проведено за допомогою панорамного вимірювача КСХН Я2Р-67. Досліджувалися частотні та енергетичні характеристики планарного ДР. Для

визначення резонансних частот було використано хвилемір на основі резонатора об'ємного типу з функцією перестроювання резонансного об'єму. Енергетичні характеристики представлено результатами визначення параметра зв'язку з планарним ДР, а також власної добротності резонатора. Систематична похибка визначення частот в експерименті не перевищувала 0,01%, власної добротності - 10%. Якісно оцінити ефективність збудження коливань ШГ в планарному ДР на різних резонансних частотах дозволяла залежність відносної амплітуди A_0/A_{max} (A_0 - поточне значення амплітуди, A_{max} - її найбільше значення) резонансного відгуку від відповідного значення азимутального індексу n відповідної моди ШГ.

Експериментальні дослідження в роботі було продубльовано комп'ютерним моделюванням, виконаним на основі стандартного програмного забезпечення CST Microwave Studio 2013. Комп'ютерне моделювання крім досліджень спектральних і енергетичних характеристик планарного ДР дозволяло отримати інформацію про розподіл в ньому полів коливань ШГ як уздовж радіуса діелектричного диска, так і за його висотою.

Розглянемо спектральні характеристики досліджуваного планарного резонатора. S -параметр, визначений розрахунковим шляхом, представлено на рис. 2.2.

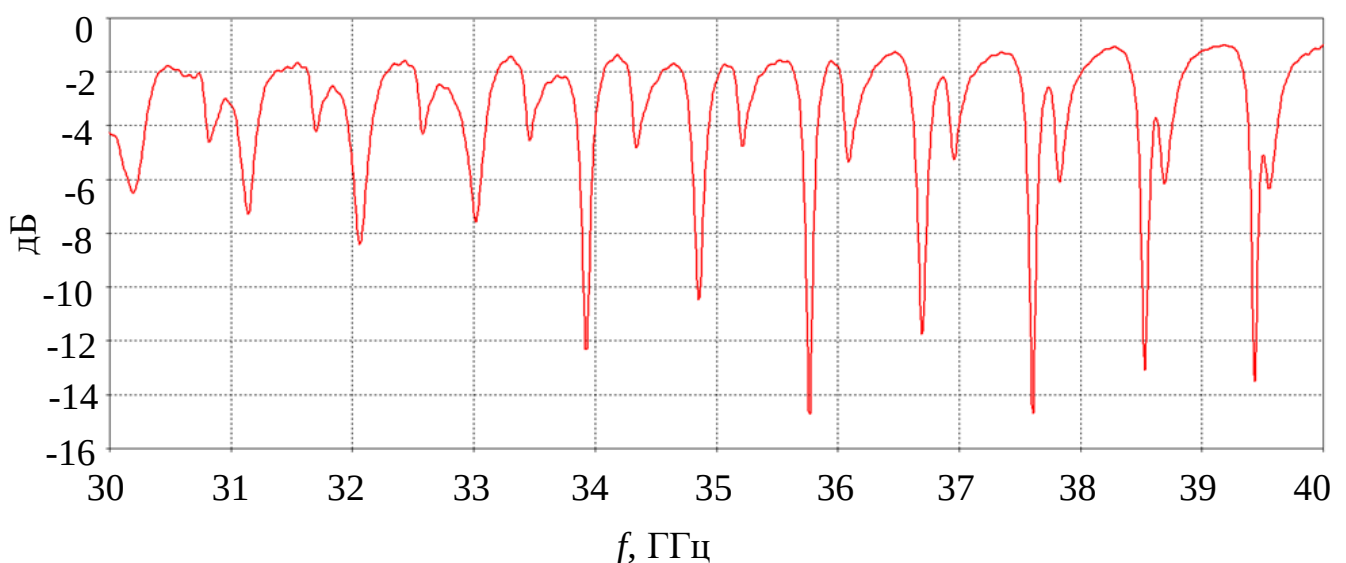


Рис.2.2 Розрахунковий S -параметр планарного дискового ДР з висотою $H = 1$ мм.

Видно, що спектр резонансних частот досліджуваного планарного дискового ДР порівняно розріджений. У ньому спостерігаються дві періодичні послідовності різних за амплітудою резонансних відгуків з близькими періодами $\delta f_n \approx 0,88$ ГГц. Відповідно до проведених досліджень розподілу резонансних полів було встановлено, що вони складають сітки резонансних частот мод ШГ з однієї і двома варіаціями поля уздовж радіальної координати (радіальний індекс $m = 1; 2$). У середині кожної сітки сусідні за шкалою частот резонансні відгуки відповідають модам ШГ, які відрізняються на одиницю значення азимутального індексу n . Резонансні відгуки нижчої радіальної моди з радіальним індексом $m = 1$ характеризуються більшою амплітудою, а отже і більшою ефективністю збудження. Розподіл полів нижчої радіальної моди ШГ і моди з радіальним індексом $m = 2$ показано на рис. 2.3. Для прикладу було обрано HE -мода ШГ з азимутним індексом $n = 37$.

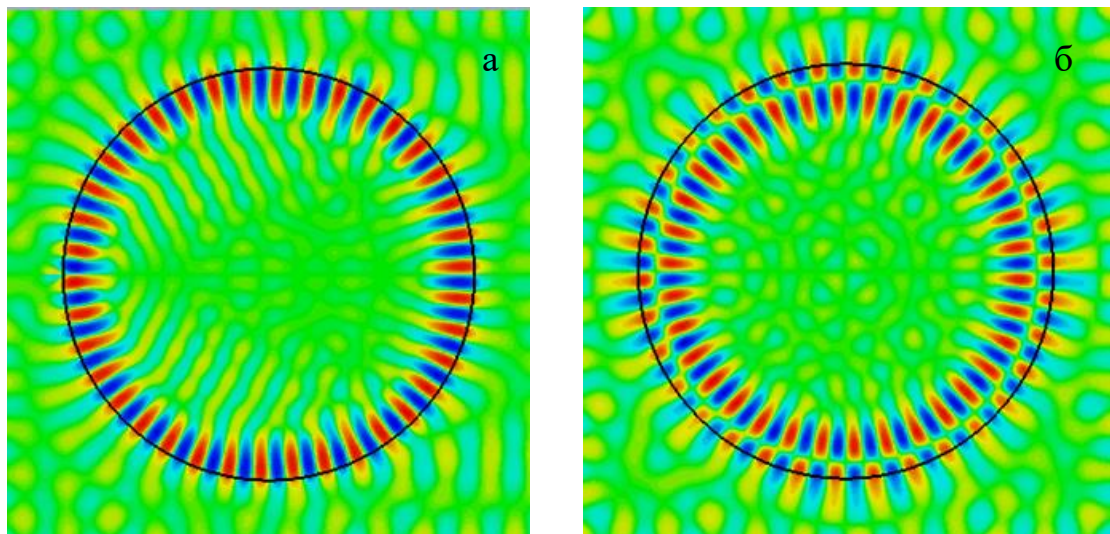


Рис. 2.3. Розподіл полів $HE_{37\ 1\ 0}$ (а) і $HE_{37\ 2\ 0}$ (б) мод ШГ в планарному ДР.

Для якісного порівняння розрахункового S -параметру з експериментом на рис.2.4 у вигляді спектрограми представлено спектральні характеристики дискового планарного ДР діаметром $D = 78$ мм в смузі частот $32,6 \div 35,6$ ГГц.

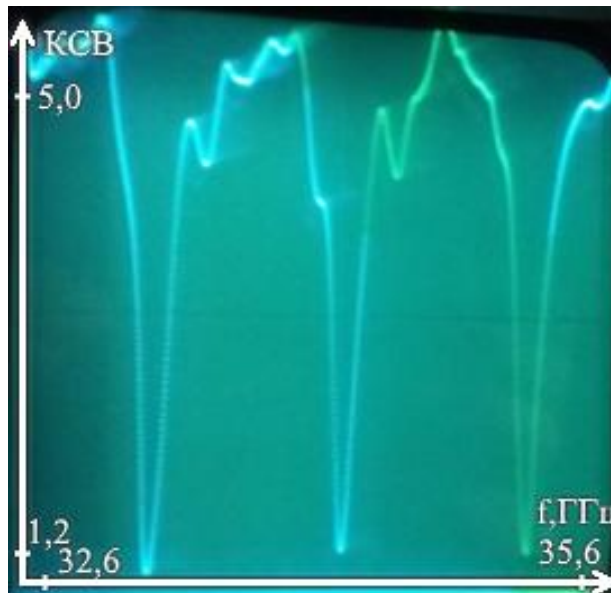


Рис. 2.4. Ділянка спектру фторопластового планарного ДР в режимі збудження мод ШГ щілиною зв'язку.

Видно якісну відповідність розрахункових і експериментальних результатів дослідження спектра фторопластового планарного ДР. Також як і при проведенні розрахунків, в експерименті спостерігаються дві сітки резонансних частот відповідні модам з суттєвою відмінністю амплітуд резонансних відгуків. Подібна картина резонансних відгуків в спектрах планарних ДР спостерігається у всьому досліджуваному діапазоні частот. Розбіжність між розрахунком і експериментом при визначенні резонансних частот не перевищує 50 МГц.

Результати комп'ютерного моделювання, вказують на те, що в проміжку між металевими дзеркалами розподіл резонансного поля коливань ШГ по висоті планарного ДР є однорідним, тобто при заданій радіальній і азимутальній координатах резонансне поле моди ШГ характеризується постійною амплітудою (інтенсивністю) уздовж висоти діелектричного диска. У цьому полягає один з основних принципів планарності тонких діелектричних резонансних структур. На відміну від планарних ДР, класичні ДР з більшими аксіальними розмірами характеризуються неоднорідним розподілом поля уздовж [26]. В їх спектрах присутні моди з аксіальним індексом, відмінним від нуля $l \geq 1$.

Таким чином, в спектрі планарного ДР присутні HE_{nml} -моди коливань ШГ, які характеризуються наступним набором азимутального n , радіального m і аксіального l індексів: $m = 1; 2$ і $l = 0$. Величина азимутального індексу визначається вибором резонансної частоти і в досліджуваному діапазоні частот знаходиться в інтервалі значень $n = 31 \div 37$.

На високу ефективність збудження нижчої радіальної моди ШГ ($m = 1$) в планарному ДР у всьому досліджуваному діапазоні частот вказують дані, представлені на рис. 2.5 у вигляді залежності відносної амплітуди A_0/A_{max} резонансних відгуків від значення відповідних їм азимутальних індексів n .

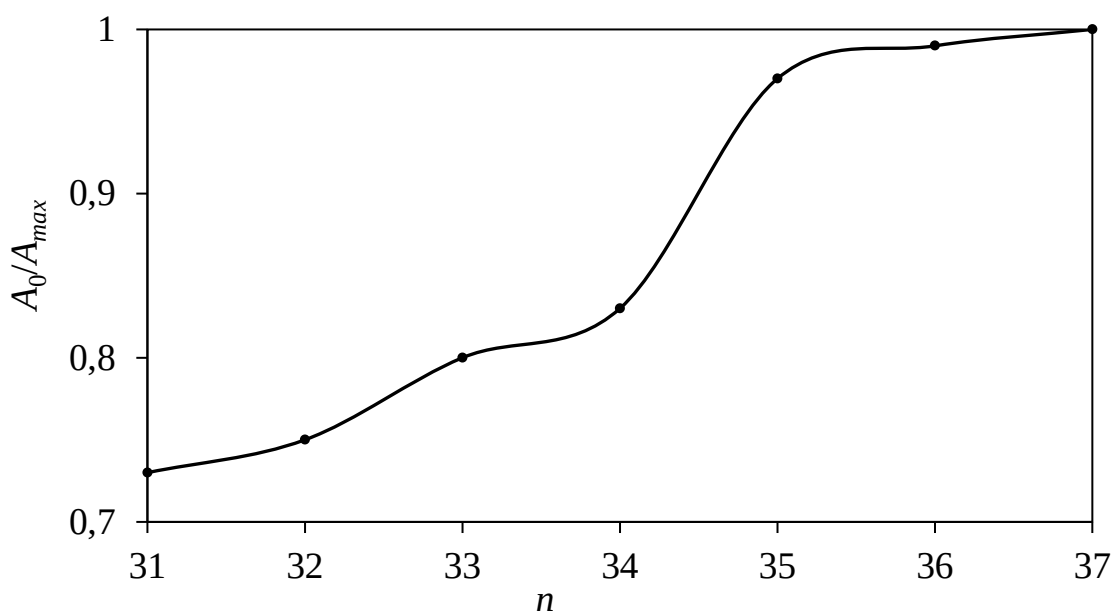


Рис. 2.5. Залежність відносної амплітуди резонансних відгуків від азимутального індексу мод ШГ.

Видно, що у всьому досліджуваному діапазоні частот зберігається висока ефективність збудження мод ШГ з тенденцією зростання амплітуди резонансного відгуку при підвищенні їх азимутального індексу (резонансної частоти). Це пояснюється тим, що зі зростанням азимутального індексу (частоти) поля мод ШГ локалізуються в області, що ближче прилягає до криволінійної поверхні резонатора, саме в тій області, де розташовується елемент збудження - щілина зв'язку. При цьому інтенсивність резонансних полів в області розташування щілини зв'язку зростає, що саме й забезпечує ефективний електромагнітний зв'язок з

планарним ДР. Необхідно зазначити, що висока ефективність збудження коливань в планарному ДР щілиною зв'язку супроводжується високими значеннями параметра зв'язку. Про це свідчать результати дослідження залежності параметра зв'язку p від азимутального індексу n мод ШГ (рис. 2.6).

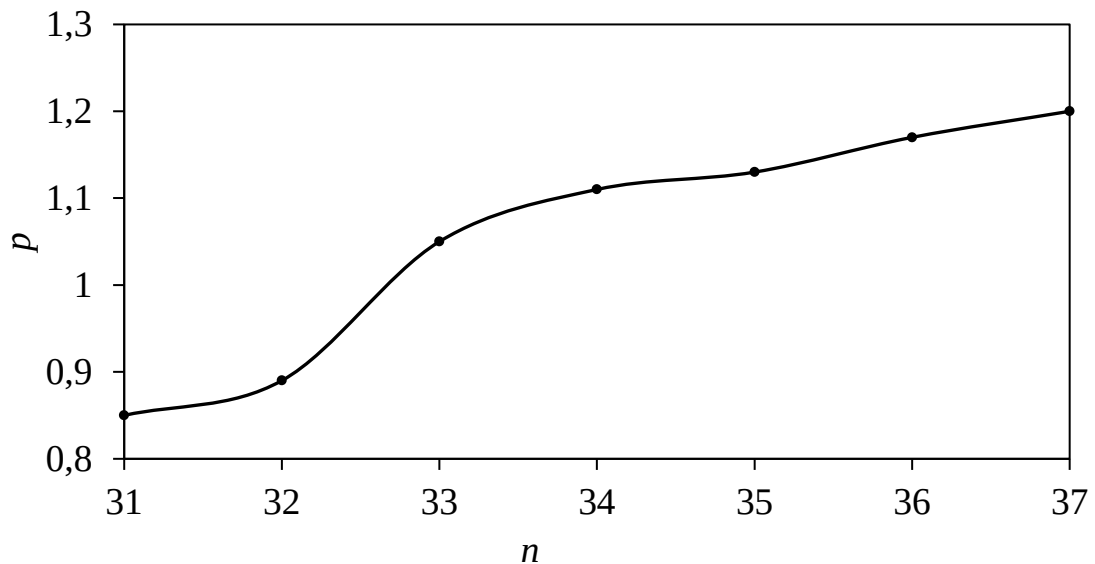


Рис. 2.6. Залежність параметра зв'язку від азимутального індексу мод ШГ.

Видно, що в більшій частині досліджуваного діапазону частот досягається режим сильного закритичного ($p > 1$) зв'язку між планарним ДР і щілиною зв'язку. Це пояснюється високою інтенсивністю резонансного поля (електричної компоненти), розташованого всередині тонкого шару діелектрика між двома металевими дзеркалами резонатора. Причиною цього є однорідний розподіл полів мод ШГ уздовж аксіальної координати ($l = 0$). На відміну від класичних ДР з неоднорідним розподілом поля, постійність інтенсивності поля планарного ДР уздовж аксіальної координати дозволяє досягати її максимальних значень поблизу плоскої межі тонкого диска, а саме, в області розташування елемента зв'язку. Таким чином, досягається сильний електромагнітний зв'язок елемента збудження з полями робочих мод ШГ в планарному ДР. За аналогією з амплітудними характеристиками спостерігається тенденція зростання параметра зв'язку зі збільшенням азимутального індексу мод коливань (частоти) (Рис. 2.6).

Необхідно відзначити, що при появі мінімального за висотою повітряного зазору (кілька десятків мкм) між діелектричним диском і одним з дзеркал параметр зв'язку і амплітуда резонансних відгуків суттєво знижуються. Причиною цього, є нестабільність форми (гнучкість) надтонкого фторопластового диска у вільному стані. Щільне стиснення фторопластового диска металевими дзеркалами запобігає викривленню його форми. Тому, в системі з щільно притиснутими металевими дзеркалами до плоских підставах тонкого диска, досягається режим ефективного збудження мод ШГ з високим параметром зв'язку.

Найбільш інформативною енергетичною характеристикою планарного ДР є його власна добротність. На рис. 2.7 показано результати дослідження залежності власної добротності Q_0 планарного ДР від азимутального індексу n мод ШГ.

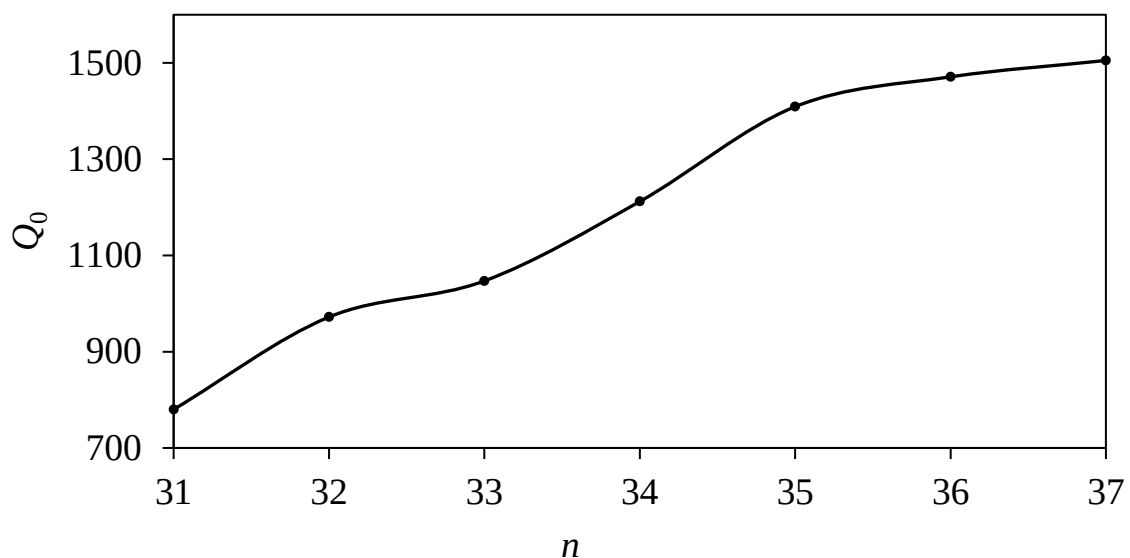


Рис. 2.7. Залежність власної добротності планарного ДР від азимутального індексу мод ШГ.

З Рис. 2.7 видно, що власна добротність планарного ДР є відносно невеликою. В досліджуваному діапазоні частот її значення не перевищує $Q_0 \leq 1600$. Отримані результати добре узгоджуються з даними про порівняно невисоку добротність планарних ДР, що використовуються в НВЧ-діапазоні. Так в роботі [33] було показано, що, планарний резонатор, виготовлений з кераміки за LTCC-технологією, має добротністю, що дорівнює 1000. Спостережувана тенденція

зростання власної добротності зі збільшенням азимутального індексу мод ШГ пояснюється зниженням радіаційних втрат при випромінюванні з боку криволінійної поверхні діелектричного диска і відповідає уявленню про поведінку добротності класичних ДР.

На користь вірності раніше висловлених припущень про те, що необхідною умовою існування мод ШГ в тонких діелектричних дисках є наявність відбиваючих поверхонь на його плоских основах, свідчать результати проведених розрахункових досліджень (комп'ютерного моделювання) планарних ДР різними за висотою. Ними встановлено, що моди ШГ ефективно збуджувалися щільною зв'язку в діелектричних дисках, висота яких навіть на два порядки менше за робочою довжиною хвилі $H < 0,01\lambda_d$. Так, у фторопластовому планарному ДР з висотою $H = 0,05$ мм моди ШГ збуджуються з достатньо високою ефективністю. На Рис. 2.8 показано характерний до мод ШГ розподіл резонансних полів в планарному ДР з висотою $H = 0,05$ мм на різних частотах.

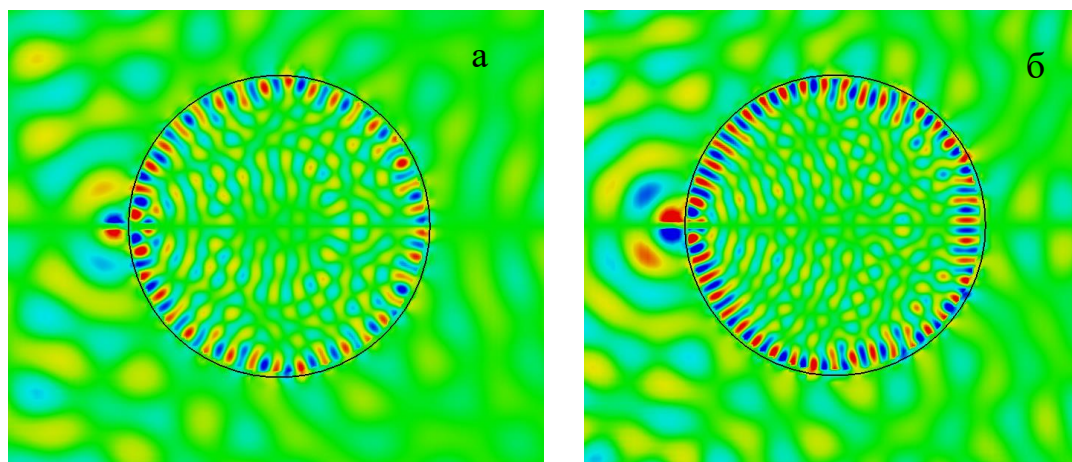


Рис. 2.8. Розподіл полів мод ШГ у фторопластовому планарному ДР з висотою 0,05 мм на частотах 32,24 ГГц (а) і 37,18 ГГц (б).

На рис. 2.9 показано S -параметр такого резонатора. Встановлено, що модовий склад спектра планарного ДР в обраному діапазоні частот при зміні його висоти, принципово змінюється. Результати дослідження модового складу спектрів планарних ДР і їх залежність від геометричних параметрів резонаторів буде розглянуто в Розділі 3.

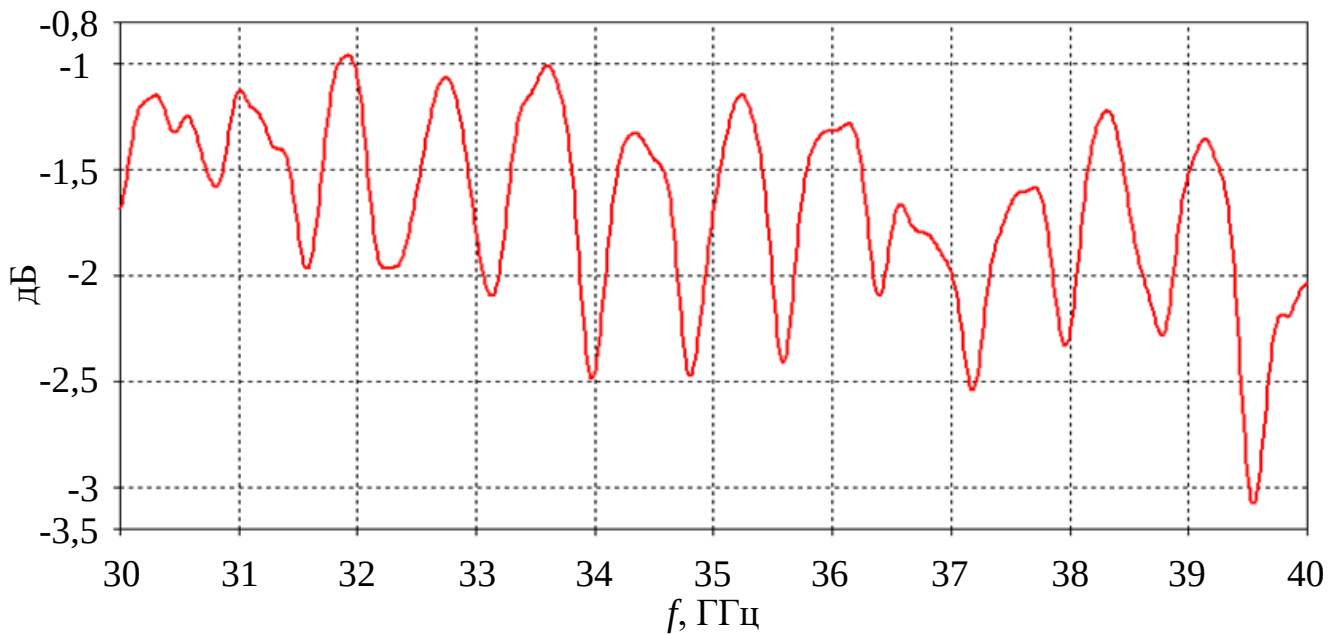


Рис. 2.9. S -параметр планарного ДР на основі фторопластового диска з висотою 0,05 мм.

При зменшенні висоти резонатора спостерігається зниження резонансних частот мод ШГ з фіксованим набором модальних індексів і зниження ефективності їх збудження. Так при переході від розглянутого в даній роботі планарного ДР з $H = 1$ мм до резонатора з висотою $H = 0,05$ мм резонансна частота HE_{3310} -моди зменшується на 530 МГц, при цьому амплітуда резонансного відгуку знижується більш ніж в 2 рази.

Очевидно, що головним фактором, що впливає на величину добротності планарних ДР, є значення імпедансу металевих покриттів дзеркал. Крім того важливими є втрати в матеріалі діелектрика. У зв'язку з цим для підвищення добротності планарних ДР за доцільне надалі є використання металевих дзеркал з малим імпедансом, і діелектричного матеріалу, що характеризується малими втратами. Для зменшення розмірів ДР перспективним є використання діелектриків з високим значенням діелектричної постійної.

Головним висновком при аналізі отриманих результатів є можливість ефективного збудження мод ШГ в планарних ДР. Це пояснюється тим, що в

планарних ДР з металевими дзеркалами виконується умова повного внутрішнього відбиття хвиль уздовж висоти тонкого в порівнянні з довжиною хвилі діелектричного диска за рахунок наявності металічних поверхонь, що покривають його плоскі основи. На відміну від запропонованих планарних ДР в подібних відкритих резонаторах з малою висотою $H < \lambda_d/2$ поле робочих мод ШГ не формується через невиконання умови повного внутрішнього відбиття. Іншими словами, резонансне поле мод ШГ в планарних ДР обмежена провідними поверхнями в аксіальному напрямку, а вздовж азимутальної координати резонансні властивості таких структур визначаються виконанням умови повного внутрішнього відбиття хвиль ШГ від внутрішньої криволінійної поверхні планарного диска. Вектор напруженості електричного поля мод ШГ спрямований перпендикулярно площині металевих дзеркал.

2.2. Порівняння характеристик планарного ДР зі спектральними та енергетичними характеристиками класичних дискових ДР.

Як було показано в п. 2.1, одним з основних відмінних ознак планарних резонансних діелектричних структур від класичних дискових ДР з позиції електродинаміки є характер розподілу резонансного поля мод ШГ уздовж аксіальної координати. На відміну від планарних ДР, в яких в силу малої висоти діелектричного диска поля мод ШГ характеризуються однорідним розподілом поля по висоті тонкого диска (радіальний індекс $l = 0$), поля мод ШГ в класичних ДР з більшою висотою мають аксіально неоднорідний розподіл поля ($l \geq 1$). Вивченню електродинамічних характеристик останніх присвячена велика кількість наукових робіт і в даний час вони добре відомі. Для з'ясування особливостей електродинамічних характеристик досліджуваних тонких планарних ДР викликає інтерес порівняння їх з характеристиками класичних ДР, що відрізняються лише за висотою діелектричного диска.

З цією метою було проведено експериментальні і теоретичні дослідження (CST Microwave Studio) планарного дискового ДР, виготовленого з Фторопласта-4 з діаметром $D = 78$ мм і висотою $H_1 = 1$ мм, і класичного дискового ДР,

виготовленого з того ж матеріалу з тим же діаметром і має висоту $H_2 = 7,2$ мм. Обидві діелектричні резонансні структури досліджувалися як у відкритому стані, так і при екрануванні плоских поверхонь дисків латунними дзеркалами. При покритті плоских поверхонь дисків провідними поверхнями для збудження мод ШГ в них використовувалася щілина зв'язку в одному з металевих дзеркал.



Рис. 2.10. Досліджувані планарний і класичний фторопластові ДР.

Спосіб збудження мод ШГ в частково екранованому ДР було представлено в п. 2.1. У разі дослідження відкритих ДР для збудження мод ШГ використовувалася зв'язок з відкритим кінцем звуженого металевого хвильоводу $7,2 \times 0,5$ мм. За аналогією зі щілинами зв'язку відкритий кінець хвильоводу розташовувався на краю диска таким чином, що його середина співпадала з краєм диска. Широка стінка хвильоводу орієнтувалася паралельно радіусу плоскої основи диска, що забезпечувало збудження в резонаторі *HE*-мод ШГ.

Для кожного резонатора досліджувався набір резонансних частот, який зіставлявся з модовим складом збуджуваних коливань. Відкритий характер класичних ДР дозволяв ідентифікувати збуджувані моди ШГ не тільки за допомогою комп'ютерного моделювання, а й експериментальним шляхом. Для цього використовувався метод малої збурюючої неоднорідності [59], яка виконувала функції пробного зонда.

До числа досліджуваних енергетичних характеристик планарного і класичних ДР слід віднести поведінку параметра зв'язку і власної добротності, а саме, їх залежність від азимутального індексу мод ШГ (частотна залежність).

Важливим результатом проведених досліджень є те, що на відміну від класичних ДР, в планарному ДР, що знаходиться у відкритому стані (без провідного покриття плоских поверхонь) моди ШГ не збуджуються, що було встановлено як розрахунковим, так і експериментальним шляхом. Таким чином, це є підтвердженням раніше проведених досліджень тонких діелектричних дисків в режимі збудження мод ШГ [47, 49].

Порівняння результатів дослідження спектральних характеристик планарного і частково екранованого класичного ДР показали, що в досліджуваному діапазоні частот 31 - 38 ГГц збуджувані в них моди ШГ характеризуються однаковим набором азимутального і радіального індексів. Відмінності резонансних частот мод ШГ з однаковими азимутними і радіальними індексами, збуджуваними в цих резонаторах, не перевищує 120 МГц. При цьому періоди сіток резонансних частот мод ШГ з однаковими радіальними індексами, збуджуваних в планарному і класичному ДР є близькими. Їх усереднені значення складають $\delta f_{n1} = 0,88$ ГГц і $\delta f_{n2} = 0,92$ ГГц, відповідно.

Про ефективність збудження мод ШГ в досліджуваних резонаторах можна судити з поведінки відносної амплітуди резонансних відгуків в обраному діапазоні частот. На рис. 2.11 представлено частотну залежність амплітуди резонансних відгуків, приведених до їх максимального значення A_0/A_{max} , відповідних модам ШГ, які збуджуються в планарному (суцільна крива) і частково екранованому класичному (пунктир) ДР.

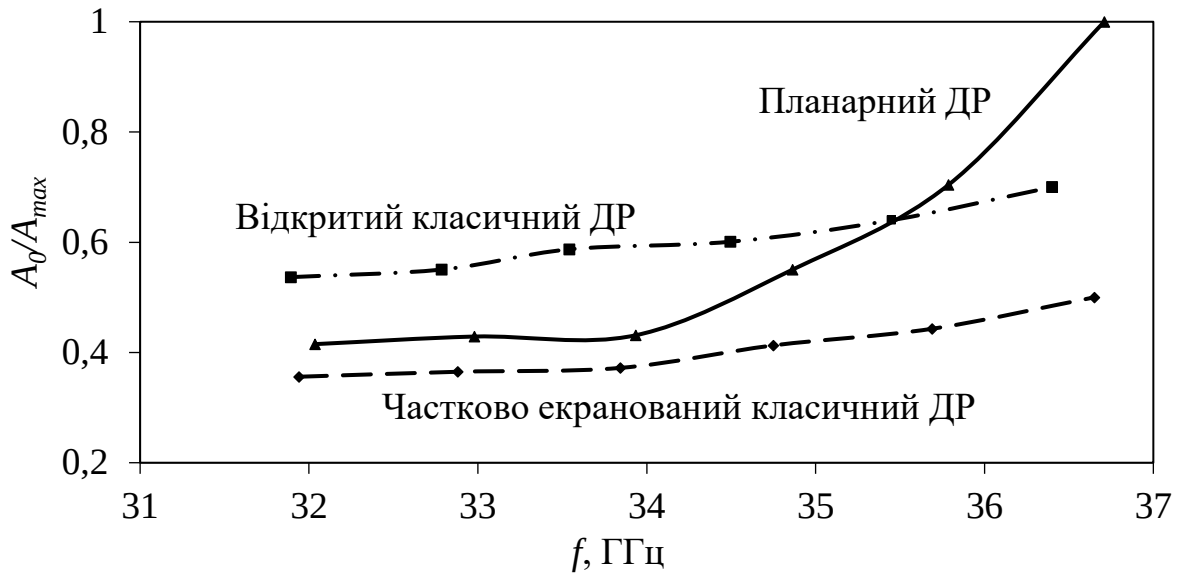


Рис. 2.11. Частотна залежність відносної амплітуди резонансних відгуків мод ШГ в планарному і класичному ДР.

Для порівняння штрих-пунктиром на рис. 2.11 показано поведінку частотної залежності амплітуд резонансних відгуків мод ШГ у відкритому класичному ДР.

З рис. 2.11 видно, що у всьому досліджуваному діапазоні частот для всіх розглянутих резонаторів при підвищенні частоти (азимутального індексу) спостерігається зростання амплітуди резонансних відгуків, що свідчить про збільшення ефективності збудження мод ШГ. При цьому, в смузі частот 31-34 ГГц значення амплітуд резонансних відгуків в планарному і частково екранованому класичному ДР близькі. Однак, в високочастотній області обраного діапазону, на частотах, вище 34 ГГц, для планарного ДР спостерігається їх стрімке зростання на відміну від більш монотонного зростання амплітуд резонансних відгуків мод ШГ класичного ДР. Це свідчить про те, що при зменшенні робочої довжини хвилі ефективність збудження мод ШГ в планарному ДР значно підвищується.

Порівняння результатів дослідження амплітуд резонансних відгуків в класичному частково екранованому і відкритому ДР показує, що екранування дискової діелектричної структури плоскими металевими дзеркалами призводить до зниження ефективності збудження мод ШГ. Раніше подібний ефект спостерігався при дослідженнях екранованих класичних ДР з модами ШГ [159].

Однією з найбільш цікавих енергетичних характеристик ДР, що мають безпосереднє прикладне значення, є поведінка параметра зв'язку з резонансними полями робочих мод ШГ. Частотну залежність параметра зв'язку p при збудженні мод ШГ в планарному і частково екранованому класичному ДР показано на рис. 2.12.

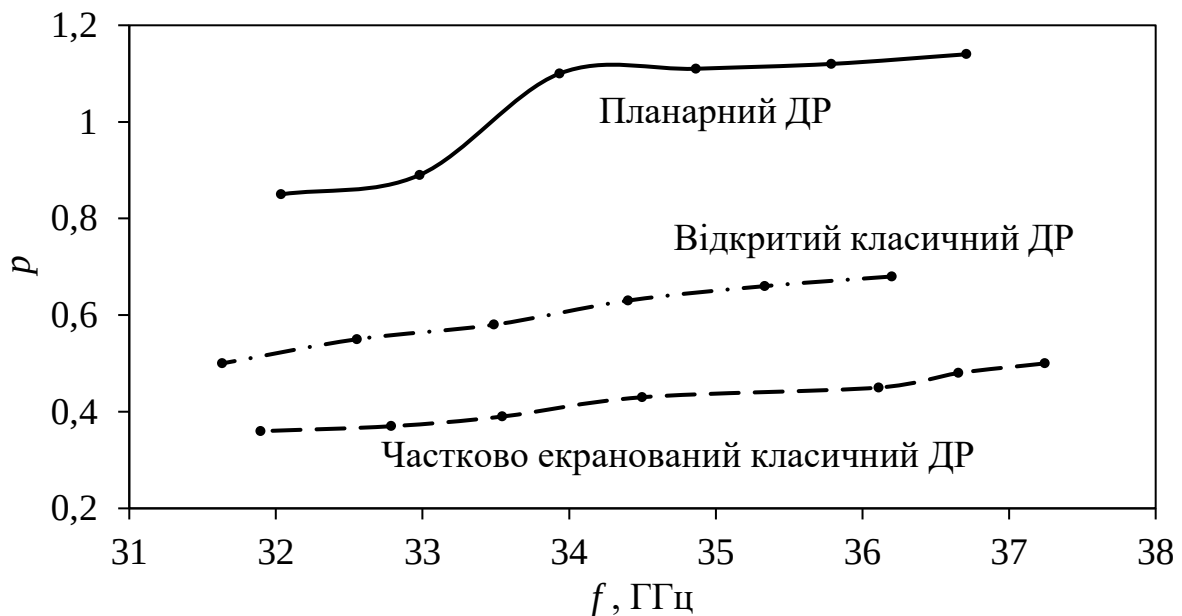


Рис. 2.12. Частотна залежність параметру зв'язку з полями робочих мод ШГ в планарному та класичному ДР.

Для порівняння на рис. 2.12 представлено дані про поведінку параметра зв'язку з класичним відкритим ДР (штрих-пунктир). З рис. 2.12 видно, що у всьому досліджуваному діапазоні частот з планарним ДР досягається сильніший ефективний електромагнітний зв'язок у порівнянні з класичними ДР. При цьому в більшій частині діапазону з планарним ДР спостерігається закритичний зв'язок, при якому $p > 1$, що має велике значення при подальшому використанні такого резонатора в активних пристроях мм діапазону довжин хвиль. Як зазначалося в п.2.1, основною причиною такого сильного зв'язку є однорідний розподіл резонансного поля мод ШГ в аксіальному напрямку. При цьому з ростом частоти спостерігається зростання параметра зв'язку. Видно, що на відміну від запропонованого планарного ДР з полями мод ШГ в класичних ДР досягається

більш слабкий зв'язок, при якій параметр зв'язку $p < 1$. Екранування плоских основ класичних ДР металевими дзеркалами призводить до зниження параметра зв'язку з ними.

Оцінити власні втрати енергії на резонансних частотах планарного ДР і порівняти їх з втратами енергії в подібних класичних ДР дозволяє частотна залежність власної добротності. Її поведінку на різних частотах для планарного (суцільна лінія) і частково екранованого класичного (пунктир) ДР показано на рис. 2.13. Для порівняння на рис. 2.13 штрих-пунктиром показано поведінку власної добротності відкритого класичного ДР.

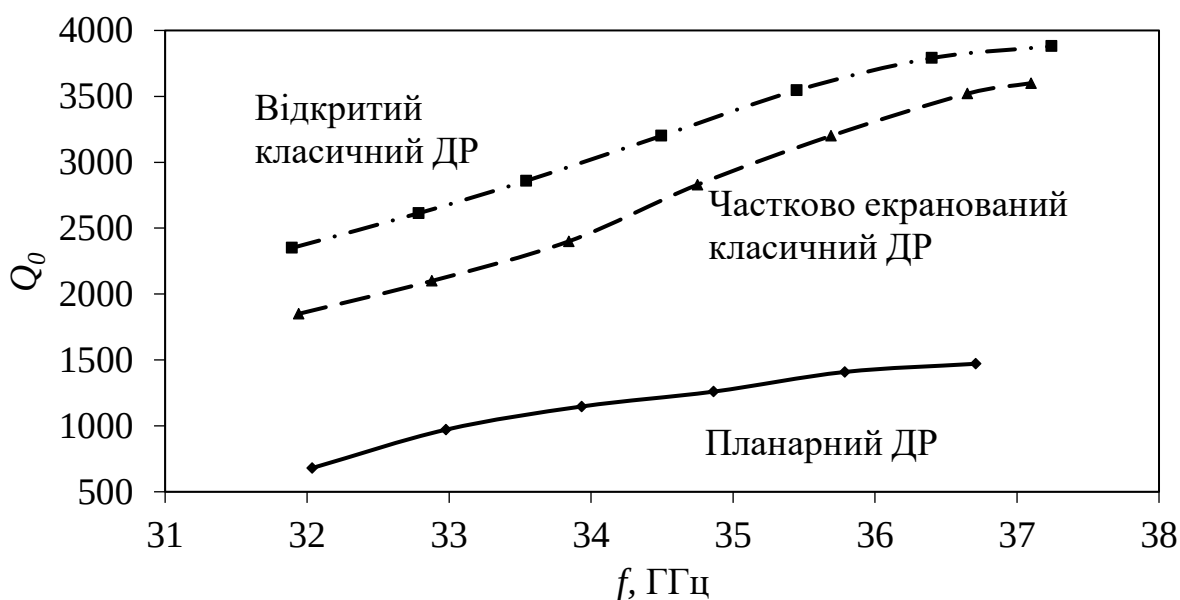


Рис. 2.13. Частотна залежність власної добротності планарного і класичних ДР.

З рис. 2.13 видно, що в порівнянні з планарним ДР, класичні фторопластові дискові резонатори мають більш високу добротність. Її найбільше значення для відкритого класичного ДР досягає $Q_0 \approx 3900$, в той час як для планарного ДР її значення не перевищує $Q_0 \leq 1500$. Як зазначалося в п.2.1, основною причиною порівняно низької власної добротності планарного ДР є високі омичні втрати в провідних поверхнях (металевих дзеркалах), що покривають плоскі сторони тонкого діелектричного диска. Надалі в даній роботі будуть запропоновані шляхи підвищення власної добротності планарних ДР.

Видно, що за аналогією з поведінкою власної добротності добре відомих класичних ДР [26, 32], для планарного ДР з ростом частоти спостерігається збільшення власної добротності, що головним чином пов'язане зі зниженням радіаційних втрат з боку відкритої поверхні тонкого діелектричного диска.

Таким чином, проведеними дослідженнями встановлено, що, незважаючи на відносно невисоку власну добротність, в порівнянні з класичними дисковими ДР, ефективність збудження робочих мод ШГ в планарному ДР, характеризується більш високими значеннями параметра зв'язку (закритичного зв'язку). Це робить перспективним використання тонких діелектричних резонансних структур в малогабаритних активних пристроях мм діапазону довжин хвиль.

2.3. Підвищення власної добротності дискових ДР. Класичний дисковий ДР в напівсферичному екрані.

В п.п. 2.1 і 2.2 зазначалося, що незважаючи на очевидні переваги планарних ДР перед подібними класичними резонаторами, головними з яких є висока ефективність зв'язку і малі розміри, їх основним недоліком є порівняно невисока добротність. Причиною цього є високі втрати в металевих дзеркалах, що покривають плоскі основи тонкого діелектричного диска, і діелектричні втрати, обумовлені переважною локалізацією полів робочих мод в діелектричному матеріалі резонатора.

Для вирішення завдання зниження діелектричних втрат в даній роботі пропонується використання металевого екрана з боку криволінійної поверхні дискового ДР. Основою для проведення таких досліджень є раніше проведені дослідження, спрямовані на підвищення власної добротності напівкульового ДР в режимі збудження мод ШГ і дискових ДР в режимі збудження нижчих типів коливань [17]. У цих роботах було показано, що при певному співвідношенні радіусів діелектричної резонансної структури і металевого екрану вдається істотно знизити втрати в матеріалі діелектрика за рахунок часткового зміщення резонансного поля в повітряний зазор між діелектричною структурою і металевим екраном. При цьому омичні втрати на стінках екрану є незначними в силу малої

інтенсивності поля на межі розділу повітря-метал. Ґрунтуючись на цих даних, в даній роботі було запропоновано використання металевого екрана з боку циліндричної поверхні дискового ДР.

Для підтвердження очікуваного ефекту підвищення добротності на початковому етапі було запропоновано використання класичного ДР через його більш високу добротність у порівнянні з планарним ДР (п. 2.1).

На рис. 2.14 показано об'єкт експериментальних досліджень, що представляє собою діелектричний диск 1, розташований в напівсферичному металевому екрані 2 таким чином, що одна з основ диска знаходилася в площині перетину металевої сфери. Диск був виготовлений з фторопласту-4 з діелектричною проникністю $\varepsilon = 2,08$ і тангенсом кута діелектричних втрат $\operatorname{tg}\delta = 1,7 \cdot 10^{-4}$. Висота H і радіус R_1 діелектричного диска складали 7,2 мм і 39 мм, відповідно.

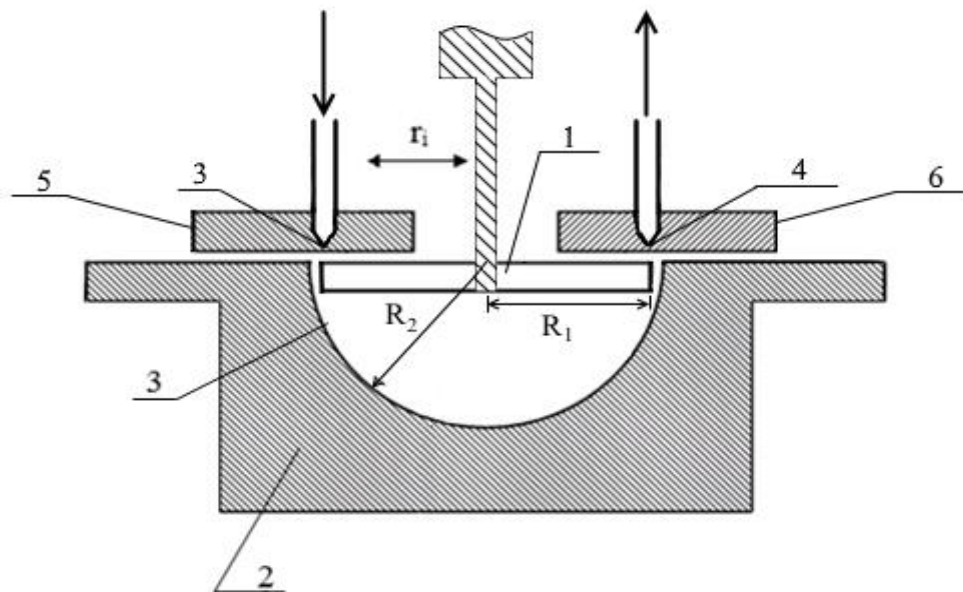


Рис. 2.14. Об'єкт експериментальних досліджень.

Екран з алюмінію мав радіус напівсферичної порожнини $R_2 = 42$ мм. Слід очікувати, що відмінність в класах симетрії діелектричного диска і металевого екрану суттєво не впливатиме на основні електродинамічні характеристики резонатора в цілому. У той же час спектр коливань такої резонансної системи повинен бути більш розрідженим [160]. Цього не можна сказати, якби був обраний

екран циліндричної форми [161]. Раніше проведені дослідження екранованих напівсферичних ДР резонаторів з екранами, що мають сферичну форму поверхні, визначили вибір радіусів діелектричного елемента резонатора 1 розглянутого в даній роботі, і його екрану [162-166].

Збудження мод ШГ в екранованому ДР здійснювалось за допомогою методу, запропонованого в роботі [162]. Для цього використовувався металевий прямокутний хвилевід 3 (Рис. 2.14) з поперечними розмірами $7,2 \times 3,4$ мм, звужений уздовж вузької стінки до перетину $7,2 \times 0,5$ мм. Згідно рис. 2.14 збудження мод ШГ в екранованому ДР здійснювалося з боку плоскої сторони діелектричного диска. При цьому для підвищення ефективності збудження, як показано в роботі [158], поздовжня вісь хвилеводу розташовувалася перпендикулярно плоскій основі диска. Вісь обертання диска знаходилась в площині, що проходить через середини вузьких стінок хвилеводів. Відстань від осі обертання диска до центрів випромінюючого і приймального хвилеводів становило $a \approx R_1$, тобто центри обох хвилеводів розташовуються над краєм основи діелектричного диска. При такому способі збудження в резонаторі пріорітетно збуджуються гібридні моди *HE* - поляризації. Розглянутий в роботі спосіб збудження мод ШГ в дискових ДР відрізняється від раніше відомих [156-158]. По-перше, резонатор включається за схемою «на прохід». Для цього однакові за геометричними розмірами елементи збудження 3 і виведення енергії 4 (Рис. 2.14) з розмірами $7,2 \times 0,5$ мм були розташовані в плоских металевих дзеркалах 5 і 6 прямокутної форми. Така схема збудження багатомодового екранованого резонатора дозволяє здійснювати селекцію мод ШГ за рахунок зміни положення хвилеводу відносно краю діелектричного диска [167]. Використання плоских дзеркал дозволяло з високою точністю орієнтувати осі хвилеводів перпендикулярно плоскій основі діелектричного диска. Розміри плоских дзеркал становили 55×50 мм. Їх положення вибиралося таким чином, щоб зменшити радіаційні втрати робочої моди ШГ дискового резонатора. Моди інших типів [168, 169], поля яких локалізовані ближче до осі резонатора, не збуджувались, оскільки ефективність їх збудження є малою через високі радіаційні втрати.

По-друге, елементи збудження і виведення енергії були рухливі уздовж радіуса плоскої основи диска. Це дозволило, з одного боку, регулювати величину зв'язку, а з іншого боку, з'явилася можливість досліджувати вплив величини зв'язку на спектральні і енергетичні характеристики резонатора. Раніше було показано, що величина зв'язку може суттєво впливати на електродинамічні характеристики резонатора в режимі збудження мод ШГ [32, 170, 171].

Дослідження було проведено в смузі частот $27,5 \div 37,5$ ГГц. Вимірювалися резонансні частоти збуджуваних HE_{nml} мод і послаблення сигналу на виході резонатора. За одержаними даними визначалися значення навантаженої добротності за рівнем -3дБ щодо центральної частоти резонансу і коефіцієнта передачі у відносних одиницях. Для його визначення поточна амплітуда A_0 вихідного сигналу в дБ на резонансній частоті була нормована на максимальне значення амплітуди A_{max} , отриману при переміщенні елемента збудження вздовж радіальної координати r_i . В роботі дану залежність представлено у відносних одиницях у вигляді $A_0 / A_{max} = \psi(r_i / R_2)$. Положення середини поперечного перерізу елемента виведення енергії фіксувалося на краю плоскої основи диска в точці з відносною радіальною координатою $r_0 / R_2 \approx 0,93$. Експериментальні дослідження енергетичних характеристик такого двошарового екранованого резонатора було проведено за допомогою аналізатора ланцюгів Pna - L Network Analyzer N5230a 10MHz $\div$ 40GHz Aglient Technologies. Спектральні характеристики досліджуваного резонатора спостерігалися на екрані панорамного вимірювача КСХН Р2-65. Моді, що збуджувались в екранованому ДР, ідентифікувалися шляхом вивчення розподілу електричної компоненти резонансного поля уздовж радіальної координати. Для цього було проведено експериментальні дослідження та комп'ютерне моделювання, виконане на основі стандартного програмного забезпечення CST Microwave Studio 2013. Уявлення про радіальний розподіл резонансного поля збуджуваних мод ШГ дозволяла отримати залежність відносної амплітуди A_0 / A_{max} вихідного сигналу на резонансній частоті від відносної радіальної координати r_0 / R_2 середини відкритого кінця хвилеводу виведення

енергії при фіксованій радіальній координаті елемента збудження $r_i/R_2 \approx 0,93$ (на краю діелектричного диска).

Свідченням розрідженості спектра коливань досліджуваного екранованого резонатора у порівнянні з резонатором на основі діелектричної напівкулі є спектрограми, представлені на рис 2.15. Диск і напівкуля мали однаковий діаметр і були виконані з одного матеріалу. На рис. 2.15а показано ділянку спектра екранованого дискового резонатора, а на рис. 2.15б - напівсферичного екранованого ДР.

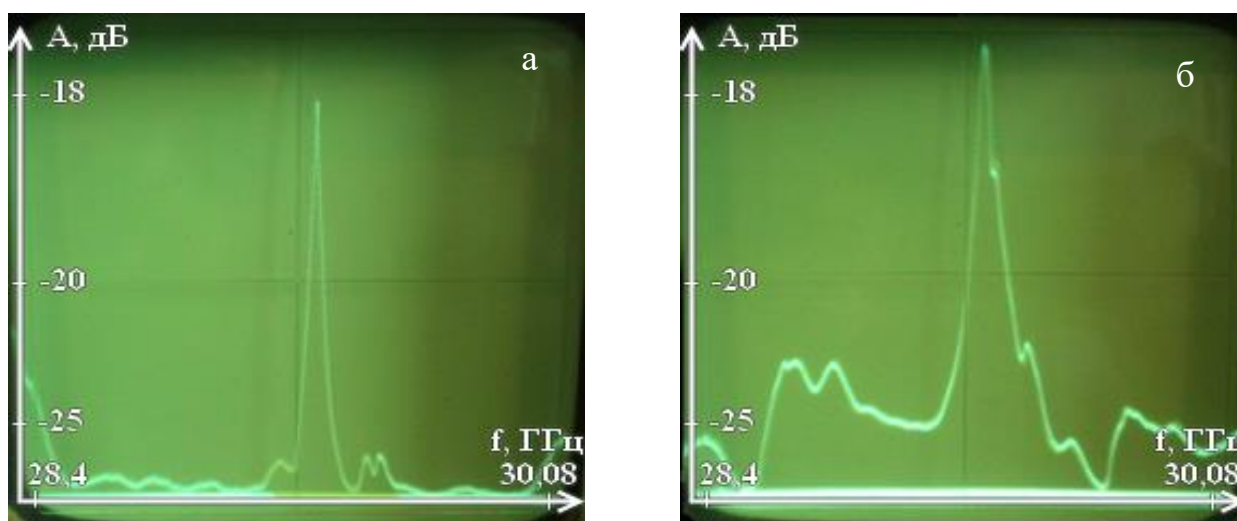


Рис. 2.15. Ділянки спектрів коливань двошарових екранованих ДР на основі діелектричних диска (а) і напівкулі (б).

Видно, що спектр екранованого резонатора на основі діелектричного диска більш розріджений у порівнянні з напівсферичним екранованим ДР. Це свідчить про правомірність зробленого вище припущення, що дисковий ДР в напівсферичним металевому екрані повинен мати більш розріджений спектр коливань, ніж напівсферичний резонатор.

Як згадувалося вище, в спектрі напівсферичного ДР присутні моди, поля яких просторово розділені на сферичній поверхні діелектричної резонансної структури і мають форму неоднорідних за шириною пасків.

Характерним для розглянутих резонаторів є присутність в їх спектрах мод ШГ з різним значенням радіального індексу $m = 1$ і 2 . За шириною резонансних

відгуків, що відповідають двом розглянутим модам, можна сказати, що добротність резонатора на нижчій радіальній моді ($m = 1$) вище, ніж на моді з радіальним індексом $m = 2$. Значний внесок в загальні втрати енергії в останньому випадку вносять втрати в матеріалі діелектрика, оскільки поле моди з $m = 2$ зосереджено глибше в діелектричному диску і область його локалізації більш широка, ніж нижчої радіальної моди. З цієї причини в подальшому будемо розглядати електродинамічні характеристики дискового екранованого ДР в режимі збудження нижчої радіальної HE_{3111} - моди ШГ. Її розподіл поля, отриманий шляхом комп'ютерного моделювання, представлено на рис. 2.16.

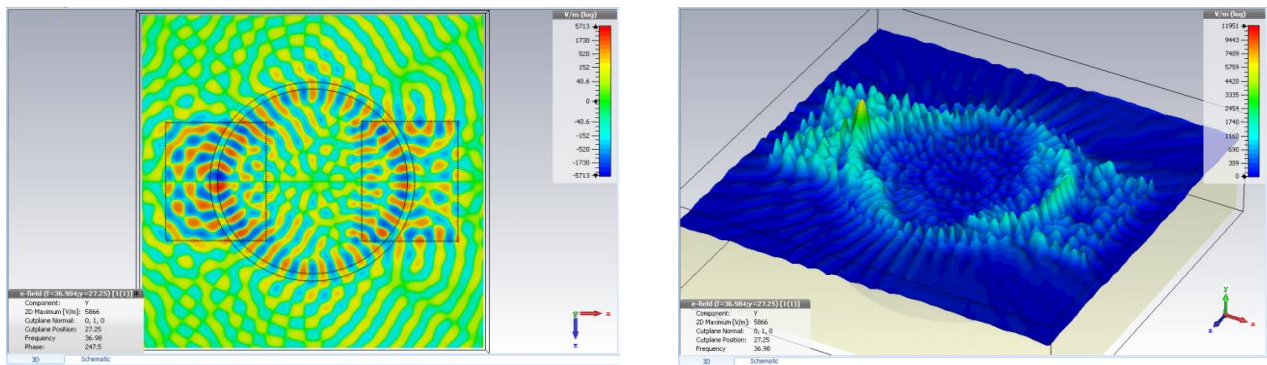


Рис. 2.16. Розподіл поля HE_{3111} - моди ШГ в екранованому дисковому ДР.

Звертає на себе увагу область розташування обмежених металевих дзеркал. Видно, що їх межі збурюють резонансне поле. Це проявляється в спотворенні форми плям полів. Крім того, поля мод ШГ проникають в область між плоскими основами металевих екрана і металевими дзеркалами, утворюючи в такому зазорі інтерференційну картину. Раніше подібний ефект спостерігався при електромагнітному зв'язку напівсферичного і напівдискового екранованих ДР з планарними хвилеводами [51-57].

У роботах [32, 170, 171] було показано, що спектральні і енергетичні характеристики відкритих ДР залежать від умов і способів збудження в них робочих мод коливань. Причиною цього є збурення резонансного поля локальним елементом збудження. У зв'язку з цим викликає практичний інтерес дослідження впливу збуджуючого елемента зв'язку на основні характеристики екранованого

дискового ДР. У відкритих дискових ДР, збуджуваних на модах ШГ відкритим кінцем металевого хвилеводу, зміна умов збудження досягалася шляхом переміщення відкритого кінця хвилеводу вздовж аксіальної координати. У нашому випадку, як показано вище, хвилеводний елемент зв'язку переміщується уздовж радіуса диска.

На рис. 2.17, 2.18 і 2.19 представлено залежності зміни резонансної частоти Δf_{n1} HE_{3111} - моди ШГ, нормованого коефіцієнта передачі і навантаженої добротності Q_n від відносної радіальної координати r_i / R_2 елемента збудження. Положення середини поперечного перетину елемента виведення сигналу фіксувалося на краю діелектричного диска ($r_0 / R_2 \approx 0,93$). Значенню величини $\Delta f_{n1} = 0$ відповідає положенню елемента збудження на краю диска.

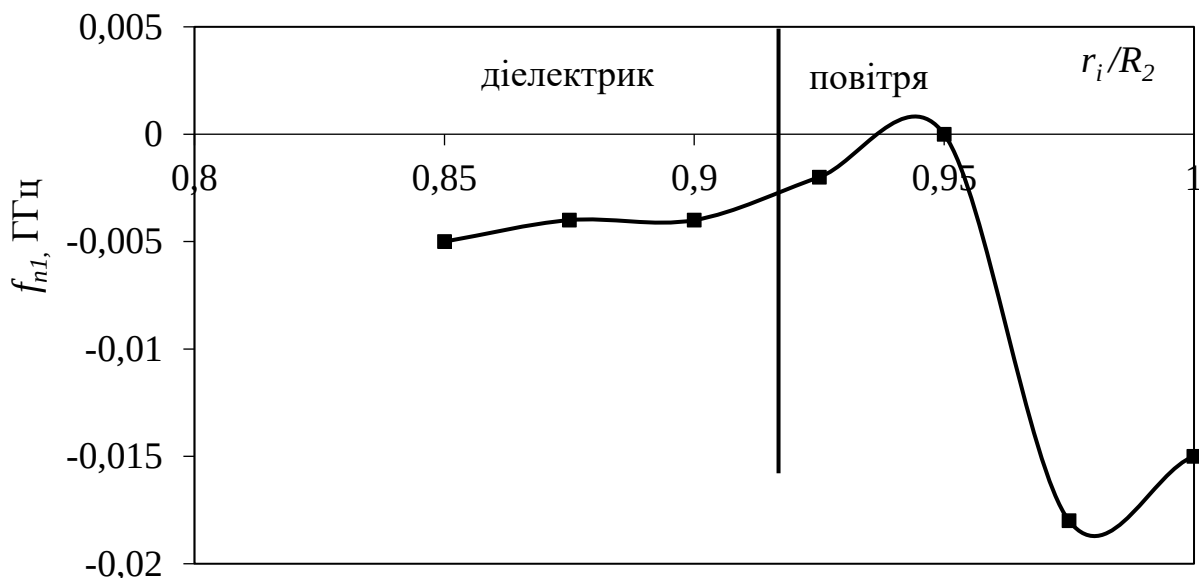


Рис. 2.17. Залежність зміни резонансної частоти HE_{3111} - моди ШГ від радіальної координати елемента збудження.

З Рис. 2.17 видно, що резонансна частота обраної моди ШГ залежить від положення елемента збудження вздовж радіальної координати. Її значення може змінюватися на 20 МГц. При цьому на зміну резонансної частоти елемент збудження найбільшим чином впливає при розташуванні поблизу краю діелектричного диска. З цього можна зробити висновок, що саме в області межі розділу середовищ діелектрик – повітря, резонансне поле характеризується найбільш високою інтенсивністю.

З точки зору фізичних процесів значення коефіцієнта передачі є інформативним для оцінки ефективності збудження робочих мод ШГ в резонаторі. Залежність нормованого коефіцієнта передачі A_0/A_{max} від відносної радіальної координати r_i/R_2 елемента збудження показано на рис. 2.18.

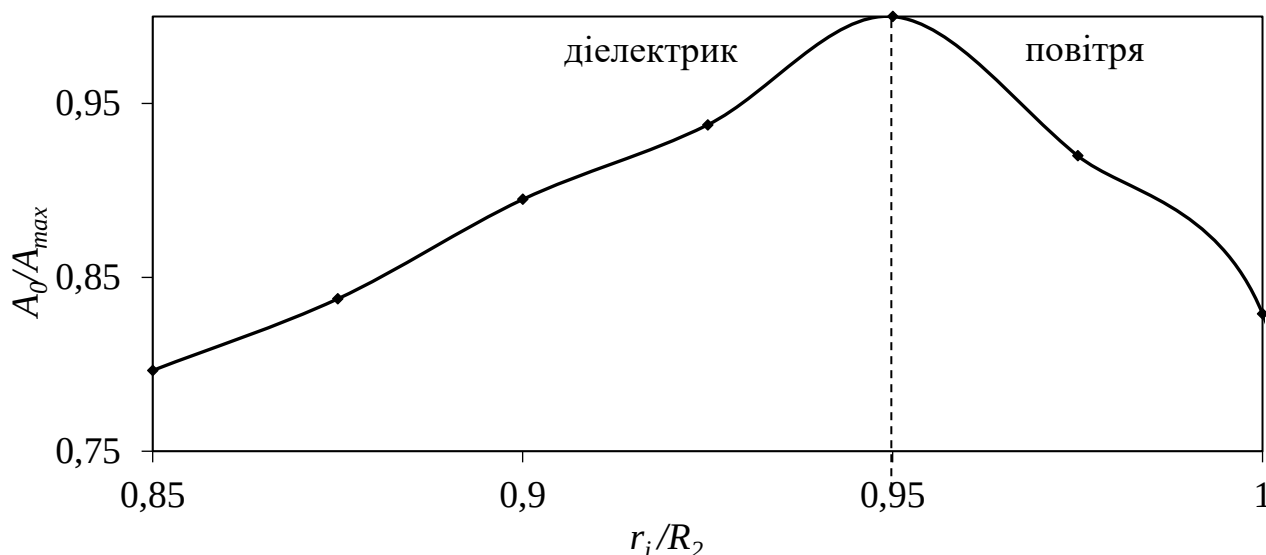


Рис. 2.18. Залежність відносного коефіцієнта передачі від радіальної координати елемента збудження.

З рис. 2.18 видно, що найбільша ефективність збудження мод ШГ в ДР відповідає розташуванню середини відкритого кінця хвильоводу на краю діелектричного диска $r_i/R_2 \approx 0,95$, що добре узгоджується з даними щодо збудження мод ШГ у відкритих дискових ДР [158]. Слід очікувати, що розташування елемента збудження на краю діелектричного диска відповідає найбільшій інтенсивності резонансного поля мод ШГ. Різке зменшення амплітуди вихідного сигналу при віддаленні збуджуючого елемента зв'язку від краю діелектричного диска пов'язано зі зменшенням ефективності збудження мод ШГ в резонаторі внаслідок зменшення інтенсивності їх резонансного поля.

Для оцінки поведінки енергетичних характеристик екранованого ДР при зміні умов збудження робочих мод ШГ найбільш інформативною є залежність добротності від радіальної координати елемента збудження. На рис. 2.17 значення навантаженої добротності Q_n досліджуваного дискового екранованого ДР

представлені суцільною лінією. Для порівняння, показано поведінку навантаженої добротності подібного відкритого дискового ДР (пунктирна лінія).

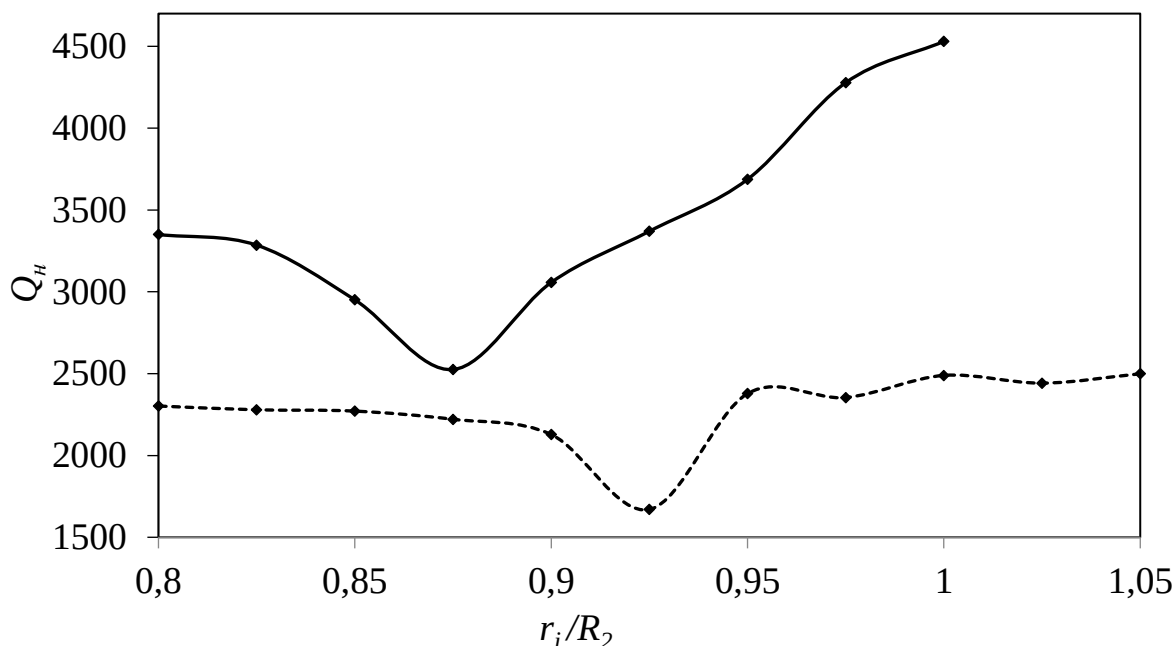


Рис. 2.19. Залежність навантаженої добротності екранованого і відкритого дискових ДР від радіальної координати елемента збудження.

З рис. 2.19 видно, що добротність екранованого дискового ДР перевищує добротність подібного відкритого резонатора. При цьому її значення суттєво залежить від місця розташування елемента збудження щодо краю діелектричного диска. Необхідно відзначити, що як для екранованого, так і для відкритого ДР значення коефіцієнтів передачі при однакових радіальних координатах елемента збудження значно не відрізняються. Найбільшого значення $Q_n = 4530$, навантажена добротність досягає при розташуванні відкритого кінця хвилеводу поблизу металевого екрану. Його середина при цьому знаходиться в повітряному зазорі між діелектричним диском і металевим екраном. Мінімум добротності $Q_n = 2520$ спостерігається при розташуванні елемента збудження в області діелектричного диска, поблизу його краю ($r_i/R_2 \approx 0,88$). Саме ця область характеризується найбільшими значеннями інтенсивності резонансного поля моди ШГ. Тому втрати за рахунок дифракції резонансного поля на краях елемента зв'язку в цьому випадку

є максимальними. В результаті це позначається на величині навантаженої добротності резонатора, що наочно можна побачити на рис. 2.19.

Для пояснення зростання добротності екранованого ДР при зміщенні відкритого кінця хвильоводу до повітряного зазору резонатора було проведено дослідження розподілу відносної інтенсивності A_0/A_{max} резонансного поля (електричної компоненти) робочої моди HE_{3111} уздовж відносної радіальної координати r_0/R_2 (суцільна крива на рис. 2.20).

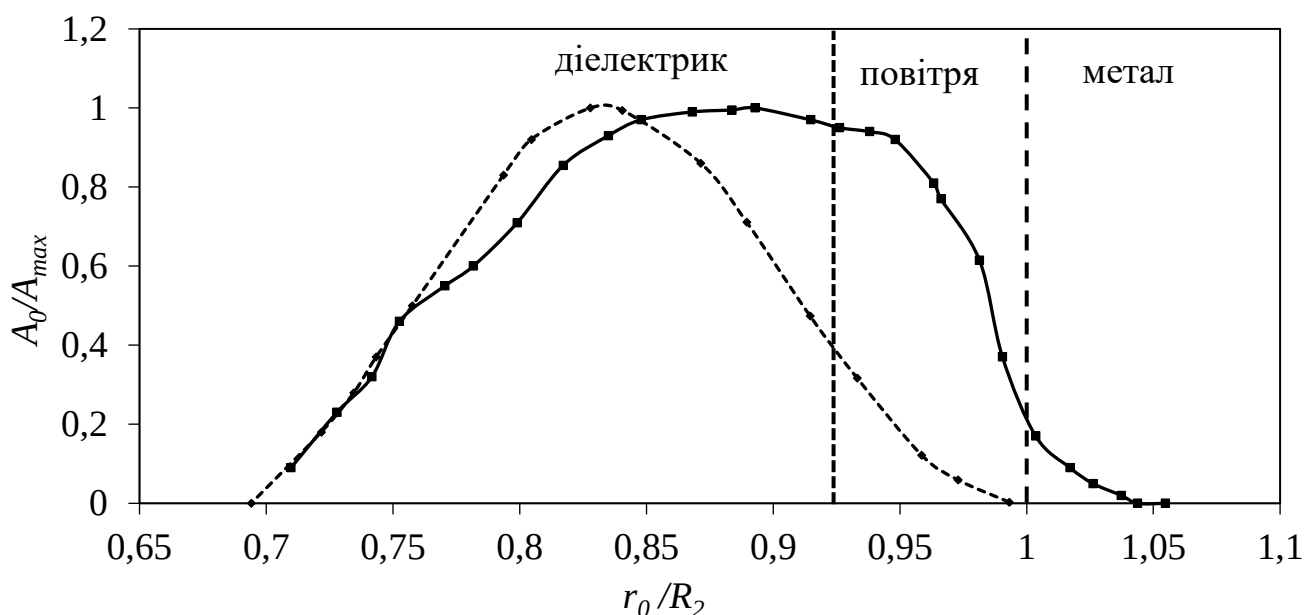


Рис. 2.20. Розподіл відносної інтенсивності резонансного поля HE_{3111} -моди ШГ в екранованому і відкритому дискових ДР.

Видно, що при наближенні до стінки металевого екрану відносна інтенсивність поля різко знижується до мінімальних значень $A_0/A_{max} \approx 0,14$. Це свідчить про зменшення параметра зв'язку резонатора з хвильоводом. У цьому випадку збільшується добротність зв'язку і, як наслідок, навантажена добротність, яка в ідеальному випадку повинна прагнути до власної добротності резонатора.

Результати дослідження радіального розподілу інтенсивності резонансного поля моди ШГ пояснюють і більш високі значення добротності дискового екранованого ДР у порівнянні з добротністю подібного відкритого резонатора. Розподіл поля HE_{3111} -моди ШГ у відкритому дисковому ДР представлено на рис. 2.20 у вигляді пунктирної кривої. З Рис. 2.20 видно, що у порівнянні з екранованим

резонатором поле обраної моди ШГ у відкритому дисковому ДР в основному зосереджено в діелектричному матеріалі. Істотний вплив на величину добротності в цьому випадку надають діелектричні втрати. В екранованому ДР резонансне поле зміщується в область повітряного зазору. При цьому втрати в матеріалі діелектрика знижуються. У той же час омичні втрати в стінках екрану невеликі, оскільки, як зазначалося вище, інтенсивність резонансного поля на межі розділу середовищ повітря-метал незначна. Можна припустити, що це є другим фактором, що призводить до більш високого значення Q_n екранованого дискового резонатора в порівнянні з відкритим (Рис. 2.19). Подібний ефект зростання добротності двошарових екранованих ДР раніше було помічено в напівсферичних діелектричних екранованих структур [162-164].

Таким чином, проведеними дослідженнями встановлено, що при певних умовах збудження власна добротність екранованого з боку циліндричної поверхні класичного дискового ДР майже в 2 рази перевищує добротність подібного відкритого ДР. При цьому спектр такого резонатора більш розріджений. Це робить перспективним проведення подібних досліджень з метою підвищення добротності досліджуваних в цій роботі планарних ДР.

2.4. Підвищення добротності планарного ДР шляхом використання кільцевого металевго екрану.

Грунтуючись на результатах досліджень, представлених в п. 2.3, з метою підвищення власної добротності планарного ДР пропонується його екранування з боку криволінійної поверхні. В силу того, що плоскі основи тонкого діелектричного диска покриті металевими поверхнями (основна умова для збудження мод ШГ в планарних ДР) доцільним є вибір форми металевго екрану у вигляді кільця, усередині якого розташовується планарний ДР.

В роботі було досліджено та порівняно спектральні та енергетичні характеристики двох однакових за розмірами планарних дискових ДР. Звичайний планарний ДР був відкритий з боку циліндричної поверхні, а другий резонатор -

екранований металевим кільцем. Тому, для зручності другий резонатор будемо називати екранованим планарним ДР.

Об'єкти досліджень схематично показані на рис. 2.21а і 2.21б. Обидва резонатора містили діелектричні диски 1, виготовлені з фторопласту-4 ($\epsilon = 2,08$) висотою $H_1 = 1$ мм і радіусом $R_1 = 39$ мм. Своїми плоскими основами вони розташовувалися між двома круглими тонкими латунними дзеркалами 2 і 3 діаметром 100 мм.

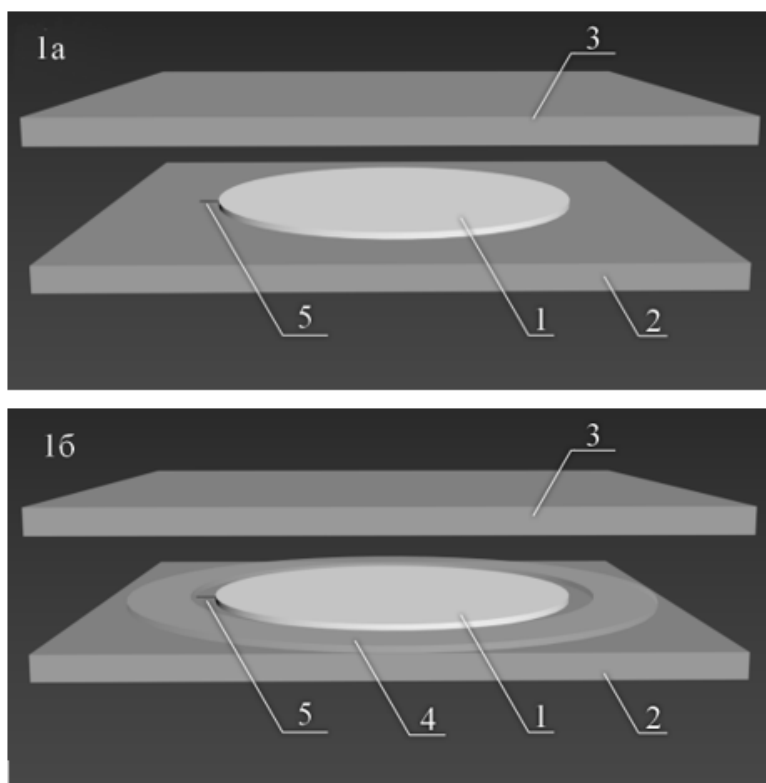


Рис. 2.21. Планарні ДР як об'єкти досліджень.

Відстань одного з дзеркал щодо диска на рис. 2.21 показано лише для наочності розташування діелектричного диска і кільцевого екрану в такій системі. В експерименті обидва металеві дзеркала щільно прилягали до плоских основ діелектричного диска. В екранованому планарному ДР діелектричний диск знаходився всередині алюмінієвого кільця 4 з висотою $H_2 = H_1 = 1$ мм і радіусом $R_2 = 42$ мм. Таким чином, всередині екранованого планарного ДР існував тонкий повітряний зазор товщиною 3 мм між діелектричним диском і металевим екраном. Центри діелектричного диска і кільцевого екрану збігалися. Як було показано в

роботах [162-164] з вивчення електродинамічних характеристик екранованих напівсферичних ДР, саме при такому співвідношенні радіусів діелектричної резонансної структури і металевого екрану досягається власна добротність, що перевищує добротність подібного відкритого ДР.

Для збудження мод ШГ в планарних ДР використовувалася щілина зв'язку 5 (Рис. 2.21) з розмірами 7,2 x 0,5 мм в одному з плоских металевих дзеркал. Для підвищення ефективності збудження робочих мод ШГ в планарних ДР її середина розташовувалася на краю діелектричного диска [158]. Широка сторона щілини зв'язку орієнтувалася паралельно радіусу плоскої сторони диска, що забезпечувало збудження *HE*-мод ШГ в планарних ДР.

Експериментальні дослідження було проведено в смузі частот 31,0 ÷ 37,0 ГГц за допомогою панорамного вимірювача КСХН Я2Р-67. Досліджувалися спектральні характеристики у вигляді набору резонансних частот. Енергетичні характеристики були представлені результатами визначення параметра зв'язку з планарним ДР, а також його власної добротності. Систематична похибка визначення частот в експерименті не перевищувала 0,01%, власної добротності - 10%.

Якісно оцінити в експерименті розподіл інтенсивностей резонансних полів мод ШГ в досліджуваних резонаторах уздовж радіальної координати дозволяла залежність нормованого на максимальне значення параметра зв'язку p / p_{max} від відносної радіальної координати r_i / R_1 щілини зв'язку. Очевидно, що найбільший зв'язок відповідає розташуванню щілини зв'язку на ділянках резонансних полів з найбільшою інтенсивністю. Зміна радіальної координати щілини зв'язку в експерименті досягалася шляхом зміщення діелектричного диска на металевому дзеркалі у відповідному напрямку. Для ідентифікації мод коливань відповідно до розподілу їх резонансних полів в роботі було проведено комп'ютерне моделювання на основі стандартного програмного забезпечення CST Microwave Studio 2013.

Загальним для спектрів обох досліджуваних планарних ДР є наявність мод ШГ. Результати комп'ютерного моделювання вказують на те, що збуджувані моди ШГ характеризуються однорідним розподілом резонансного поля уздовж висоти

діелектричного диска (аксіальний індекс $l = 0$). На рис. 2.22 представлено розподіл полів для екранованого планарного ДР (а) і звичайного планарного ДР (б) уздовж азимутальної координати.

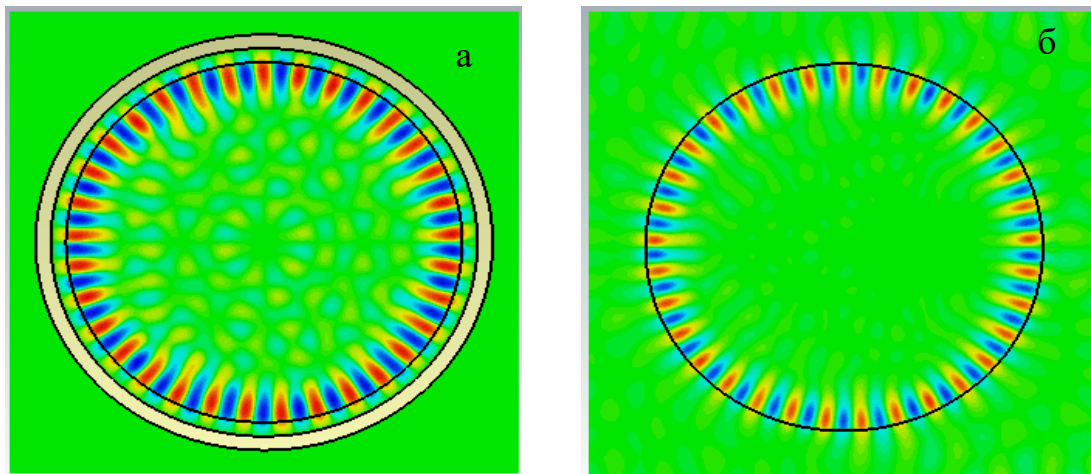


Рис. 2.22 Розподіл полів HE_{3310} -моди ШГ в екранованому (а) і звичайному (б) планарних ДР.

Видно, що обидва резонатори працюють в режимі збудження нижчої радіальної моди ШГ ($m = 1$). Причому значення усередненого періоду сітки резонансних частот δf_n звичайного і екранованого планарних ДР відрізняються. Спектр звичайного планарного ДР характеризується усередненим періодом сітки резонансних частот мод ШГ $\delta f_1 = 0,88$ ГГц, а екранованого резонатора - $\delta f_2 = 0,93$ ГГц. Це свідчить про різний характер розподілу резонансних полів мод ШГ в них. Причиною цього, очевидно, є відмінність довжин електричних шляхів хвиль ШГ, що поширюються в звичайному та екранованому планарних ДР. Іншими словами, розпізнавальною ознакою досліджуваних резонаторів є їх ефективна діелектрична проникність по відношенню до полів робочих мод ШГ. Для екранованого планарного ДР присутність повітряного середовища у вигляді повітряного зазору більш впливає на спектральні характеристики.

Відмінність абсолютних значень резонансних частот мод ШГ звичайного і екранованого планарних ДР в середньому становить 150 МГц, причому зі зменшенням їх азимутального індексу (резонансної частоти) така різниця

збільшується. Так для $HE_{37\ 1\ 0}$ -моди вона становить 90 МГц, а для моди $HE_{31\ 1\ 0}$ - 230 МГц.

На користь правильності наведених вище припущень впливу повітряного зазору свідчить залежність параметра зв'язку p від азимутального індексу n мод ШГ при різних положеннях щілини зв'язку вздовж радіальної координати. На рис. 2.23 і 2.24, відповідно, представлено такі залежності для двох найбільш характерних положень середини щілини зв'язку: над діелектриком ($r_i/R_1 = 0,94$) і коли середина щілини зв'язку знаходиться на краю діелектричного диска ($r_i/R_1 = 1$). Пунктиром представлено значення параметра зв'язку з екранованим резонатором, суцільною лінією - зі планарним ДР.

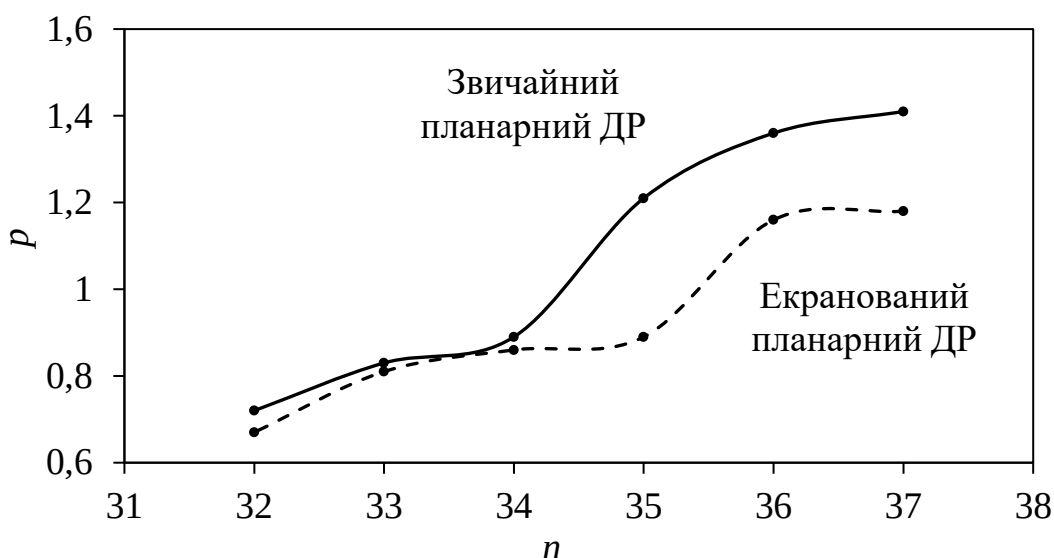


Рис. 2.23. Залежність параметра зв'язку від азимутального індексу мод ШГ в планарних ДР при розташуванні щілини зв'язку над діелектриком.

Видно, що при розташуванні середини щілини зв'язку над тонким діелектричним диском найбільші значення параметра зв'язку досягаються зі звичайним планарним ДР. При цьому на високочастотному краю досліджуваного діапазону частот спостерігається закритичний зв'язок ($p > 1$) як зі звичайним, так і з екранованим планарним ДР.

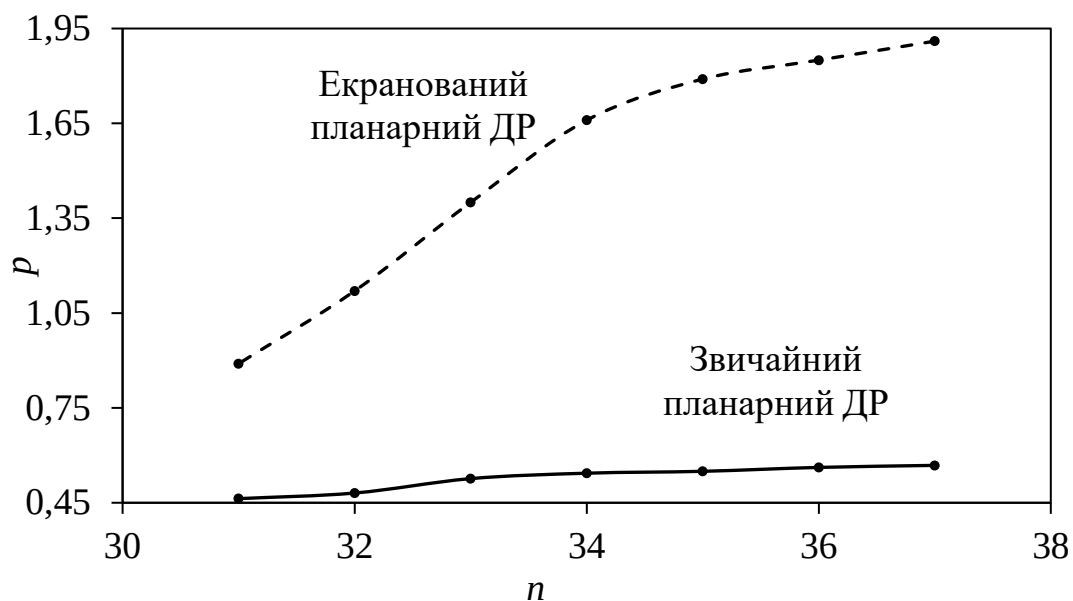


Рис. 2.24. Залежність параметра зв'язку від азимутального індексу мод ШГ в планарних ДР при розташуванні середини щілини зв'язку на краю диска.

При зміщенні щілини зв'язку до краю діелектричного диска (Рис. 2.22) зв'язок з екранованим планарним ДР характеризується більш високими значеннями параметра зв'язку у порівнянні зі звичайним планарним ДР. При цьому, в більшій високочастотній частині досліджуваного діапазона спостерігається сильний закритичний ($p > 1$) зв'язок з екранованим планарним ДР. У той час як зв'язок з подібним звичайним резонатором є слабким ($p < 1$). Це свідчить про те, що на краю діелектричного диска інтенсивність резонансного поля мод ШГ суттєво підвищується при повному екрануванні тонкого діелектричного диску. У цьому випадку область повітряного зазору також характеризується високою інтенсивністю резонансного поля мод ШГ. Про це свідчать високі значення параметра зв'язку. Тому, можна припустити, що втрати в матеріалі діелектрика звичайного планарного ДР вносять більший внесок в загальні власні втрати в порівнянні з подібним екранованим резонатором.

Проведений аналіз поведінки параметра зв'язку зі звичайним і екранованим планарними ДР при різних положеннях щілини зв'язку багато в чому пояснює результати дослідження їх власної добротності. Залежність власної добротності Q_0 розглянутих планарних ДР від азимутального індекса n збуджуваних мод ШГ

представлено на рис. 2.25. Суцільна крива відображає поведінку добротності звичайного планарного ДР, пунктирна - подібного екранованого резонатора.

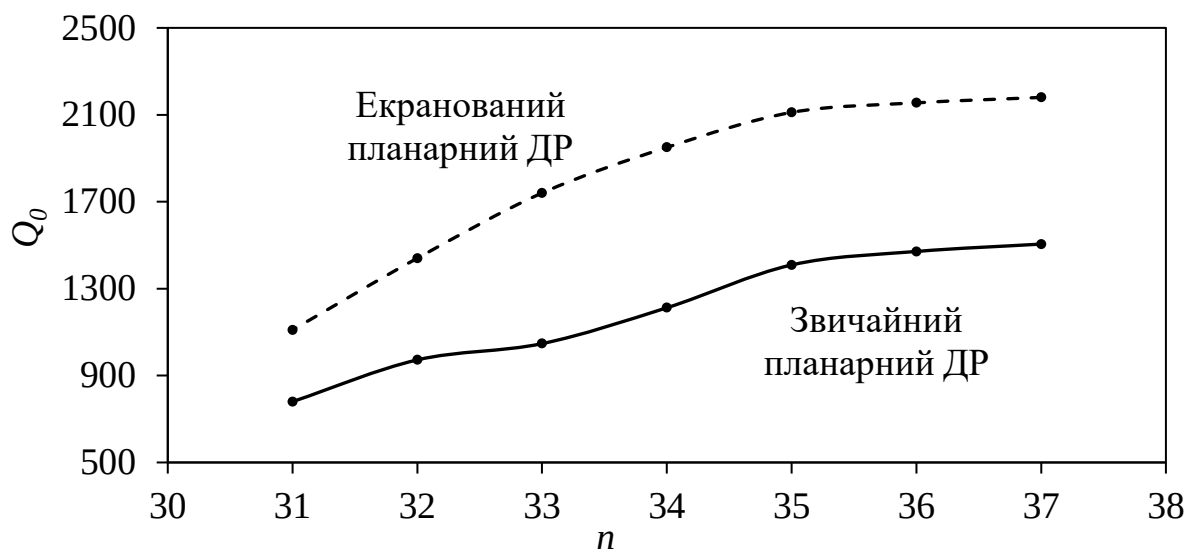


Рис. 2.25. Залежність власної добротності планарних ДР від азимутального індексу збуджуваних мод ШГ.

З Рис. 2.25 видно, що власна добротність звичайного планарного ДР при збудженні в ньому мод ШГ з різними азимутальними індексами порівняно невелика. Зі збільшенням азимутального індексу n (частоти) робочих мод ШГ добротність такого резонатора зростає, і на високочастотному краю досліджуваного діапазону частот вона досягає свого найбільшого значення $Q_0 = 1580$. Така поведінка власної добротності планарного ДР добре узгоджується з поведінкою добротності класичних класичних ДР, для яких нижчою аксиальною модою є мода з індексом $l = 1$. Зі зменшенням азимутального індексу n найбільший внесок у власні втрати енергії таких резонаторів вносить випромінювання у вільний простір [26]. Мінімізувати вплив радіаційних втрат на величину добротності дозволяє перехід до повністю екранованих діелектричних резонансних структур з повітряним зазором в області між ними і металевим екраном [162-164]. Дані, представлені на рис.2.25, свідчать про те, що подібний ефект зменшення власних втрат енергії шляхом екранування діелектричного диска спостерігається й в надтонких планарних структурах. Так, видно що, у всьому досліджуваному діапазоні частот власна добротність екранованого планарного ДР значно

перевищує добротність подібного резонатора, відкритого з боку криволінійної поверхні. Причому з ростом азимутального індексу мод ШГ (частоти) така різниця стає більш очевидною. На високочастотному краю досліджуваного діапазону частот воно досягає 40%, на низькочастотному краю становить 30%. Найбільша власна добротність екранованого планарного ДР в досліджуваному діапазоні частот складає $Q_0 = 2170$.

Пояснити зростання власної добротності планарного ДР при його екрануванні з боку криволінійної поверхні дозволяє аналіз залежності параметра зв'язку від радіальної координати щілини зв'язку. Дана залежність якісно відображає розподіл інтенсивності резонансного поля мод ШГ в досліджуваних резонаторах уздовж радіальної координати. Очевидно, що найбільші значення параметра зв'язку відповідають положенням щілини зв'язку на ділянках резонансних полів з найбільшою інтенсивністю. При зниженні інтенсивності резонансного поля зв'язок з резонатором зменшується. Залежність нормованого на максимальне значення параметра зв'язку p/p_{max} від відносної радіальної координати середини щілини зв'язку r_i/R_1 для екранованого (суцільна крива) і звичайного (пунктир) планарних ДР, збуджених на $HE_{37\ 1\ 0}$ моді ШГ, представлено на рис. 2.26. Межа повітря-метал в екранованому планарному ДР відповідає відносній радіальній координаті щілини зв'язку $r_i/R_1 = 1,08$.

З Рис. 2.26 видно, що причиною зростання добротності планарного ДР при його повному екрануванні є зниження втрат в матеріалі діелектрика і незначні втрати в циліндричних стінках металевого екрану. На відміну від звичайного планарного ДР поля мод ШГ подібного екранованого резонатора в основному зосереджені в повітряному зазорі, незважаючи на те, що максимум його інтенсивності розташовується в діелектрику. При цьому область повітряного зазору в екранованому планарному ДР характеризується високими значеннями параметра зв'язку ($p > 1$). При наближенні до стінок металевого екрану інтенсивність поля знижується, досягаючи на межі з металом одних з найменших значень, про що свідчать малі значення параметра зв'язку ($p = 0,39$).

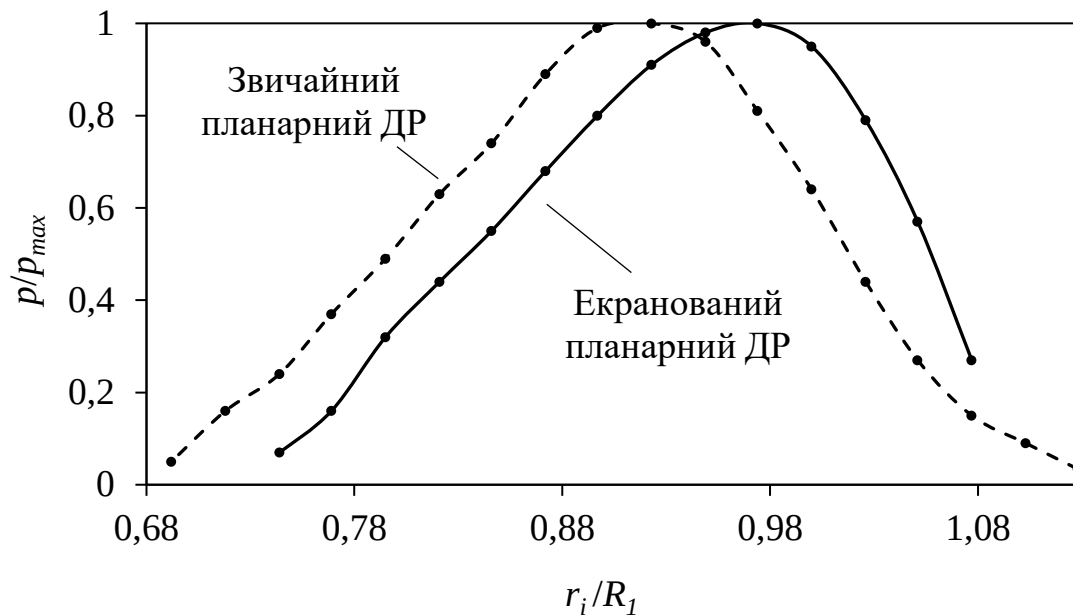


Рис. 2.26. Залежність відносного параметра зв'язку з планарними ДР від відносної радіальної координати щілини зв'язку.

Таким чином, експериментально встановлено, що шляхом переходу від частково екранованих планарних діелектричних структур до повністю екранованих з тонким повітряним зазором між надтонким діелектричним диском і металевим екраном циліндричної форми вдається суттєво підвищити власну добротність планарного ДР. Причиною цього є зниження втрат в матеріалі діелектрика за рахунок часткового усунення резонансного поля мод ШГ з області діелектрика до повітряного зазору. Показано, що при певних співвідношеннях радіусів діелектричного диска і екрану циліндричної форми омичні втрати в стінках екрану є незначними і суттєво не впливають на значення власної добротності планарних ДР.

Висновки до Розділу 2.

Проведеними експериментальними і розрахунковими дослідженнями було встановлено;

1. На відміну від відкритих дискових ДР в планарних резонаторах, утворених тонким діелектричним (фторопластовим) диском, розташованим плоскими основами між двома провідними поверхнями (дзеркалами), - можливий режим

збудження мод ШГ. При цьому висота діелектричного диска може бути меншою за критично допустиму $H = \lambda_d / 2$ для відкритих ДР. Причиною даного ефекту є зниження радіаційних втрат за рахунок штучного обмеження резонансного поля уздовж аксиальної координати металевими дзеркалами.

2. Режим збудження *HE*-мод ШГ в планарних ДР досягається при використанні локального елемента зв'язку у вигляді вузької щілини, розташованої в одному з металевих дзеркал, що покривають плоскі основи тонкого діелектричного диска. При цьому ефективність збудження робочих мод ШГ в планарних ДР може бути вище, ніж при порушенні мод ШГ в подібних класичних відкритих ДР, що володіють більшою висотою.

3. На відміну від класичних ДР при використанні щілини зв'язку в якості елемента збудження мод ШГ в планарних ДР досягається режим сильного закритичного зв'язку. Причиною цього є однорідний розподіл резонансного поля мод ШГ в аксіальному напрямку.

4. Для підвищення власної добротності планарних ДР запропоновано використання кільцевого металевого екрану. Показано, що зростання власної добротності на $30 \div 40\%$ в діапазоні частот $31 \div 37$ ГГц досягається за рахунок часткового витіснення резонансного поля мод ШГ з діелектричного матеріалу резонатора в повітряний проміжок між діелектричним диском і металевим екраном.

РОЗДІЛ 3. ПЛАНАРНИЙ ДР В ПЛОСКО-ПАРАЛЕЛЬНОМУ ЕКРАНІ З ПОВІТРЯНИМ ЗАЗОРОМ: СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ДОБРОТНОСТІ

Як було показано в Розділі 2, головним недоліком планарних ДР є їх порівняно низька власна добротність, обумовлена високими омичними втратами в металевих дзеркалах, що покривають плоскі основи тонкого діелектричного диска, і втратами в діелектричному матеріалі резонатора. Використання кільцевого екрану дозволяє дещо збільшити власну добротність таких резонаторів, проте в порівнянні з подібними відкритими класичними ДР з більшою висотою їх добротність залишається невисокою.

В роботі [17] для підвищення добротності добре відомих дискових ДР, що збуджуються на нижчих модах, було запропоновано використання плоско-паралельних екранів з повітряними зазорами між площиною металевих дзеркал і бічними основами діелектричних дисків. Було показано, що при певному співвідношенні висоти діелектричного диска і товщини повітряного зазору досягається зростання власної добротності таких резонансних структур. Причиною цього ефекту є зменшення діелектричних втрат, обумовлене частковим зміщенням резонансного поля з діелектрика до повітряного зазору. При цьому енергія, що запасається в повітряному зазорі може бути навіть більше енергії, що запасається в діелектричному елементі резонатора. За цієї обставини такі екрановані резонатори мають більшу добротність в порівнянні з подібними відкритими ДР.

У даній роботі пропонується використання подібного принципу екранування надтонкого діелектричного диску з метою підвищення власної добротності досліджуваних планарних ДР. Раніше використовуваний для досліджень планарний ДР на основі фторопластового ДР майже не відповідає вимогам поставленої задачі. Як було зазначено раніше, недостатньо висока твердість фторопласта призводить до нестабільності форм надтонкого диску, що знаходиться у вільному стані. Тому, для проведення подальших досліджень доцільним є використання більш твердого діелектричного матеріалу. Цим вимогам відповідає лейкосапфір, який також характеризується й малими втратами енергії

електромагнітного поля $\operatorname{tg} \delta = 10^{-4}$ при зовнішній температурі $T = 293 \text{ K}$ [133]. В порівнянні з робочою довжиною хвилі в 8-мм діапазоні висота лейкосапфірового диска вибиралася меншою за $H \approx \lambda_d / 4$ (рис. 3.1).



Рис. 3.1 Тонкий лейкосапфіровий диск, як основа планарного ДР.

Для виключення впливу анізотропних властивостей монокристалу лейкосапфіра на електродинамічні характеристики виготовленого з нього резонатора вісь симетрії надтонкого диска орієнтувалася паралельно оптичній осі монокристалу. Даний Розділ присвячений вирішенню завдання підвищення власної добротності планарних ДР і створення на їх основі малогабаритних високодобротних резонаторів мм діапазона довжин хвиль. Основні результати опубліковані в роботах [63, 64, 67, 69].

3.1. Лейкосапфіровий ДР в плоскопараллельному екрані з одним повітряним зазором.

Об'єкт досліджень показаний на рис.3.2. Діелектричний диск 1, виготовлений з монокристала лейкосапфіра Al_2O_3 (вісь анізотропії перпендикулярна плоским основам диска) радіусом $R = 20 \text{ мм}$ і висотою $H = 0,7 \text{ мм}$, своїми плоскими основами був розташований між двома тонкими (товщина 3 мм) латунними дзеркалами 2 і 3 квадратної форми 55 x 55 мм. Дзеркало 3 було рухомим уздовж аксиальної координати (висоти діелектричного диска).

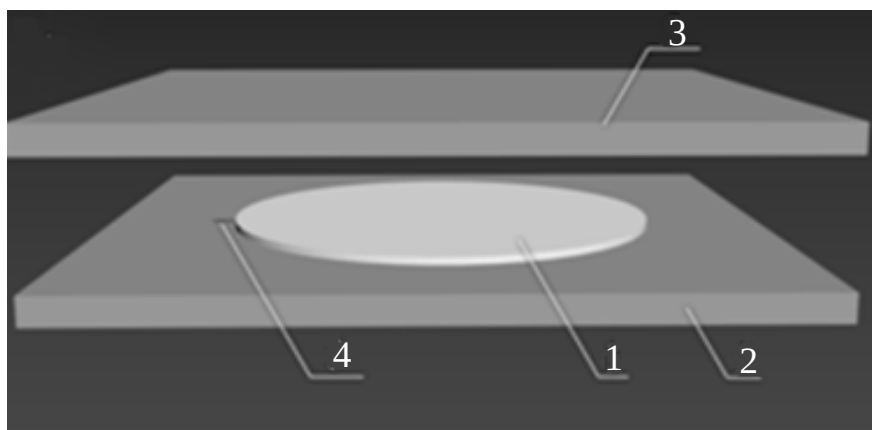


Рис. 3.2. Об'єкт досліджень. Тонкий лейкосапфіровий диск в плоско-паралельному екрані з повітряним зазором.

В отворі дзеркала 2 розташовувався елемент збудження мод ШГ в планарному ДР – щілина зв'язку. Щілина зв'язку 4, прямокутної форми 7,2 x 0,5 мм, утворена відкритим кінцем звуженого уздовж вузької стінки металевого хвилеводу. У резонаторі щілина зв'язку орієнтувалася таким чином, що її широка сторона була паралельна радіусу плоскої основи діелектричного диска. При цьому в резонаторі збуджувалися HE_{nml} моди ШГ. Для підвищення ефективності збудження середина щілини зв'язку збігалася з межею диска [158]. Виведення енергії електромагнітного поля здійснювалось через ту ж щілину зв'язку. Таким чином, було реалізовано включення резонатора в ланцюг зв'язку методом «на відбиття».

Експериментальні дослідження було проведено в смузі частот 31,0 ÷ 37,5 ГГц за допомогою панорамного вимірювача КСХН Я2Р-67. Досліджувалися спектральні характеристики у вигляді набору резонансних частот і власна добротність планарного ДР. Головним чином в роботі досліджувалися залежності цих величин від положення рухомого дзеркала 3 (рис.3.2) уздовж аксиальної координати. Останнє могло розташовуватися як впритул до плоскої основи тонкого діелектричного диска, так і на деякій відстані від нього, утворюючи повітряний зазор в області між ними. Систематична похибка визначення частот в експерименті не перевищувала 0,01%, власної добротності - 10%.

Для ідентифікації мод відповідно до розподілу їх резонансних полів в роботі здійснювалось комп'ютерне моделювання на основі стандартного програмного забезпечення CST Microwave Studio 2013. Результати комп'ютерного моделювання дозволяли визначити розподіл інтенсивності резонансного поля (електричної компоненти) мод ШГ уздовж радіальної і аксіальної координат.

Проведеними дослідженнями встановлено, що в запропонованому планарному ДР у всьому досліджуваному діапазоні частот збуджуються робочі моди ШГ. При щільному приляганні металевих дзеркал до плоских основ тонкого діелектричного диска в спектрі вихідного сигналу виділяються резонансні відгуки, відповідні модам ШГ, що відрізняється кількістю варіацій поля уздовж азимутальної координати (азимутальним індексом n). Відстань за шкалою частот між сусідніми резонансами - період сітки резонансних частот становить близько 0,75 ГГц. Модовий склад досліджуваного планарного ДР в даній роботі буде детально представлений в п.3.3.

На фоні пріоритетного збудження мод ШГ в спектрі планарного ДР присутні дрібні за амплітудою резонансні відгуки. Їх наявність пов'язана зі збудженням мод хвилевідного типу в системі, утвореної двома провідними дзеркалами з малою відстанню між ними. У літературі така система відома як планарний хвилевід [51]. Через дифракції хвиль на краях дзеркал в такому планарному хвилеводі можливий режим стоячої хвилі, який призводить до згущення спектра [51, 53-55]. Густота спектра при щільному приляганні дзеркал до планарного диску настільки висока, що ускладнює дослідження спектральних та енергетичних характеристик резонатора. S-параметр планарного ДР при щільному приляганні металевих дзеркал до плоских основ тонкого діелектричного диска показано на рис. 3.3,

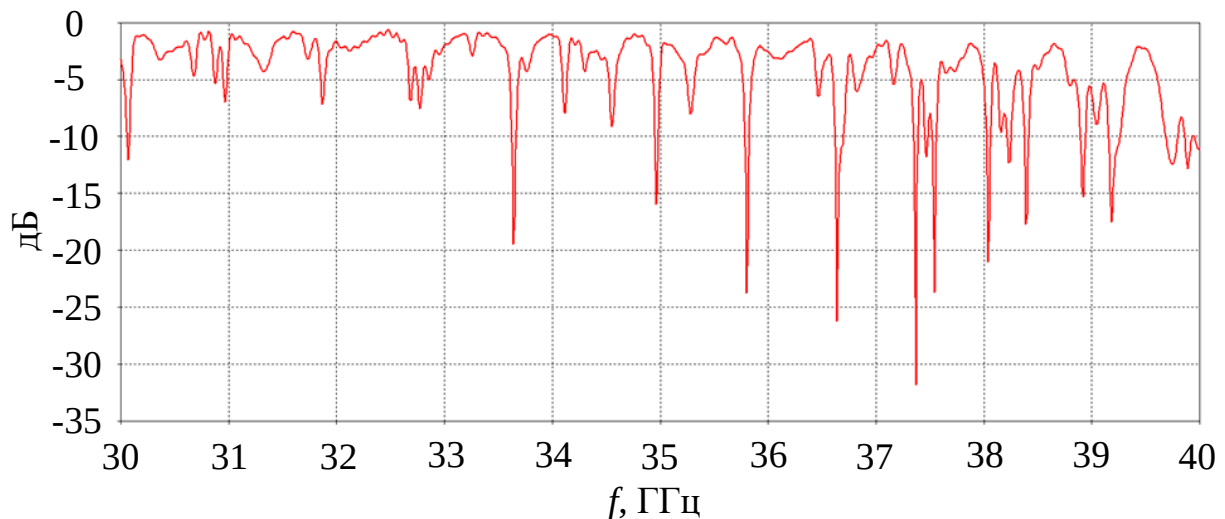


Рис. 3.3. S -параметр планарного ДР при щільному приляганні металевих дзеркал до плоских основ лейкоапфірового диска.

При віддаленні металевого дзеркала 3 (рис. 3.2) від плоскої основи тонкого лейкоапфірового диска, спектр мод резонатора розріджується. Так, при повітряному зазорі $\Delta h = 0,1$ мм між плоскою основою диска і плоскою поверхнею металевого дзеркала 3 (Рис. 3.2) резонансні відгуки інших коливань хвильоводного типу не спостерігаються. Причиною цього є їх високі радіаційні втрати внаслідок великого розкриття хвильоводу, утвореного металевими дзеркалами планарного ДР. При подальшому видаленні дзеркала 3 резонансні відгуки мод ШГ спостерігались з тенденцією зниження їх амплітуди. Було встановлено, що моди ШГ «стійко» збуджуються в планарному ДР з повітряним зазором висота якого не перевищує $\Delta h = 1,3$ мм. При великих значеннях величини $\Delta h > 1,3$ мм моди ШГ не збуджуються через високі радіаційні втрати. У зв'язку з цим всі дослідження електродинамічних характеристик планарного ДР було проведено в інтервалі значень висоти повітряного зазору в резонаторі $0,1 \text{ мм} < \Delta h < 1,3 \text{ мм}$.

На рис. 3.4 і 3,5, відповідно, показано графіки залежностей резонансних частот f_n (експеримент - пунктир, теорія - суцільна лінія) та експериментально визначеної власної добротності Q_0 планарного ДР від висоти Δh повітряного зазору між плоскою основою тонкого лейкоапфірового диска і металевого

дзеркала. Для досліджень було обрано моду ШГ з азимутним індексом, рівним $n = 23$.

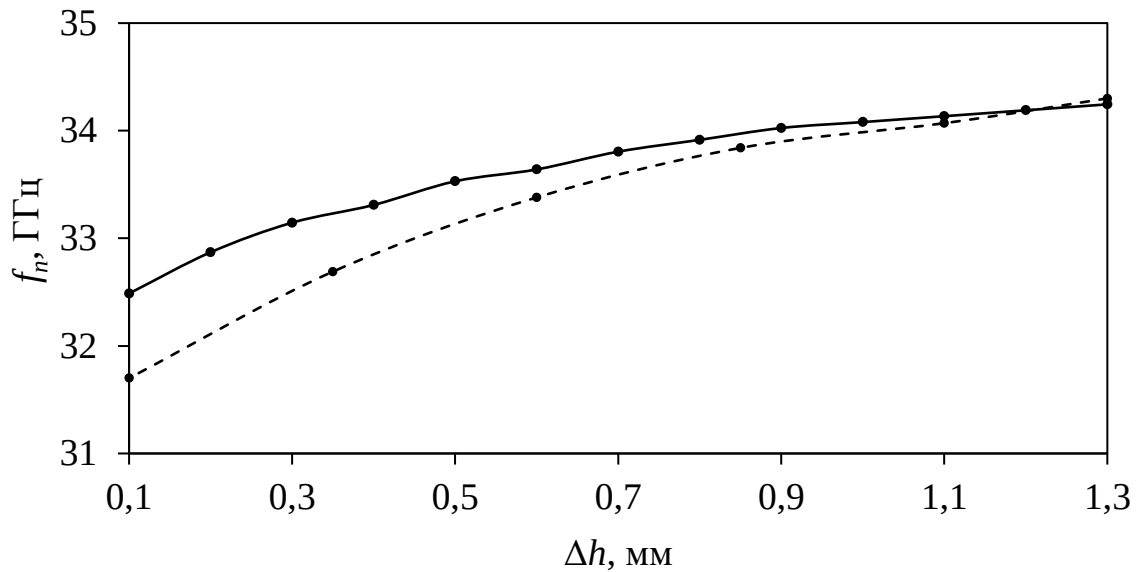


Рис.3.4. Залежність резонансної частоти HE_{2310} -моди ШГ від висоти повітряного зазору в планарному ДР.

З рис. 3.4 видно, що при видаленні від тонкого лейкоапіфирового диска металевих дзеркала спостерігається зростання резонансної частоти обраної моди ШГ. Подібна поведінка резонансної частоти при видаленні одного з дзеркал є характерною для HE -мод ШГ, збуджуваних в класичних дискових ДР [17]. Необхідно відзначити, що при порівняно великих висотах повітряного зазору $\Delta h > 0,7$ мм спостерігається добра відповідність експериментальних результатів до результатів, отриманих за допомогою комп'ютерного моделювання. При зменшенні висоти повітряного зазору розбіжність в значеннях резонансних частот, одержаних шляхом комп'ютерного моделювання та експериментально, зростає. В області малих значень величини $\Delta h < 0,7$ мм резонансне поле зосереджено в малому об'ємі, обмеженому металевими дзеркалами. При цьому велике значення має вплив електричних характеристик застосованого для досліджень матеріалу дзеркал. Саме розбіжність в значеннях імпедансу металевих дзеркал, використаних в експерименті та передбачених при моделюванні, може бути головною причиною розбіжності між експериментом і теорією. Про високу «концентрацію» поля в області між металевими дзеркалами при малому повітряному зазорі свідчить

тенденція більш стрімкого зниження частоти в інтервалі значень величини $\Delta h < 0,7$ мм. Так зміна резонансної частоти в інтервалі значень висоти повітряного зазору $0,7 \text{ мм} < \Delta h < 1,3 \text{ мм}$ при розрахунках становить $\delta f_n^1 \approx 0,44 \text{ ГГц}$ і $\delta f_n^1 \approx 0,51 \text{ ГГц}$ в експерименті, а в інтервалі $0,1 \text{ мм} < \Delta h < 1,3 \text{ мм}$ в теорії - $\delta f_n^2 \approx 1,32 \text{ ГГц}$ і $\delta f_n^2 \approx 2,08 \text{ ГГц}$ в експерименті.

Як було встановлено розрахунковим шляхом - азимутальний індекс n мод ШГ, збуджуваних в планарному ДР, в межах одного періоду резонансних частот значно залежить від висоти повітряного зазору. Особливо така залежність є наочною при найменших значеннях величини $\Delta h \approx 0$. Так при введенні в планарний ДР повітряного зазору $\Delta h = 0,05 \text{ мм}$ зміна (зменшення) азимутального індексу в інтервалі частот $36,2 \div 37,0 \text{ ГГц}$ складає $\Delta n = 9$. При щільному приляганні металевих дзеркал до плоских основ тонкого лейкоапіфирового диска значення азимутального індексу становить $n_1 = 41$, а при повітряному зазорі $\Delta h = 0,05 \text{ мм}$ - $n_2 = 32$. При великих висотах повітряного зазору динаміка зміни азимутального індексу виражена в меншій мірі. При зміні висоти повітряного зазору в інтервалі значень $0,2 \leq \Delta h \leq 1,3 \text{ мм}$ величина $\Delta n = 2$. З цього можна зробити висновок, що введення навіть мінімального повітряного зазору в конструкцію планарного ДР призводить до істотної зміни резонансної частоти обраної моди ШГ.

Про вплив повітряного зазору в конструкції планарного ДР на формування його енергетичних характеристик можна судити з поведінки параметра зв'язку. На рис. 3.5 представлено залежність параметра зв'язку p з планарним ДР від висоти повітряного зазору Δh при збудженні HE_{2310} -моди ШГ. Дану залежність було досліджено при віддаленні однорідного металевого дзеркала (без щілини зв'язку) від плоскої основи тонкого діелектричного диска. Дзеркало зі щілиною зв'язку в експерименті щільно прилягало до плоскої поверхні діелектричного диска.

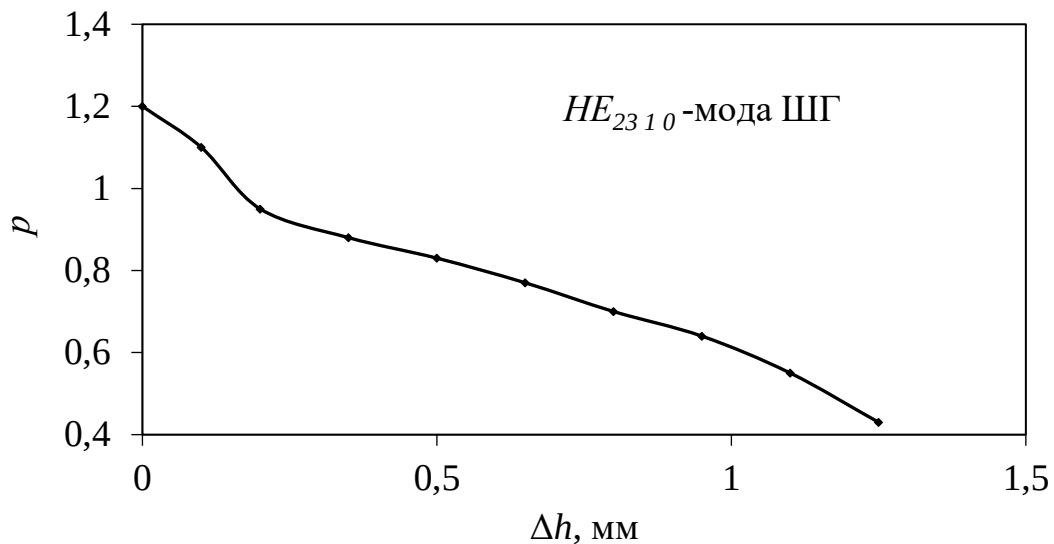


Рис. 3.5. Залежність параметра зв'язку з планарним ДР від висоти повітряного зазору при збудженні HE_{2310} -моди ШГ.

З рис. 3.5 видно, що при збільшенні висоти повітряного зазору параметр зв'язку з планарним ДР знижується. При малих висотах повітряного зазору $0 < \Delta h < 1$ мм спостерігається сильний закритичний зв'язок ($p > 1$). При подальшому збільшенні висоти повітряного зазору зв'язок з резонатором стає слабким ($p < 1$). Це свідчить про те, що в області розташування елемента зв'язку інтенсивність електричної компоненти резонансного поля зменшується. Причиною цього, скоріше за все, є часткове зміщення поля мод ШГ в повітряний зазор, при якому змінюється аксіальна координата максимуму інтенсивності. При значеннях величини $\Delta h < 1,25$ мм зв'язок з планарним ДР є настільки слабким, що резонансні відгуки мод ШГ практично не реєструються.

Найбільш інформативною з точки зору впливу повітряного зазору в планарному ДР на формування його енергетичних характеристик є залежність власної добротності Q_0 резонатора від висоти Δh повітряного зазору (рис.3.6). Для досліджень було обрано HE_{2310} -моду ШГ.

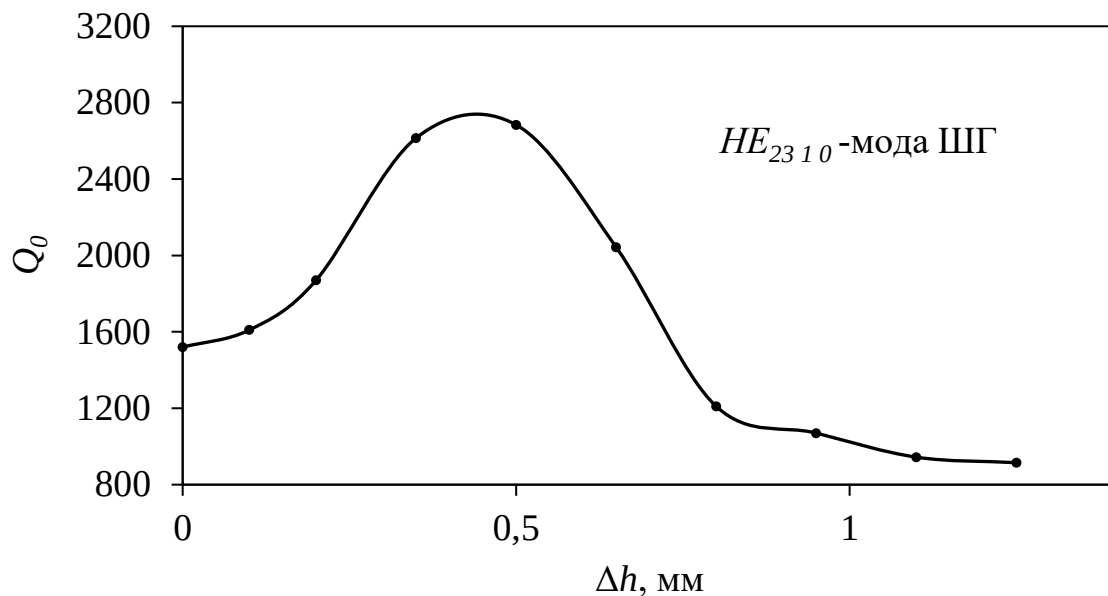


Рис.3.6. Залежність власної добротності планарного ДР від висоти повітряного зазору при збудженні $HE_{23 1 0}$ -моди ШГ.

З рис.3.6 видно, що досліджувана залежність має немонотонний характер. Спостерігається виражений максимум власної добротності в інтервалі значень величини $0,4 < \Delta h < 0,6$ мм, який для досліджуваного резонатора становить $Q_0 \approx 2840$. Навіть при незначному (до 0,1 мм) змінненні величини Δh щодо інтервалу її значень, який визначає найбільшу добротність, власна добротність знижується на 30%.

Пояснення такої поведінки добротності планарного ДР може бути отримано з позиції розгляду резонансних полів мод ШГ в планарних ДР з різними за висотою повітряними зазорами. У цьому випадку найбільш інформативними є залежності розподілу відносної інтенсивності електричної компоненти резонансних полів в планарному ДР від положення рухомого дзеркала (висоти повітряного зазору) як по аксиальній, так і по радіальній координаті. Перша залежність дозволяє оцінити зміну діелектричних і омичних втрат (в металевих дзеркалах), а друга - радіаційних втрат з криволінійної поверхні тонкого лейкосапфірового диска. Дані залежності в роботі було досліджено шляхом комп'ютерного моделювання на підставі абсолютних значень інтенсивності електричного поля.

Проведеними розрахунками було встановлено, що в досліджуваному інтервалі висоти повітряного зазору ($0,1 \text{ мм} < \Delta h < 1,3 \text{ мм}$) розподіл інтенсивності електричної компоненти резонансного поля мод ШГ уздовж радіальної координати близький до постійного. Іншими словами - зміна висоти повітряного зазору в досліджуваному інтервалі значень не призводить до зміни радіаційних втрат.

Проведеними дослідженнями було встановлено, що на відміну від радіального розподілу резонансного поля розподіл інтенсивності поля уздовж аксиальної координати суттєво залежить від висоти повітряного зазору. На рис.3.7 показано залежність поточної інтенсивності I_0 резонансного поля, наведеної до її максимального значення I_{max} , від відносної аксиальної координати, представленій у вигляді h_0/H , де h_0 - поточна аксіальна координата, $H = 0,7 \text{ мм}$ - висота планарного диска. Представлені нижче результати відносяться до електричної компоненти поля, вектор якої спрямований вздовж аксиальної координати. Дослідження розподілу полів було проведено для HE_{2310} -моди ШГ, збудженої в планарному ДР з різними за висотою повітряними зазорами. Пунктирні криві 1, 2 і 3 відображають поведінку резонансного поля мод ШГ уздовж аксиальної координати в резонаторах з повітряним зазором $\Delta h = 0,2; 0,6$ і $1,3 \text{ мм}$, відповідно. Суцільна лінія відповідає планарному ДР з щільно прилеглими до плоских основ діелектричного диска металевими дзеркалами ($\Delta h \approx 0$). Значення величини $h_0/H = 1$ відповідає межі розділу середовищ діелектрик-повітря. Область діелектрика відповідає значенням величини $h_0/H < 1$, а повітряного зазору - $h_0/H > 1$. Крайні точки на представлених кривих з найбільшою координатою h_0/H дозволяють визначити відносну інтенсивність резонансного поля на поверхні рухомого металевого дзеркала і відповідають межі розділу повітря-метал.

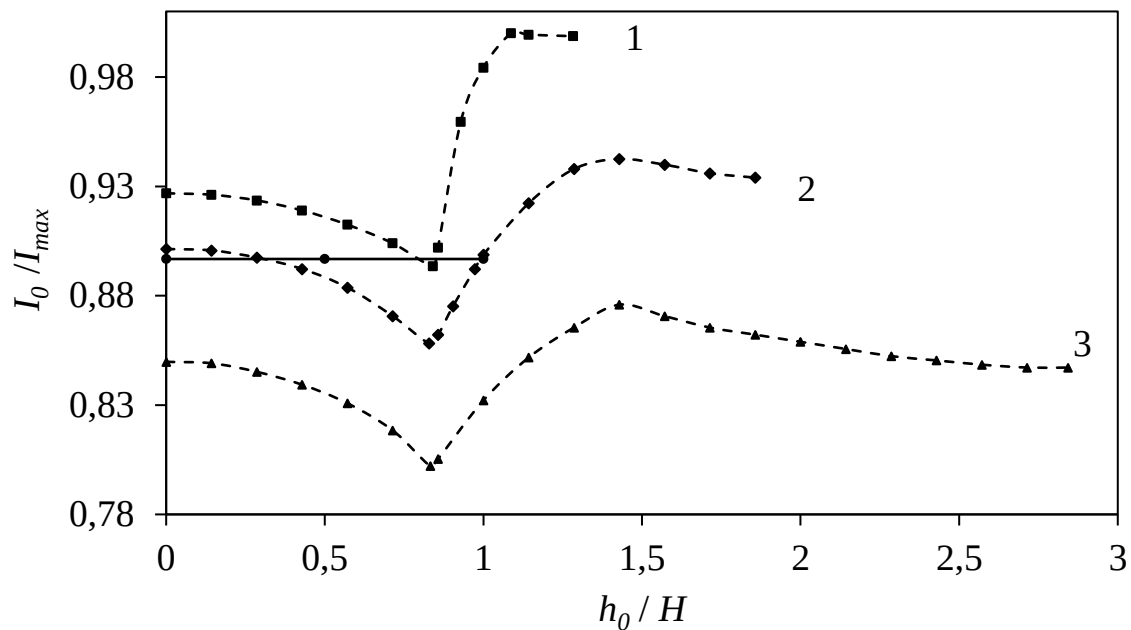


Рис.3.7. Залежність відносної інтенсивності поля HE_{2310} -моди ШГ в планарному ДР від відносної аксіальної координати при різних висотах повітряного зазору.

З рис. 3.7 видно, що в планарному ДР з щільно прилеглими до плоских основ діелектричного диска металевими дзеркалами $\Delta h \approx 0$ спостерігається однорідний розподіл поля вздовж аксіальної координати. У той же час при введенні всередину резонатора повітряного зазору, навіть з малою висотою $\Delta h = 0,2$ мм, розподіл резонансного поля кардинально змінюється. Так, спостерігається часткове зміщення резонансного поля мод ШГ з діелектричного диска до повітряного зазору. Причому при переході з діелектрика до повітря (або навпаки) інтенсивність поля на межі розділу діелектрик-повітря зменшується.

Найбільш цікавим є результат, який показує, що в планарному ДР область резонансного поля, яка характеризується найбільшою інтенсивністю, розташовується в повітряному зазорі. Саме цей факт головним чином вказує на зниження втрат в матеріалі резонатора. При збільшенні висоти повітряного зазору абсолютні значення інтенсивності резонансного поля в точках з фіксованими відносними аксіальними координатами зменшуються. Знижується інтенсивність резонансного поля і на металевих дзеркалах, що свідчить про зменшення омичних втрат. Це свідчить про те, що енергія, що запасується в повітряному зазорі, може

перевищувати енергію, що запасасться резонансним полем в діелектричному елементі резонатора. Раніше подібний ефект був виявлений в класичних ДР, збуджуваних на нижчих типах коливань, мінімальна висота яких близька до половини довжини хвилі в діелектричному матеріалі резонатора [17]. Таким чином, зниження втрат енергії в матеріалі резонатора, як в його діелектричному елементі, так і на металевих дзеркалах, визначають зростання добротності планарного ДР при збільшенні висоти повітряного зазору в інтервалі значень величини $0,2 \text{ мм} < \Delta h < 0,5 \text{ мм}$ (рис. 3.5). Ґрунтуючись на даних, представлених в [17], можна припустити, що подальше зменшення добротності при великих висотах повітряного зазору пов'язано з високими радіаційними втратами енергії. Очевидно, що оптимум висоти повітряного зазору з точки зору найбільшої добротності планарного ДР визначається електрофізичними і геометричними параметрами резонатора, а також вибором робочого діапазону частот.

Підтвердженням зміни аксіального розподілу мод ШГ в планарному ДР при введенні повітряного зазору є картини двомірного розподілу напруженості електричної компоненти резонансного поля мод ШГ (Рис. 3.8). На рис. 3.8 показано фрагмент двомірної моделі планарного ДР без (а) і з повітряним зазором $\Delta h = 0,2 \text{ мм}$ (б) з розподілом напруженості електричної компоненти поля HE_{2310} -моди ШГ.

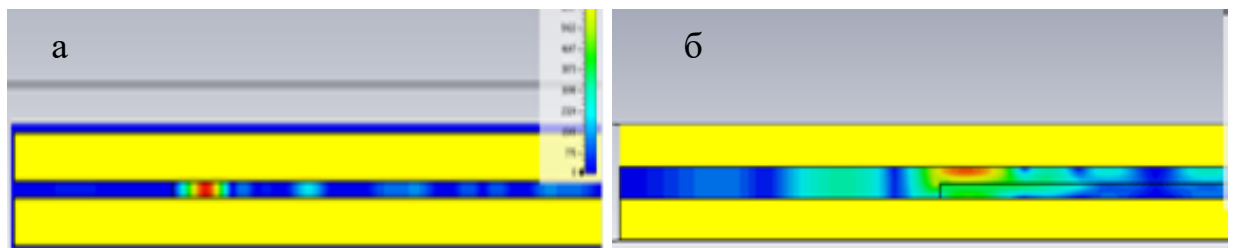


Рис. 3.8. Розподіл напруженості електричного компоненти поля HE_{2310} -моди ШГ поблизу краю діелектричного диска в планарному ДР без повітряних зазорів (а) і з одним (б) повітряним зазором $\Delta h = 0,2 \text{ мм}$.

З рис. 3.8 видно, що при введенні повітряного зазору в конструкцію планарного ДР, розподіл поля моди ШГ уздовж аксіальної координати суттєво змінюється. Максимум напруженості електричної компоненти поля зміщується з області діелектрика до повітряного зазору. З цього випливає, що діелектричні втрати

менше впливають на величину власної добротності планарного ДР з повітряним зазором, ніж резонатора без нього. Таким чином, встановлено, що введення повітряного зазору в конструкцію дискового планарного ДР (між діелектричним диском і одним з металевих дзеркал) призводить до зниження власних втрат енергії. Причиною цього є часткове зміщення резонансного поля робочих мод ШГ з діелектрика до повітряного зазору. Причому енергія, що запасється в повітряному зазорі, може перевищувати енергію резонансного поля в діелектричному елементі резонатора. При цьому відзначається зниження омичних втрат на металевих дзеркалах планарного ДР. Це дозволяє майже в 2 рази підвищити власну добротність планарного ДР.

3.2. Високодобротний планарний ДР в плоско-параллельному екрані з подвійним повітряним зазором.

Вище, в п. 3.1, було показано, що введення в конструкцію планарного ДР певного за висотою повітряного зазору між площиною одного з дзеркал і плоскою основою тонкого діелектричного диска, дозволяє майже в 2 рази підвищити його власну добротність. Причиною цього є зменшення діелектричних втрат за рахунок часткового зміщення резонансного поля робочих мод ШГ в повітряний зазор і зменшення омичних втрат на металевих дзеркалах через зменшення інтенсивності поля на їх поверхні. У зв'язку з цим викликає інтерес продовження цих досліджень в резонаторі з двома симетричними однаковими за висотою повітряними зазорами між металевими дзеркалами і плоскими основами тонкого діелектричного диска.

Об'єкт досліджень показано на рис. 3.9. Діелектричний диск 1, виготовлений з лейкосапфіра Al_2O_3 (вісь анізотропії перпендикулярна плоских поверхонь) мав радіус $R = 20$ мм і висоту $H = 0,7$ мм. Він розташовувався між двома латунними дзеркалами 2 і 3, товщиною 3 мм квадратної форми 55 x 55 мм. Введення в конструкцію одного повітряного зазору досягалося за рахунок підняття дзеркала 3. Для цього це дзеркало було рухомим уздовж аксиальної координати. Запровадження іншого повітряного зазору між плоским стороною діелектричного диска 1 і металевим дзеркалом 2 досягалося шляхом розміщення на останньому

круглих металевих шайб 4 малого діаметра. Шайби діаметром 15 мм розташовувалися співвісно з діелектричним диском, під ним, поза області локалізації полів робочих мод ШГ. Таким чином, вони не могли впливати на поведінку електродинамічних характеристик планарного ДР. В експерименті використовувався набір шайб різної висоти з кроком 0,1 мм.

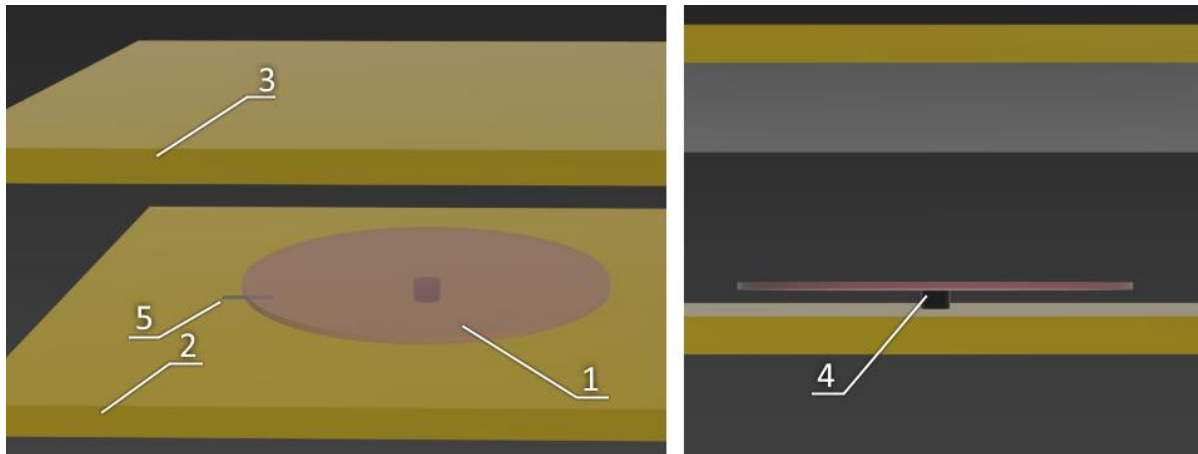


Рис. 3.9 Конструкція планарного ДР з двома повітряними зазорами.

Для збудження робочих мод ШГ в планарному ДР було використано щілину зв'язку 5 в металевому дзеркалі 2, утворену відкритим кінцем звуженого прямокутного металевого хвилеводу. Вона мала розміри 7,2 x 0,5 мм. Широка сторона щілини зв'язку орієнтувалася паралельно радіусу плоскої основи діелектричного диска, що відповідало збудження *HE*-мод ШГ в планарному ДР. Для підвищення ефективності збудження мод ШГ середина щілини зв'язку розташовувалась на межі диску. Виведення енергії резонансного поля здійснювалось через ту ж щілину зв'язку. Таким чином, в експерименті було реалізовано схему збудження мод ШГ в планарному ДР за схемою «на відбиття».

Експериментальні дослідження було проведено в смузі частот 31,0-37,5 ГГц з використанням аналізатора ланцюгів Pna-L N5230a 10MHz ÷ 40GHz Agilent Technologies. Головним чином досліджувалися енергетичні характеристики планарного ДР з двома рівними по висоті повітряними зазорами, а саме, залежності параметра зв'язку і власної добротності від висоти повітряних зазорів. Для ідентифікації мод відповідно до розподілу їх резонансних полів здійснювалось комп'ютерне моделювання на основі стандартного програмного забезпечення CST

Microwave Studio 2013. Результати комп'ютерного моделювання дозволили визначити розподіл інтенсивності електричної компоненти резонансного поля мод ШГ уздовж радіальної і аксіальної координат.

З уявлень електродинаміки очевидно, що введення подвійного повітряного зазору в конструкцію планарного ДР призведе до зниження ефективності збудження мод ШГ в планарному ДР через віддалення тонкого діелектричного диска від елемента зв'язку. Згідно з раніше проведеними дослідженнями в класичних ДР [17, 26] поля мод ШГ в основному локалізовані в діелектричних резонансних структурах. За їх межами інтенсивність поля знижується. Тому віддалення тонкого діелектричного диска від елемента зв'язку призведе до зниження інтенсивності резонансного поля в області його розташування і, як наслідок, до зниження ефективності збудження робочих типів коливань. Свідченням вищесказаного є залежність параметра зв'язку p від висоти Δh подвійного повітряного зазору в планарному ДР (Рис. 3.10). Оскільки дослідження було проведено при однакових за висотою повітряних зазорах між плоскими основами діелектричного диска і металевими дзеркалами, то під висотою подвійного повітряного зазору в подальшому будемо розуміти висоту одного із зазорів, тобто кожного з них. На рис. 3.10 показано поведінку параметра зв'язку з планарним ДР при збудженні в ньому HE_{2310} -моди ШГ.

З рис. 3.10 видно, що навіть при малому $\Delta h = 0,1$ повітряному зазорі між тонким діелектричним диском і металевим дзеркалом з розташованою в ньому щільною зв'язку призводить до переходу від режиму сильного закритичного зв'язку ($p > 1$), яка спостерігалася в планарних ДР з щільно прилеглими металевими дзеркалами, до режиму слабкого зв'язку ($p < 1$). При подальшому збільшенні висоти подвійного повітряного зазору спостерігається близьке до лінійного зниження параметра зв'язку. При висотах повітряних зазорів $\Delta h \approx 2$ зв'язок стає настільки слабкий, що резонансні відгуки мод ШГ, збуджуваних в планарному ДР з подвійним повітряним зазором практично не реєструються.

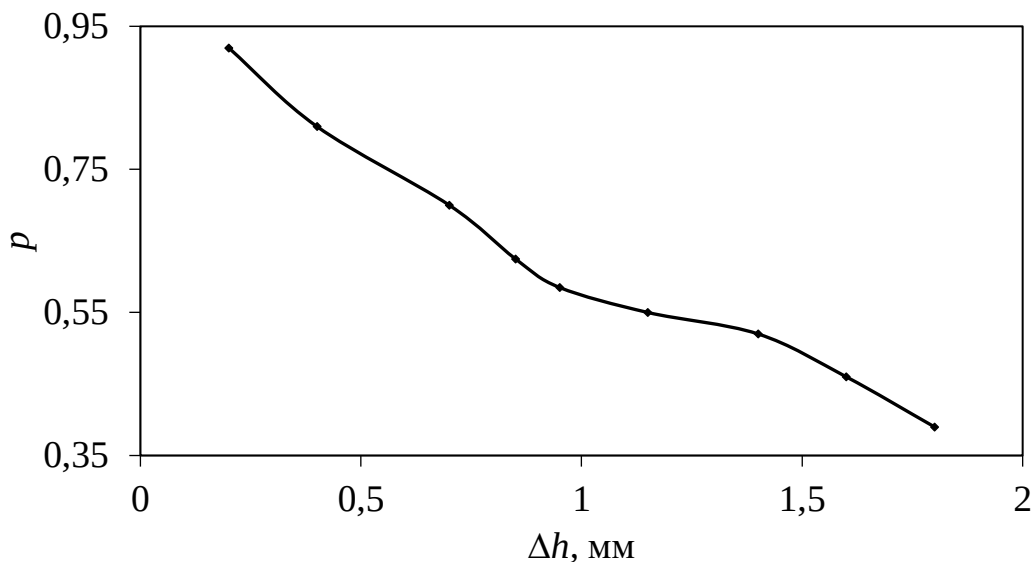


Рис. 3.10. Залежність параметра зв'язку від висоти подвійного повітряного зазору в планарному ДР при збудженні в ньому HE_{2310} -моди ШГ.

Позитивним моментом при використанні слабкою зв'язку щодо забезпечення високої власної добротності ДР є те, що втрати на елементі зв'язку незначні і вони суттєво не впливають на її поведінку. Раніше це було показано на прикладі класичних відкритих дискових ДР [170,171].

На рис. 3.11 показано залежність власної добротності Q_0 планарного ДР від висоти Δh подвійного повітряного зазору при збудженні в резонаторі HE_{2310} -моди ШГ (крива 1). Для порівняння на рис. 3.11 представлено поведінки власної добротності планарного ДР з одним повітряним зазором (крива 2), результати дослідження якої представлено в п. 3.1, і планарного ДР з металевими дзеркалами, щільно прилеглими до плоских основ тонкого лейкоапфірового диска (пряма 3).

З рис. 3.11 видно, що введення в конструкцію планарного ДР подвійного, також як і одинарного (п.3.1), малого за висотою повітряного зазору призводить до збільшення власної добротності резонатора. При цьому залежність Q_0 (Δh) характеризується вираженою нелінійною поведінкою.

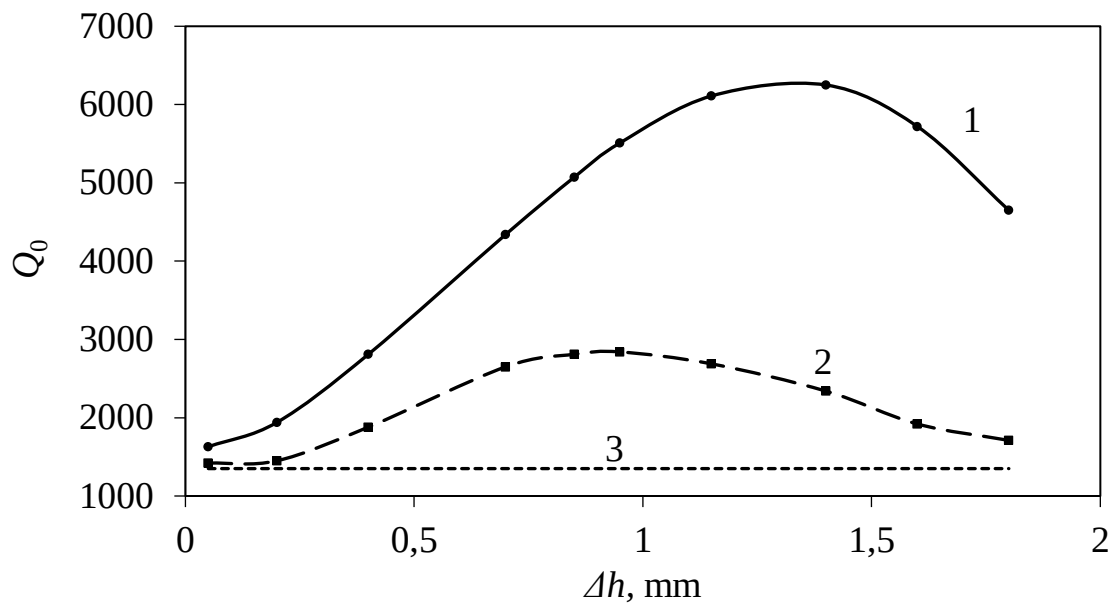


Рис. 3.11. Залежність власної добротності планарного ДР від висоти повітряних зазорів.

В інтервалі зміни висоти подвійного повітряного зазору $0,8 < \Delta h < 1,4$ мм спостерігається зростання власної добротності планарного ДР. При подвійному повітряному зазорі з висотою $\Delta h = 1,4$ мм власна добротність планарного ДР досягає свого найбільшого значення $Q_0 = 6250$. Таким чином, найбільша власна добротність планарного ДР перевищує добротність планарного ДР з щільно прилеглими металевими дзеркалами ($Q_0 = 1350$) більш ніж в 4, 5 рази і в 2,2 рази найбільшу власну добротність планарного ДР з одним повітряним зазором ($Q_0 = 2840$). Слід зазначити, що власна добротність планарного ДР з подвійним повітряним зазором, незважаючи на малу висоту діелектричного диска ($H \ll \lambda d$), навіть перевищує добротність класичних сапфірових резонаторів ($H \geq \lambda d$), розташованих в плоско-паралельному екрані з щільно прилеглими металевими дзеркалами. Добротність таких класичних резонаторів з провідними дзеркалами становить $Q_0 \approx 5000$ [159].

З рис. 3.11 видно, що при висотах подвійного повітряного зазору $\Delta h > 1,4$ мм власна добротність планарного ДР знижується. За аналогією з раніше проведеними дослідженнями класичних дискових ДР на нижчих модах коливань, розташованих

в плоско-паралельному екрані [17], причиною зниження добротності планарного ДР з подвійним повітряним зазором великої висоти є зростання радіаційних втрат.

Пояснити таку немонотонну поведінку власної добротності планарного ДР з подвійним повітряним зазором дозволяють результати дослідження розподілу інтенсивності полів (електричної компоненти) мод ШГ уздовж аксиальної і радіальної координати. Вони дозволяють якісно оцінити зміну діелектричних і омичних (в металевих дзеркалах) втрат, а також зміну радіаційних втрат при випромінюванні з боку криволінійної поверхні тонкого діелектричного диска. Дані залежності було досліджено шляхом комп'ютерного моделювання на основі абсолютних значень напруженості електричної компоненти резонансного поля мод ШГ. Для досліджень було обрано $HE_{23\ 1\ 0}$ -моду ШГ.

Проведеними розрахунковими дослідженнями було встановлено, що в інтервалі висот подвійного повітряного зазору $0,1\text{ мм} < \Delta h < 1,4\text{ мм}$ розподіл інтенсивності поля мод ШГ вздовж радіальної координати практично не змінюється. З цього випливає, що зміна висоти подвійного повітряного зазору в діапазоні цих значень не приводить до суттєвої зміни радіаційних втрат з боку криволінійної поверхні тонкого діелектричного диска. Встановлено, що, на відміну від радіального розподілу електричної компоненти резонансного поля мод ШГ, її розподіл уздовж аксиальної координати залежить від висоти подвійного повітряного зазору (рис. 3.12). На рис. 3.12 показано фрагмент двовірної моделі напруженості електричного поля моди ШГ в планарному ДР з металевими дзеркалами, щільно прилеглими до плоских сторін тонкого діелектричного диска (а), а також в цьому резонаторі з одним (б) і двома (в) повітряними зазорами $\Delta h = 0,2\text{ мм}$. Показано розподіл напруженості електричної компоненти поля $HE_{23\ 1\ 0}$ -моди ШГ поблизу краю тонкого діелектричного диска.

З Рис. 3.12 видно, що аксіальний розподіл електричної компоненти поля обраної моди ШГ суттєво залежить від введення в конструкцію планарного ДР як одинарного, так і подвійного повітряного зазорів. У резонаторі з повітряними зазорами максимум напруженості електричної компоненти поля моди ШГ зміщується з області діелектричного диска до повітряних зазорів.

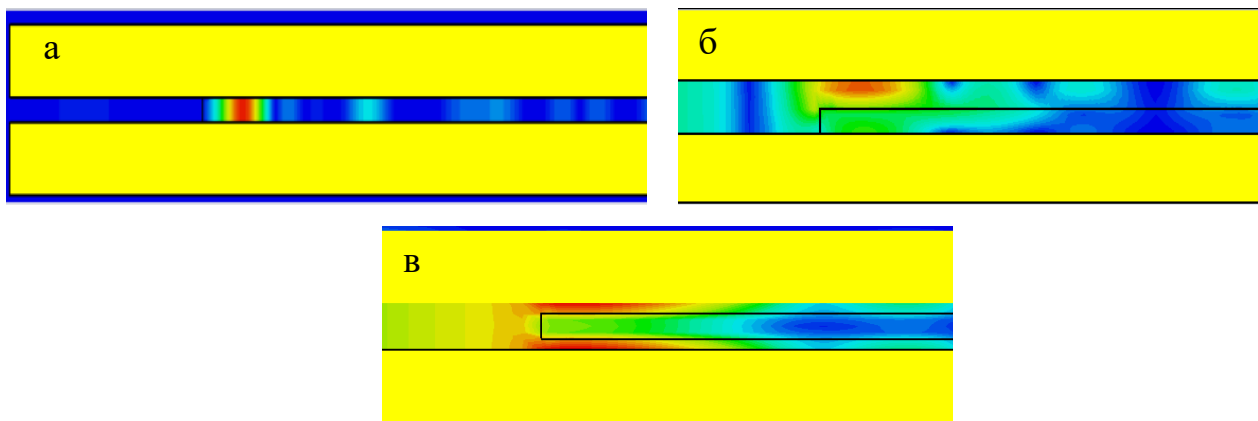


Рис. 3.12 Розподіл напруженості електричної компоненти поля HE_{2310} -моди ШГ поблизу краю діелектричного диска в планарному ДР без повітряних зазорів (а), з одним (б) і двома (в) повітряними зазорами $\Delta h = 0,2$ мм.

Найбільш інформативною з позиції визначення зміни втрат в планарному ДР є залежність відносної інтенсивності резонансного поля мод ШГ від висоти подвійного повітряного зазору. На рис.3.13 показано залежність відносної інтенсивності I_0/I_{max} електричної компоненти поля HE_{2310} -моди ШГ (I_0 - поточне значення інтенсивності, I_{max} - її максимальне значення) від поточної аксиальної координати h_0 для різних за висотою Δh подвійних повітряних зазорів в планарному ДР. Представлені нижче результати описують поведінку електричної компоненти поля моди ШГ уздовж аксиальної координати. Діелектричний диск на рис. 3.13 схематично представлено сірою областю. Координата $h_0 = 0$ відповідає середині висоти діелектричного диска. Крайні точки на представлених кривих дозволяють визначити відносну інтенсивність поля моди ШГ на поверхні металевих дзеркал. Вони відповідають межі розділу метал-повітря.

З рис. 3.13 видно, що при введенні навіть малих повітряних зазорів $\Delta h = 0,05$ мм в конструкцію планарного ДР розподіл інтенсивності поля мод ШГ значно змінюється у порівнянні з однорідним розподілом поля в планарному ДР без повітряних зазорів (на рис. 3.13 не показано). Спостерігається часткове зміщення резонансного поля моди ШГ з діелектричного диска до повітряного зазору, при якому інтенсивність резонансного поля в області повітряних зазорів перевищує інтенсивність поля в діелектричному елементі планарного ДР. Це

свідчить про те, що більша частина енергії електромагнітного поля, запасється в повітряних зазорах резонатора. Таким чином, слід очікувати, що введення в конструкцію планарного ДР подвійного повітряного зазору призведе до суттєвого зменшення діелектричних втрат.

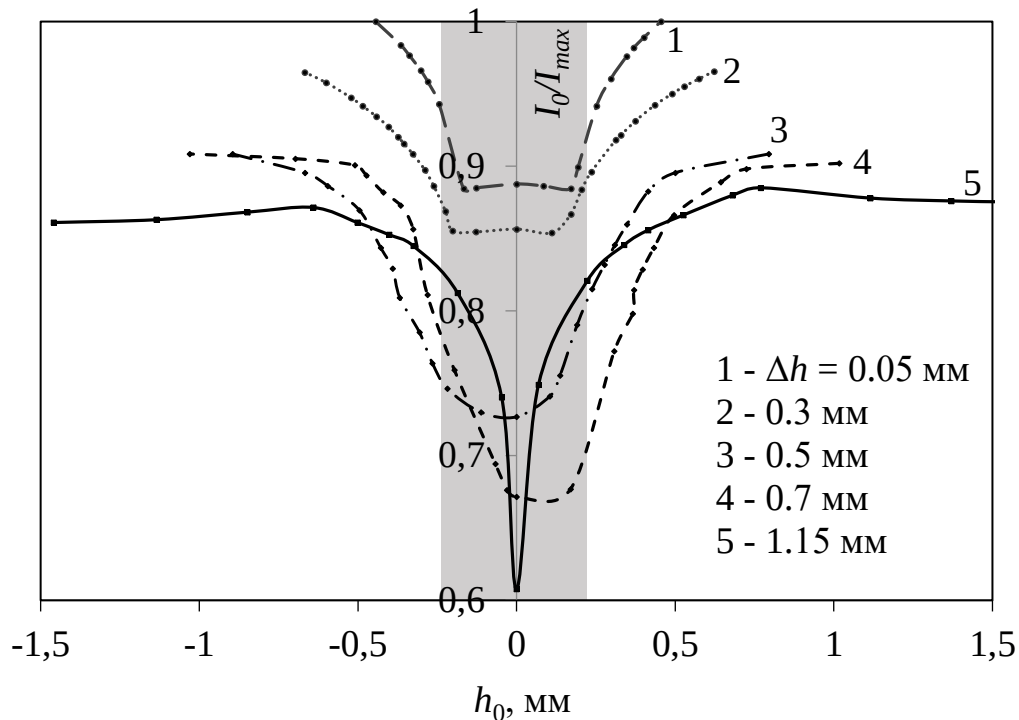


Рис.3.13. Залежність відносної інтенсивності поля (E -компоненти) HE_{2310} - моди ШГ в планарному ДР від аксіальної координати при різних висотах подвійного повітряного зазору.

При збільшенні висоти повітряних зазорів інтенсивність резонансного поля в діелектрику зменшується, і область локалізації поля моди ШГ в ньому помітно звужується. Цікаво, що в цьому випадку знижується і інтенсивність резонансного поля поблизу металевих дзеркал. Це свідчить про зменшення не тільки діелектричних, але й омичних втрат в планарному ДР. Подібний ефект раніше спостерігався в дискових класичних ДР, збуджуваних на нижчих модах [17]. Таким чином, зменшення як діелектричних, так і омичних втрат в планарному ДР з подвійним повітряним зазором при $0,1 \text{ мм} < \Delta h < 1,5 \text{ мм}$ визначає збільшення власної добротності такого резонатора (рис. 3.13). Грунтуючись на даних,

представлених в [17], можна припустити, що зменшення добротності планарного ДР при значних висотах подвійного повітряного зазору $\Delta h > 1,5$ мм пов'язано зі зростанням радіаційних втрат. Очевидно, що оптимальна висота повітряного зазору відповідає найбільшій власній добротності визначається параметрами планарного ДР і вибором робочого діапазону частот.

Таким чином, проведеними розрахунковими і експериментальними дослідженнями встановлено, що введення подвійного повітряного зазору в конструкцію планарного ДР при певних співвідношеннях висот тонкого діелектричного диска і повітряних зазорів призводить до суттєвого зростання його власної добротності через зниження діелектричних і омичних втрат. Причиною цього ефекту є часткове зміщення резонансного поля робочих мод ШГ з діелектрика в повітряний зазор. При певних значеннях висот повітряних зазорів енергія, що запасається в них, перевищує енергію резонансного поля в діелектричному елементі планарного ДР. Це дозволяє збільшити власну добротність планарного ДР більш ніж в 4,5 рази. Показано, що власна добротність планарного ДР з подвійним повітряним зазором може бути вище, ніж у класичних ДР, розташованих в плоско-паралельному екрані.

3.3. Перетворення спектральних характеристик планарних ДР шляхом введення повітряних зазорів.

Вище було показано, що введення повітряних зазорів в конструкцію планарного ДР призводить до зміни його енергетичних характеристик. Не менш цікавим завданням є вивчення впливу повітряних зазорів на поведінку спектральних характеристик такого резонатора. Розглянемо цю задачу стосовно планарного ДР на основі тонкого лейкоапфірового диска. Для проведення експериментальних і розрахункових досліджень шляхом комп'ютерного моделювання за доцільне є вибір не випромінюючого елемента зв'язку. Раніше було показано, що при використанні випромінюючої щілини зв'язку, утвореної відкритим кінцем полого металевих хвильоводу, спектр планарного ДР досить густий. Крім робочих мод ШГ в ньому присутні хвильоводні моди, утворені

відбиттям хвиль від поверхні металевих дзеркал з малою відстанню між ними. Для розрідження спектра в подальшому будемо використовувати розподілений зв'язок планарного ДР з діелектричним хвилеводом (ДХ). У відкритому стані ДХ не є самостійним випромінювачем. Інтенсивність поля, утвореного рухомою хвилею, спадає до мінімальних значень поблизу поверхні ДВ вже на відстанях, порівнянних з довжиною хвилі [26]. Збудження мод ШГ в ДР при його розподіленому зв'язку з ДХ здійснюється за рахунок відбора енергії на власних частотах резонатора. Для цього відстань між криволінійною поверхнею ДР і плоскою поверхнею ДХ прямокутного перетину вибирається меншою за робочу довжину хвилі.

Об'єкт досліджень представлено на рис.3.14. Діелектричний диск 1, виготовлений з монокристалу лейкосапфіра Al_2O_3 (вісь анізотропії перпендикулярна до плоских поверхонь; $\epsilon_{\perp} = 9,4$; $\text{tg} \delta = 10^{-4}$ при $T = 293$ К) радіусом $R = 20$ мм і висотою $H = 0,7$ мм. Він розташовувався між двома мідними дзеркалами 2 і 3 квадратної форми 55×55 мм товщиною 3 мм. Мідні дзеркала повністю покривали плоскі поверхні диска. Одне з цих дзеркал (дзеркало 2 на рис. 3.14) було рухомим уздовж аксиальної координати (висоти тонкого диска). Це дозволяло створювати повітряний зазор між площиною рухомого дзеркала і плоскою основою диска.

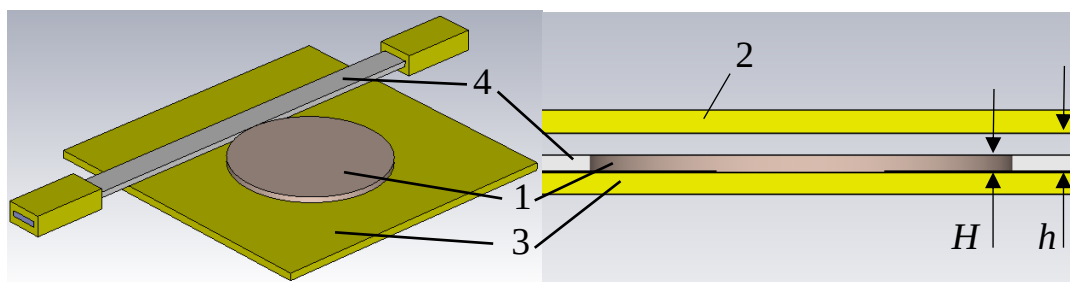


Рис. 3.14. Об'єкт досліджень: планарний ДР, збуджуваний розподіленим зв'язком з ДХ.

Для збудження мод ШГ в планарному ДР використовувався ДХ 4 (Рис. 3.14) прямокутного перетину $7,2 \times 0,7$ мм. Широка стінка ДХ розташовувалася на поверхні плоского нерухомого металевого дзеркала 3 і при всіх подальших дослідженнях її положення не змінювалося. Розмір вузької стінки ДХ обирався

рівній висоті лейкосапфірового диска, для того, щоб в конструкції резонатора при щільному приляганні металевих дзеркал до плоских основ тонкого диска уникнути появи небажаних повітряних зазорів. Саме вузька стінка ДХ відповідала за збудження мод ШГ в планарному ДР. Така орієнтація ДХ забезпечувала збудження *HE*-поляризованих мод ШГ в резонаторі. Відстань між вузькою стінкою ДХ і найближчою до неї точкою на криволінійній поверхні діелектричного диска було постійним і дорівнювало 0,5 мм. Для запобігання збурення резонансних полів мод ШГ елементом зв'язку для виготовлення ДХ було обрано матеріал з малими втратами і малою відносною діелектричною проникністю. Для цих цілей було обрано Фторопласт-4 ($\text{tg}\delta = 2 \times 10^{-4}$, $\epsilon = 2,08$). Цей матеріал є ізотропним і відповідає визначеним вимогам. ДХ розташовувався в області розриву хвилеводної лінії, утвореної стандартним прямокутним металевим хвилеводом. Для забезпечення найменшого КСХН кінці ДХ були звужені у вигляді клину.

Експериментальні дослідження було проведено в смузі частот 26,5 - 40,0 ГГц з використанням аналізатора ланцюгів Pna-L N5230a 10MHz ÷ 40GHz Agilent Technologies. Досліджувалися спектральні характеристики планарного ДР з повітряним зазором і без нього у вигляді набору власних частот і модового складу спектра. Крім того, експериментально досліджувалися енергетичні характеристики: амплітуди резонансних відгуків, які дозволяли судити про ефективність збудження мод ШГ в планарному ДР, параметр зв'язку і власна добротність резонатора. Розрахункові дослідження здійснювались на основі комп'ютерного моделювання за допомогою стандартного програмного пакета CST Microwave Studio 2013.

При вирішенні поставленого завдання вивчення особливостей формування спектральних характеристик планарного ДР необхідно з'ясувати принципові відмінності між модовим складом спектра дискового ДР, аксіально екранованого двома металевими дзеркалами, і модового складу подібного відкритого резонатора. Для цього розглянемо класичний дисковий ДР з висотою $H > \lambda_d / 2$, що допускає існування мод ШГ у відкритому стані діелектричного диска. Дослідження, проведені на основі комп'ютерного моделювання, показали, що основним з них є

наявність вищих радіальних мод ШГ в спектрі аксіально екранованого резонатора. Для прикладу, на рис. 3.15а і 3.15б, відповідно, показано розподіл полів мод ШГ, збуджуваних у відкритому ДР з лейкосапфіра висотою $H = 1,5$ мм і радіусом $R = 20$ мм і в подібному аксіально екранованому резонаторі, на близьких резонансних частотах ($f \approx 32,8$ ГГц).

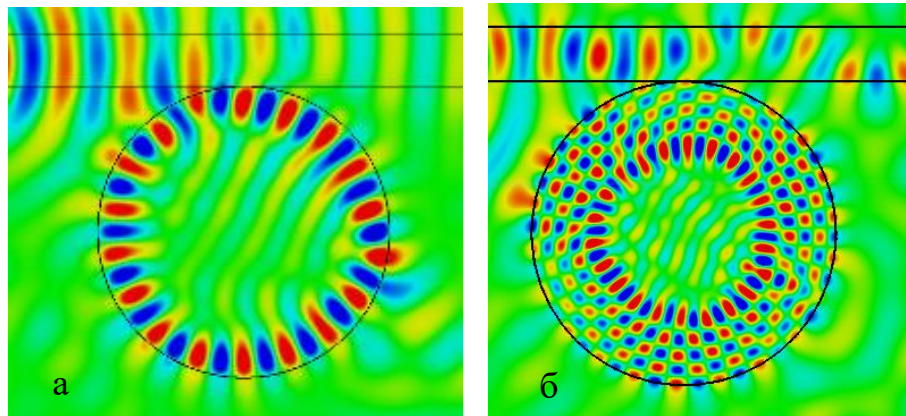


Рис. 3.15 . Розподіл полів $HE_{18\ 1\ 1}$ - моди ШГ у відкритому дисковому ДР (а) і $HE_{22\ 5\ 1}$ -моди ШГ в подібному аксіально екранованому резонаторі (б).

Видно, що аксіальне екранування дискових ДР призводить до суттєвої зміни їх спектральних характеристик. Як можна побачити з Рис. 3.15, у відкритих дискових ДР і подібних екранованих резонаторах на близьких частотах збуджуються моди ШГ, які суттєво відрізняються значенням як радіального, так і азимутального індексів. Змінення азимутального індексу мод ШГ в ДР відбувається пропорційно зміні частоти. Більш високим значенням азимутального індексу відповідають більші за значенням резонансні частоти. Тому слід очікувати, що аксіальне екранування дискових ДР суттєво впливає на модовий склад їх спектрів, а також на резонансні частоти мод ШГ з фіксованим набором модальних індексів.

Повний склад модових наборів, збуджуваних у відкритому і подібному аксіально-екранованому дискових ДР в обраному для досліджень діапазоні частот, представлено на рис. 3.16а і 3.16б, відповідно.

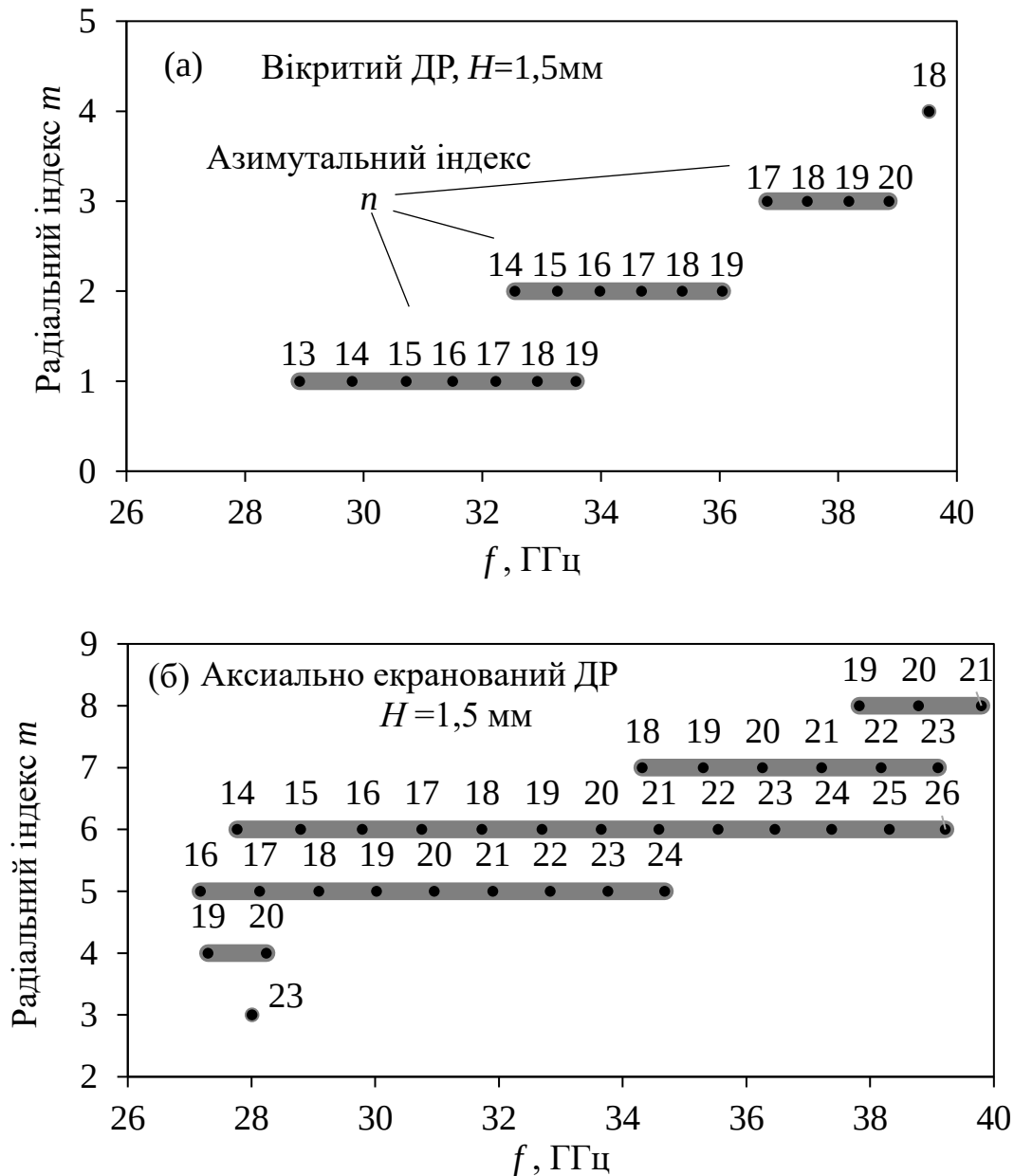


Рис. 3.16. Модовий склад в спектрах відкритого дискового ДР (а) з висотою 1,5 мм і подібного аксіально екранованого резонатора (б).

Видно, що покриття плоских основ діелектричного диска провідними поверхнями призводить до згущення його спектральних характеристик. В спектрі екранованого ДР переважають моди ШГ з вищими радіальними індексами $m > 2$. При цьому нижчі радіальні моди ($m = 1$) в спектрі аксіально екранованого дискового ДР в обраній смузі частот відсутні. На відміну від цього, спектр відкритого ДР більш розріджений. Його модовий набір переважно складають нижчі

радіальні моди ШГ. При цьому моди ШГ з вищими радіальними індексами $m > 4$ в обраній смузі частот відсутні.

Від розгляду класичних дискових ДР повернемося до досліджуваного планарного ДР з висотою 0,7 мм. Як було показано вище, встановлено, що *HE*-поляризовані моди ШГ не збуджуються в такому резонаторі, що перебуває у відкритому стані. Для вирішення задачі збудження мод ШГ розмістимо тонкий діелектричний диск на площині тільки одного металевого дзеркала. Інша плоска сторона тонкого діелектричного диска є відкритою. Таким чином, здійснюється лише часткове аксіальне екранування тонкого діелектричного диска. Раніше в цій роботі таке завдання не розглядалася. Шляхом комп'ютерного моделювання та експериментально було встановлено, що при розподіленому зв'язку з ДХ, в частково екранованому планарному ДР досягається режим збудження мод ШГ. Найбільш характерні розподіли полів мод ШГ в частково екранованому планарному ДР показано на рис. 3.17. Для порівняння на рис. 3.18 показано розподіл полів мод ШГ в планарному ДР з повним аксіальним екрануванням (з двома дзеркалами).

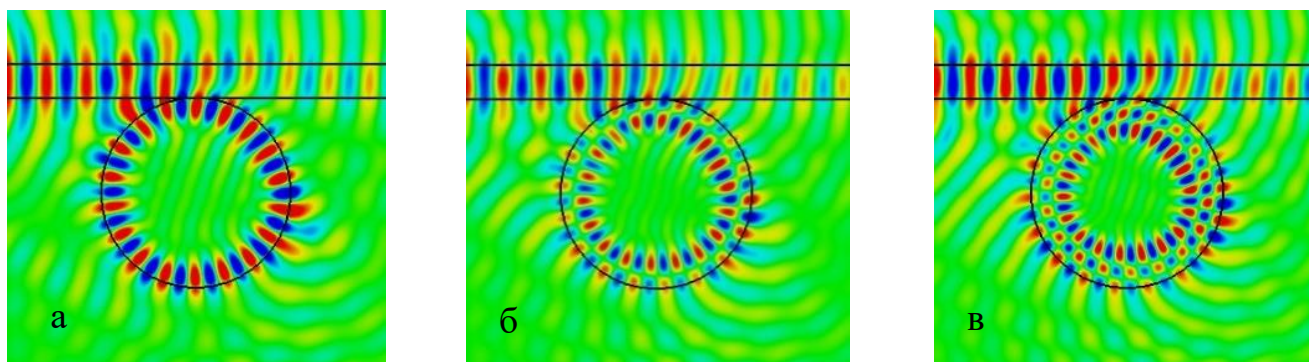


Рис. 3.17 Розподіл електричних компонентів полів мод ШГ з радіальними індексами $m = 1$ (а); 2 (б); 3 (в) і азимутальним індексом $n = 18$ в частково екранованому планарному ДР з висотою $H = 0,7$ мм (з одним металевим дзеркалом).

З рис. 3.17 видно, що в спектрі частково екранованого планарного ДР переважають нижчі радіальні моди з індексами $1 \leq m \leq 3$. Резонансні поля таких мод ШГ більш локалізовані поблизу краю діелектричного диска.

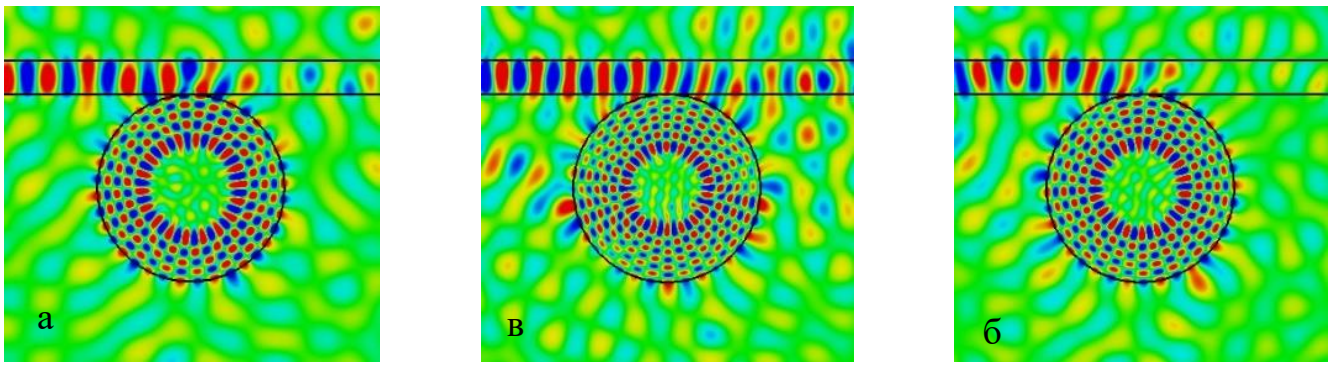


Рис. 3.18 Розподілу полів мод ШГ з радіальними індексами $m = 5$ (а); 6 (б); 7 (в) і азимутним індексом $n = 18$ в повністю екранованому планарному ДР з висотою $H = 0,7$ мм (з двома металевими дзеркалами).

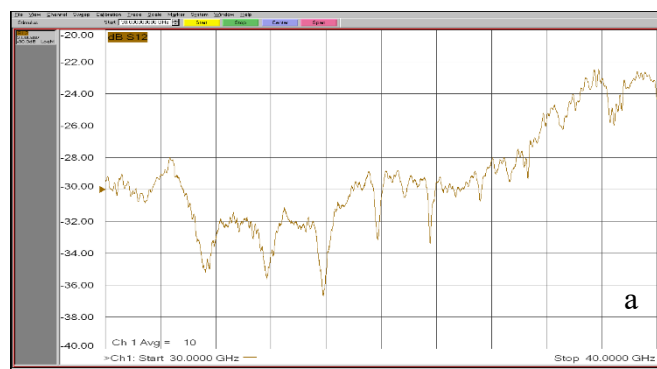
На відміну від частково екранованого резонатора в спектрі планарного ДР з двома дзеркалами виключно переважають вищі радіальні моди ШГ (Рис. 3.18). При цьому в обраному діапазоні частот моди ШГ з радіальними індексами $m < 5$ відсутні. Представлені на рис. 3.19 модові склади спектрів повністю (а) і аксіально частково екранованого (б) планарних ДР, це наочно підтверджують.





Рис. 3.19 Модові склади спектрів повністю (а) і аксіально частково екранованого (б) планарних ДР.

З рис. 3.19 також видно, що при аксіально повному екрануванні планарного ДР моди ШГ збуджуються в усій обраній для досліджень смузі частот. В частково екранованому ДР збудження мод ШГ здійснюється лише в високочастій частині діапазону, на частотах $f > 30$ ГГц. У більш довгохвильовій частині спектру вони не збуджуються, через порушення умови повного внутрішнього відбиття хвиль від плоских поверхней діелектричного диска, з яких лише одна покрита металевим дзеркалом. Підтвердженням обмежених можливостей аксіально частково екранованого планарного ДР щодо збудження мод ШГ у всьому досліджуваному діапазоні частот є експериментально визначений S -параметр такого резонатора, представлений на рис. 3.20а.



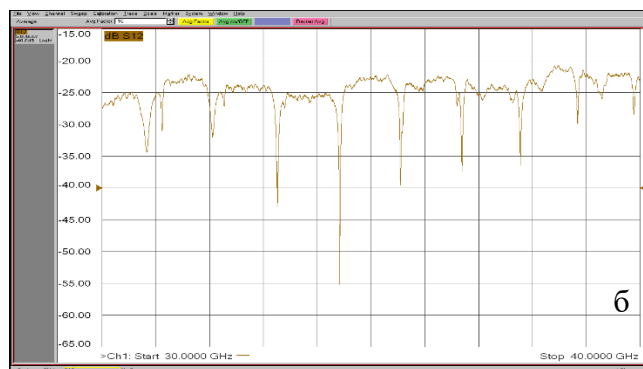


Рис. 3.20 S-параметри аксіально частково (а) і повністю (б) екранованого планарних ДР.

З Рис. 3.20а видно, що в низькочастотній частині обраного для досліджень діапазону частот резонансні відгуки мод ШГ в спектрі аксіально частково екранованого планарного ДР відсутні, на відміну від подібного повністю екранованого резонатора (Рис. 3.20б). В спектрі останнього резонансні відгуки мод ШГ спостерігаються у всьому діапазоні. Також видно, що ефективність збудження мод ШГ в планарному ДР повністю екранованому в аксіальному напрямку, вище ніж в аксіально частково екранованому резонаторі. Про це свідчать більш високі амплітуди резонансних відгуків мод ШГ в його спектрі (Рис. 3.20б).

Необхідно відзначити, що спектр повністю екранованого в аксіальному напрямку планарного ДР досить розріджений, незважаючи на наявність металевих дзеркал на плоских основах тонкого діелектричного диска. Причиною цього, як зазначалося вище, є використання невідпромінюючого елемента зв'язку - діелектричного хвилеводу.

З вищесказаного можна зробити висновок, що розширити можливості планарних ДР щодо збудження в них мод ШГ дозволяє розташування на плоскій основі тонкого діелектричного диска хоча б однієї відбиваючої поверхні у вигляді металевого дзеркала. Однак для резонатора такої конструкції існують обмеження, пов'язані з вибором робочого частотного діапазону.

У даній роботі раніше було показано, що введення хоча б одного повітряного зазору між плоскою основою тонкого діелектричного диска і одним з металевих дзеркал призводить до залежності енергетичних характеристик планарного ДР від

висоти повітряного зазору. Не менший інтерес викликає задача впливу повітряного зазору в конструкції планарного ДР на поведінку його спектральних характеристик у вигляді модового складу спектра.

Простежимо динаміку зміни спектральних характеристик перестроюваного планарного ДР при переході від повного аксіального екранування (диск між двома металевими дзеркалами) до часткового шляхом зміщення одного з дзеркал уздовж аксіальної координати. З точки зору геометричної оптики очевидно, що віддалення металевих дзеркал від плоскої основи тонкого діелектричного диска призводить до зміни умов відбиття хвиль від плоских поверхонь резонатора. З точки зору формування резонансних полів мод ШГ роль повітряного зазору в конструкції тонкого планарного ДР також очевидна. Як було показано в п.п 3.1 і 3.2 поля мод ШГ глибоко проникають в повітряний зазор. Отже, ефективне значення діелектричної проникності резонатора щодо полів мод ШГ визначається висотою повітряного зазору. Надалі для опису перестроюваного тонкого планарного ДР з повітряним зазором ми будемо використовувати відносне значення висоти H/h , яке визначається як відношення висоти H діелектричного диска до відстані h між металевими дзеркалами (Рис. 3.14). Очевидно, що при щільному приляганні металевих дзеркал до плоских основ діелектричного диска відносна висота резонатора $H/h = 1$, а з введенням повітряного зазору – $H/h < 1$. При $H/h = 1$ в спектрі планарного ДР, як було показано вище, переважають моди ШГ з більш високими радіальними індексами $m \geq 5$.

При створенні навіть мінімального за висотою повітряного зазору, відповідаючого відносній висоті резонатора $H/h = 0,93$, резонансні частоти вищих радіальних мод значно підвищуються. Починаючи з $H/h = 0,87$ модовий склад спектра планарного ДР кардинально змінюється. У його спектрі переважають моди з більш низькими радіальними індексами, а більш високі радіальні моди в розглянутому діапазоні частот не збуджуються. Їх резонансні частоти знаходяться за межами верхньої межі діапазону. Для прикладу на рис. 3.21а і 3.21 б, відповідно, показано модові склади спектрів планарних ДР з відносними висотами $H/h = 0,93$ і $0,87$.

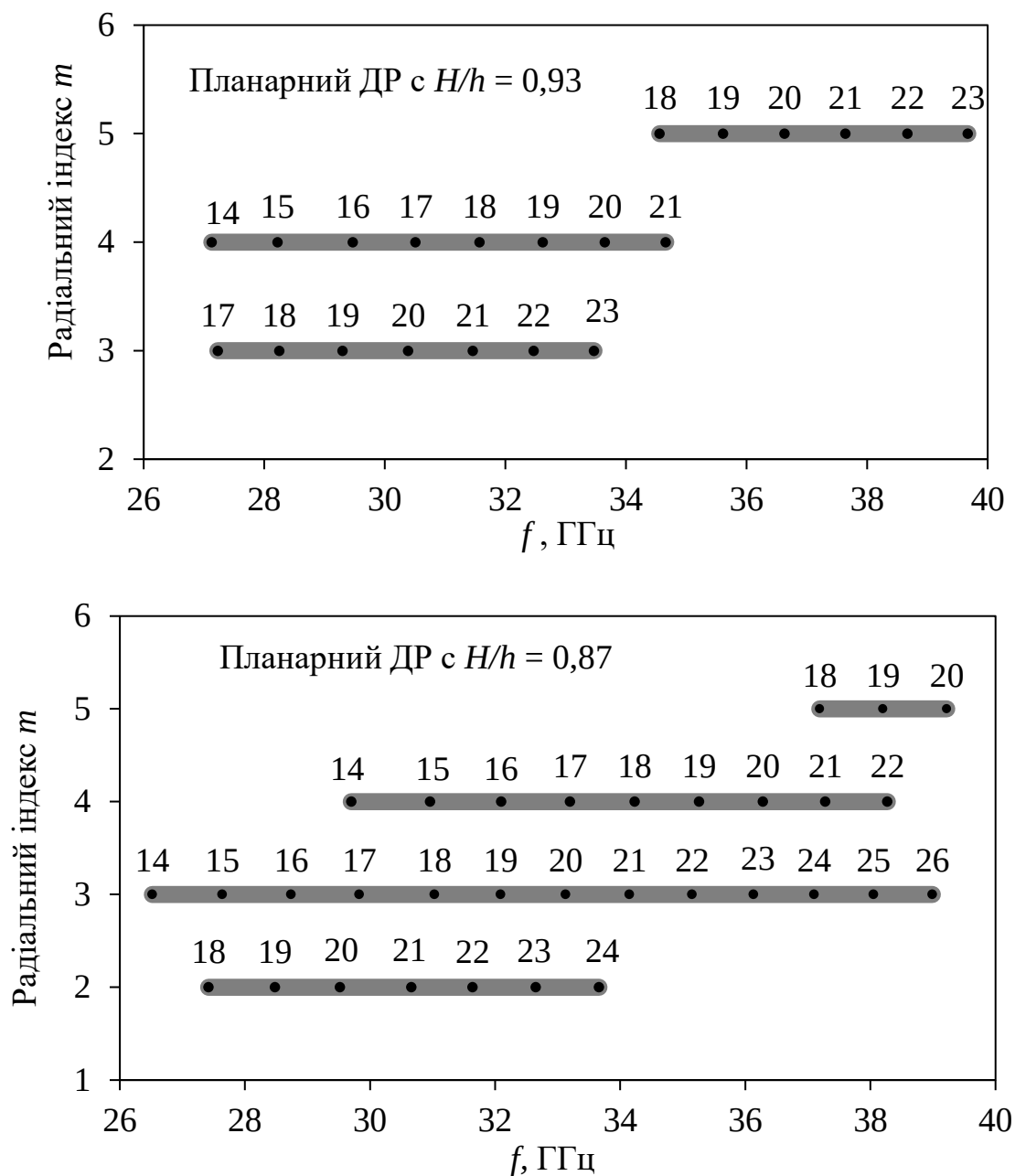


Рис.3.21 Модові склади спектрів планарних ДР з $H/h = 0,93$ і $0,87$.

Розрахунковими дослідженнями було встановлено, що зміна модового складу планарного ДР, що супроводжується збільшенням резонансних частот мод ШГ, здійснюється до відносної висоти планарного ДР $H/h = 0,1$. Легко помітити, що в цьому випадку висота повітряного зазору майже на порядок більше висоти діелектричного диска. При $H/h = 0,1$ модовий склад спектра планарного ДР і значення резонансних частот мод ШГ відповідають аксіально частково екранованому планарному ДР - тонкому діелектричному диску на одному

металевому дзеркалі (рис. 3.196). Іншими словами, при відносних висотах резонатора $H/h < 0.1$, коли висота повітряного зазору забагато більше висоти тонкого діелектричного диска, рухливе металеве дзеркало не впливає на формування спектральних характеристик планарного ДР.

Як згадувалося вище, поява повітряного зазору в планарній конструкції ДР призводить до зниження резонансних частот мод ШГ. На рис.3.22 показано залежність зміни Δf резонансних частот мод ШГ з різними наборами азимутального n і радіального m індексів від відносної висоти H/h планарного ДР.

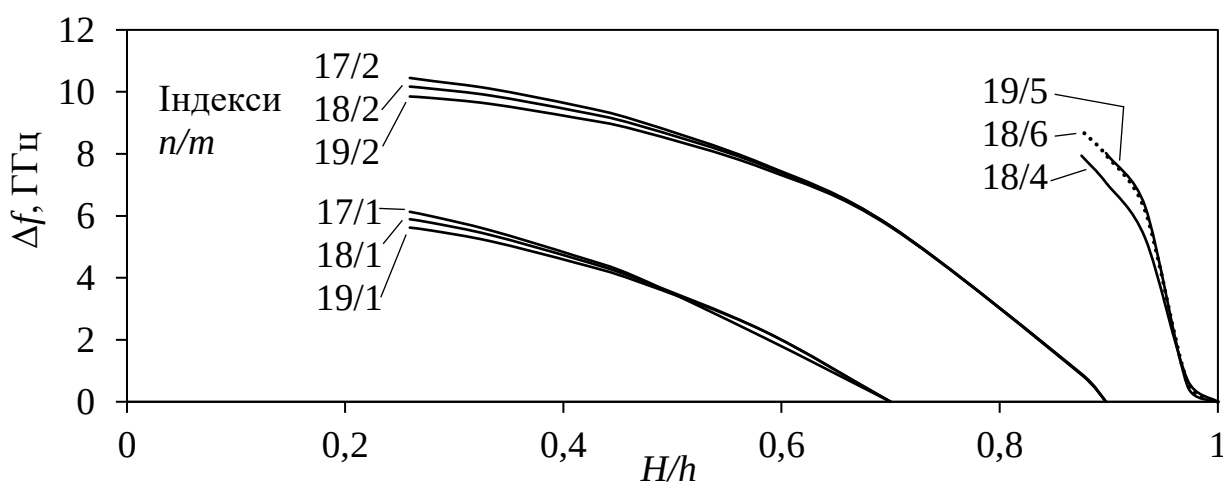


Рис. 3.22. Залежність зміни резонансних частот мод ШГ з різним набором модальних індексів від відносної висоти планарного ДР.

Показовим є широкий діапазон перестроювання резонансних частот планарного ДР з рухомим металевим дзеркалом. Зміна резонансних частот мод ШГ з різними радіальними індексами може здійснюватися в діапазоні частот від 5,7 до 10,8 ГГц (рис. 3.22). Це створює хорошу можливість для використання планарного ДР в якості фільтра з широким діапазоном перестроювання частоти. З вищесказаного випливає, що модовий склад спектра перестроюваного планарного ДР визначається зміненням умов відбиття хвиль від поверхні рухомого металевого дзеркала.

Раніше в роботах по вивченню характеристик класичних ДР [181, 182] було показано, що суттєвий вплив на поведінку їх власної добротності може надавати

вибір елемента збудження коливань. При використанні локальних елементів, розміри яких порівнянні з робочою довжиною хвилі, додаткові дифракційні втрати вносять розсіювання від їх країв. Класичним прикладом таких локальних елементів є щілина зв'язку на металевому дзеркалі планарного ДР, яка використовується в даній роботі в п.п. 3.1 і 3.2. У зв'язку з цим викликає інтерес вивчення впливу розподіленого зв'язку планарного ДР з ДХ на формування енергетичних характеристик резонатора. Крім того, викликає інтерес експериментальне дослідження енергетичних характеристик перестроюваного планарного ДР в широкій смузі частот.

Розглянемо амплітудно-частотні характеристики планарного ДР з рухомим металевим дзеркалом на резонансних частотах мод ШГ. На рис.3.23 показано залежність відносної амплітуди A_0 / A_{max} (A_0 - поточне значення амплітуди, A_{max} - її найбільше значення) резонансних відгуків на частотах, близьких до 30 ГГц (пунктирна лінія) і 38 ГГц (суцільна лінія) від відносної висоти H/h перестроюваного планарного ДР.

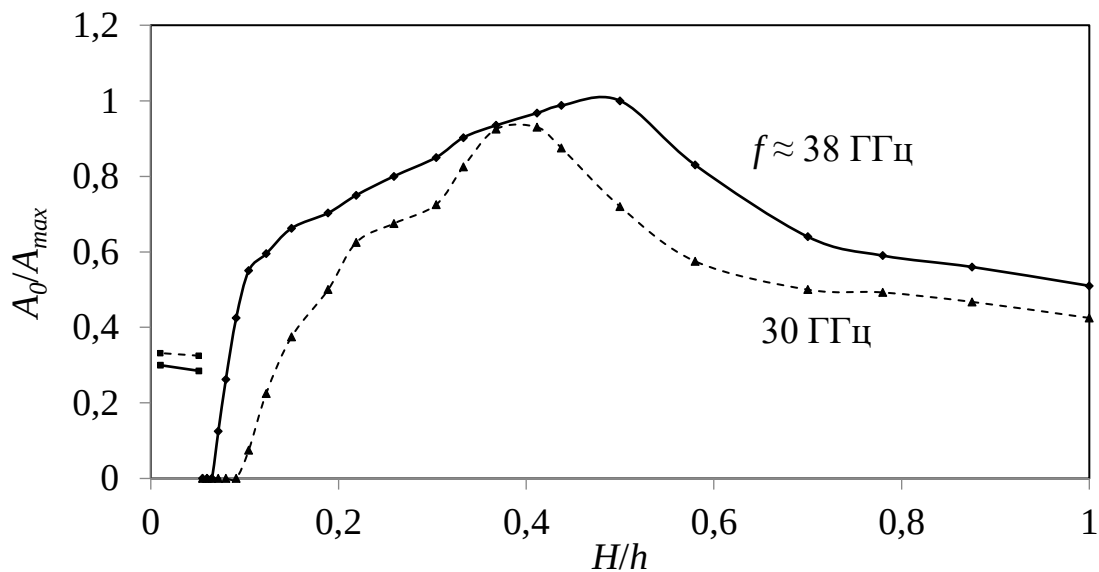


Рис. 3.23. Залежність відносної амплітуди резонансних відгуків мод ШГ від відносної висоти перестроюваного планарного ДР.

Фактично ця залежність є інформативною характеристикою для оцінки ефективності збудження мод ШГ в планарному ДР з рухомим металевим дзеркалом. Очевидно, що найбільша ефективність збудження мод ШГ в планарному ДР відповідає максимальній амплітуді резонансних відгуків. З

Рис. 3.23 видно, що при значеннях параметра $0,5 < H/h < 1$ спостерігається зростання амплітуд резонансних відгуків на розглянутих частотах. При $H/h \approx 0,5$, коли висота повітряного зазору близька до висоти тонкого діелектричного диска, залежність $A_0/A_{max}(H/h)$ має максимум як в низькочастотній області досліджуваного діапазону, так і на більш високих частотах. Результати досліджень, представлені в Розділі 2, показали, що при таких геометричних параметрах перестроюваного планарного ДР, енергія, що запасється в повітряному зазорі, перевищує енергію, що запасється в діелектричному диску. У цьому випадку такий резонатор характеризується найменшими втратами енергії. Подальше зменшення амплітуди резонансних відгуків при $H/h < 0,5$ визначається зростанням радіаційних втрат. В інтервалі значень відносної висоти резонатора $0,02 < H/h < 0,2$ радіаційні втрати стають настільки великими, що ефективність збудження мод ШГ швидко знижується, а значення відносної амплітуди резонансних відгуків прагне до нуля $A_0/A_{max} \rightarrow 0$. При таких геометричних параметрах резонатора рухливе металеве дзеркало вже не впливає на поля мод ШГ. З рис.3.23 також видно, що ефективність збудження мод ШГ в цьому випадку близька до ефективності їх збудження в планарному ДР з дзеркалами, щільно притиснутими до плоских сторін діелектричного диска ($H/h \approx 1$). Однак при введенні повітряного зазору, відповідного до $H/h \approx 0,5$, ефективність збудження мод ШГ в планарному ДР значно зростає.

Порівнюючи амплітуди резонансних відгуків мод ШГ на різних частотах, можна зробити висновок, що їх значення близькі. Серед незначних відмінностей можна відзначити те, що ефективність збудження мод ШГ в високочастотній частині розглянутого діапазону вище, ніж на більш низьких частотах. Однак, низькочастотні моди є більш стійкими до великого розкриву резонатора $H/h < 0,1$.

Про ефективність збудження мод ШГ в перестроюваному планарному ДР також можна судити з поведінки параметра зв'язку (Рис. 3.24). За аналогією з амплітудно-частотною характеристикою дослідження параметра зв'язку планарного ДР з ДХ здійснювалися на частотах, близьких до 30 ГГц (пунктирна лінія) і 38 ГГц (суцільна лінія).

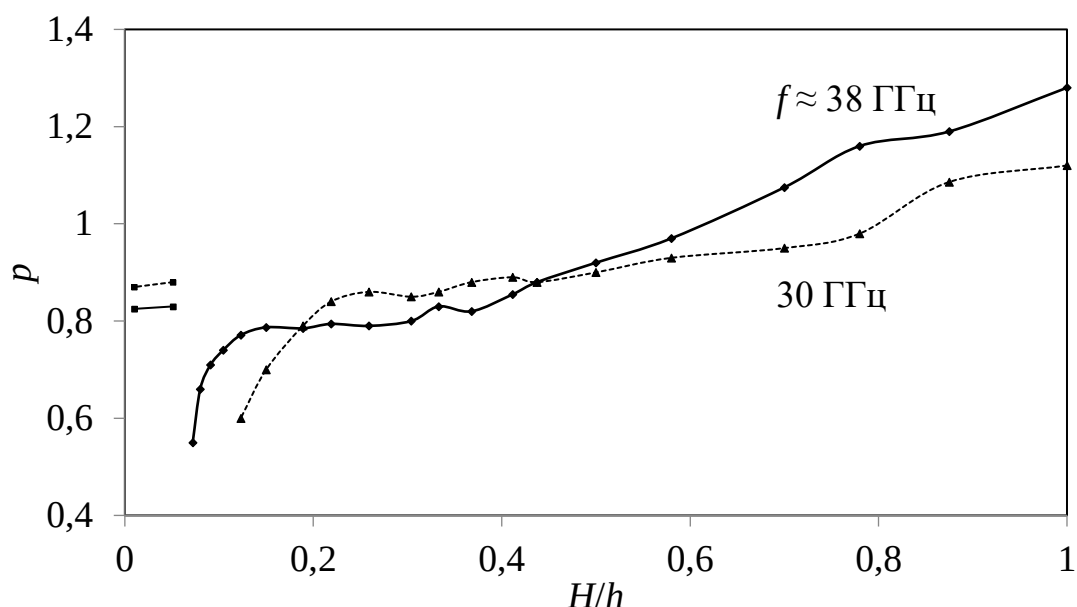


Рис. 3.24. Залежність параметра зв'язку планарного ДР з ДХ від відносної висоти перестроюваного планарного ДР.

З Рис. 3.24 видно, що при збудженні мод ШГ в планарному ДР в широкому інтервалі зміни відносної висоти $0,2 < H/h < 1$ досягається ефективний електромагнітний зв'язок полів мод ШГ в резонаторі з ДХ як в високочастотній області розглянутого діапазону, так і на більш низьких частотах. Цікаво, що, незважаючи на розподілений зв'язок з ДХ, при $0,75 < H/h < 1$ реалізується режим сильного закритичного зв'язку з $p > 1$. Це визначається високою інтенсивністю резонансних полів мод ШГ в області між металевими дзеркалами, близько розташованими до плоских основ тонкого діелектричного диска. Зі збільшенням розкриття резонатора шляхом віддалення рухомого дзеркала від плоскої основи діелектричного диска спостерігається зниження параметра зв'язку, яке пояснюється зміщенням резонансного поля від діелектрика до повітряного зазору. У цьому випадку інтенсивність резонансного поля в області збудження зменшується.

Розглянемо власну добротність перестроюваного планарного ДР при його зв'язку з ДХ як найбільш важливу енергетичну характеристику резонатора, яка визначає власні втрати енергії. Залежність власної добротності Q_0 перестроюваного планарного ДР від його відносної висоти H/h (Рис. 3.25) свідчить про зміну

власних втрат резонатора при збудженні в ньому мод ШГ. Поведінку добротності перестроюваного планарного ДР в високочастотній області розглянутого діапазону ($f \approx 38$ ГГц) показано на рис. 3.25 суцільною лінією, на більш низьких частотах ($f \approx 30$ ГГц) - пунктирною лінією.

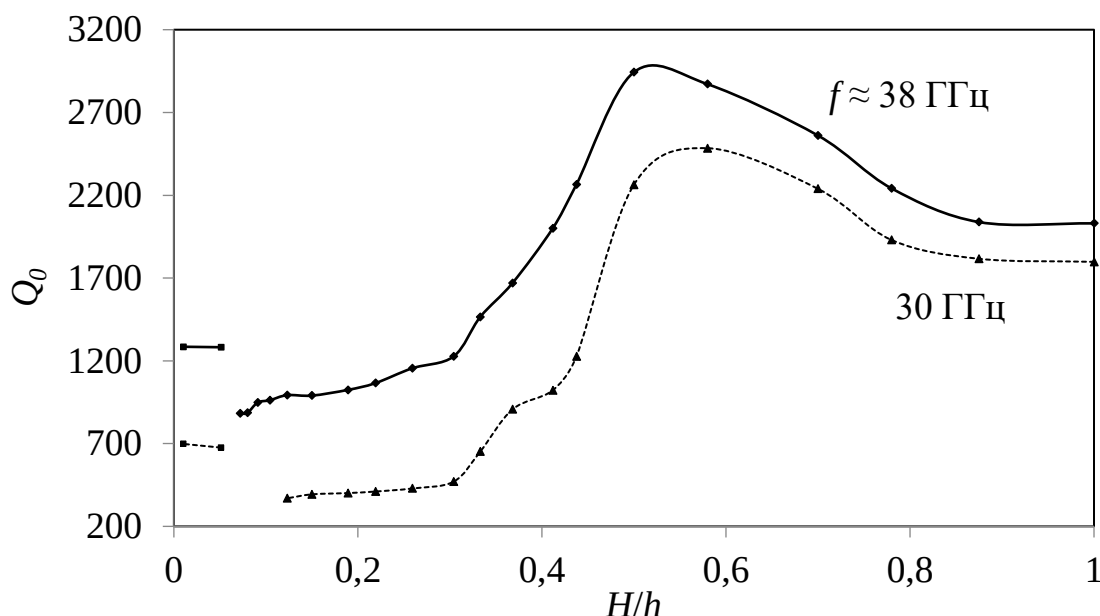


Рис. 3.25. Залежність власної добротності Q_0 перестроюваного планарного ДР від його відносної висоти.

З Рис. 3.25 видно, що власна добротність перестроюваного планарного ДР характеризується немонотонною поведінкою - екстремумом. При повітряному зазорі, відповідному відносній висоті резонатора $H/h \approx 0,5$, в високочастотній частині досліджуваного діапазону досягається максимум власної добротності $Q_0 = 2940$. З Рис. 3.25 також видно, що в високочастотній частині обраного діапазону (на частоті $f \approx 38$ ГГц) власна добротність планарного ДР на 20% перевищує добротність цього резонатора ніж у більш довгохвильовій частині (на частоті $f \approx 30$ ГГц), що пояснюється меншими втратами.

Цікаво відзначити, що використання розподіленої зв'язки планарного ДР з ДХ, мало впливало на поведінку власної добротності резонатора у порівнянні з використанням щілини зв'язку як елемента збудження мод ШГ (Рис. 3.6). Використання розподіленого зв'язку планарного ДР з ДХ дозволило на 7%

підвищити добротність планарного ДР за рахунок зниження дифракційних втрат на краях елемента зв'язку.

Як зазначалося вище, причиною немонотонної поведінки власної добротності перестроюваного планарного ДР є зміна власних втрат енергії резонансного поля. При створенні повітряного зазору в конструкції планарного ДР максимум інтенсивності електричної компоненти полів мод ШГ зміщується від тонкого діелектричного диска в повітряний зазор (рис. 3.7). Таким чином, зменшуються не тільки діелектричні втрати, але й омичні втрати за рахунок зменшення інтенсивності поля на поверхні металевих дзеркал. Таким чином, проведеними дослідженнями встановлено, що розширити можливості тонких дискових діелектричних структур для реалізації режиму збудження мод ШГ, дозволяє розташування їх хоча б на одній металічній поверхні. Спектральні характеристики планарних ДР, такі як модовий склад спектра і резонансні частоти, залежать від наявності та висоти повітряного зазору в їх конструкції. Використання невиспромінюючого елемента збудження мод ШГ у вигляді діелектричного хвилеводу дозволяє істотно розрідити спектр планарного ДР.

Висновки до Розділу 3.

Проведеними експериментальними і розрахунковими дослідженнями встановлено:

1. Розширити можливості тонких дискових діелектричних структур для реалізації режиму збудження мод ШГ, дозволяє розташування їх хоча б на одній металевій поверхні.
2. Введення в конструкцію одного або двох повітряних зазорів між плоскими основами тонкого діелектричного диска і металевими дзеркалами дозволяє істотно підвищити його власну добротність. При використанні одинарного повітряного зазору певної висоти, яка визначається електрофізичними і геометричними параметрами діелектричного диска, вдається підвищити власну добротність резонатора більш ніж в 2 рази. Використання подвійного повітряного зазору дозволяє підвищити добротність резонатора більш ніж в 4,5 рази. Причиною цього

ефекту є зниження втрат енергії за рахунок зміщення максимуму інтенсивності резонансного поля з діелектрика в повітряний зазор і зменшення інтенсивності поля на металевих дзеркалах резонатора.

3. Встановлено ефект перетворення модового складу спектра перенастроюваного планарного ДР шляхом зміни висоти повітряного зазору при використанні рухомого уздовж аксиальної координати металевого дзеркала.

4. Використання рухомого металевого дзеркала в конструкції планарного ДР дозволяє досягти суттєвого переналаштування (до 30%) резонансних частот мод ШГ.

5. Використання розподіленого електромагнітного зв'язку планарного ДР з ДВ забезпечує високу ефективність збудження робочих мод ШГ в резонаторі і дозволяє істотно розрізати його спектр.

РОЗДІЛ 4. МАЛОГАБАРИТНІ АКТИВНІ ПРИСТРОЇ МІЛІМЕТРОВИХ ХВИЛЬ НА ОСНОВІ ПЛАНАРНИХ ДР

Високі значення параметра зв'язку локальних елементів з полями робочих мод ШГ планарних ДР (див. Розділи 2 і 3) роблять привабливими такі резонатори в якості базової основи малорозмірних активних пристроїв мм-діапазону довжин хвиль, таких як генератори і суматори потужності. Тому від розгляду фундаментальних завдань електродинаміки перейдемо до прикладних задач, пов'язаних зі створенням різних активних пристроїв на основі планарних ДР з робочими модами ШГ.

4.1 Стабілізація частоти твердотільних генераторів мм діапазону довжин хвиль.

Добре відомо, що генератори хвилеводно-коаксіальної конструкції з активними твердотільними елементами добре себе зарекомендували як малогабаритні джерела мм хвиль порівняно невисокої потужності. Вони створюються на основі порівняно низькодобротних резонаторів хвилеводного типу з включеними в область максимуму поля твердотільними діодами. Це забезпечує високий закритичний зв'язок полів коливань з активними елементами, необхідний для здійснення генерації. Однак одним з головних недоліків таких генераторів є низька короткочасна стабільність частоти вихідного сигналу ($\sim 10^{-3}$), обумовлена низькою добротністю коливальної системи.

У даній роботі пропонується використання планарних ДР для вирішення завдання частотної стабілізації генераторів хвилеводно-коаксіальної конструкції.

В експерименті генератор 8-мм діапазону довжин хвиль на діоді Гана був включений в ланцюг стабілізації частоти, виконаний на основі планарного ДР, за схемою «на відбиття». Резонатор являє собою тонкий диск 1 висотою 0.7 мм і діаметром 40 мм, виготовлений з лейкосапфіра Al_2O_3 (рис. 4.1) і розташований між двома металевими дзеркалами. Ось анізотропії монокристалу лейкосапфіра орієнтована перпендикулярно плоским основам диска.

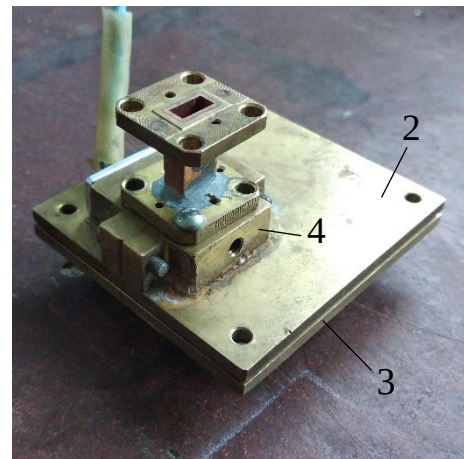
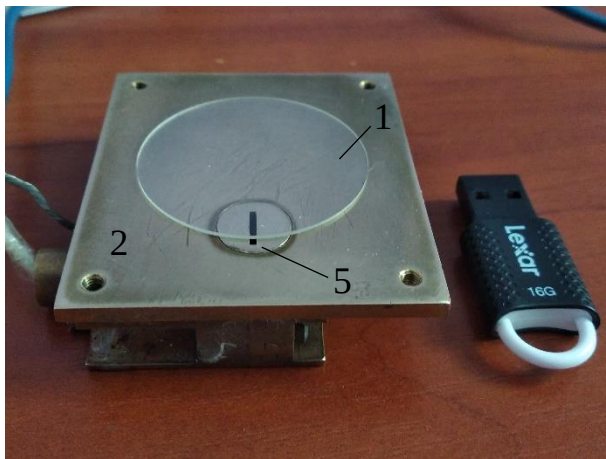


Рис. 4.1. Планарний ДР в схемі стабілізації частоти генератора хвильоводно - коаксіальної конструкції.

Дзеркала 2 і 3 прямокутної форми з поперечними розмірами 55 x 65 мм і товщиною 3 мм були виготовлені з латуні. Вони щільно прилягали до плоских основ лейкосапфірового диска. Генератор хвильоводно-коаксіальної конструкції 4 на діоді Гана типу АА 727Б розташовувався на дзеркалі 2. Він був виготовлений на основі відрізка металевого хвильоводу стандартного перетину 7,2 x 3,4 мм. Крім діода Гана в його конструкцію було включено елементи підведення живлення, узгодження, кріплення та фільтр нижчих частот. Існувала можливість механічної перебудови частоти генератора шляхом регулювання підлаштовуючого гвинта. Його обертанням досягалося зміна положення діода Гана в резонаторі хвильоводно типу. Електромагнітний зв'язок між планарним ДР і генератором на діоді Гана здійснювався за допомогою прямокутної щілини зв'язку 5 з розмірами $7,2 \times 1,0$ мм в дзеркалі 2. Щілина зв'язку орієнтувалася паралельно радіусу плоскої основи тонкого діелектричного диска таким чином, що її середина знаходилася на краю диска. При такому способі збудження, як показано в Розділі 3, досягається найбільш ефективний зв'язок планарного ДР з елементом зв'язку. При цьому в планарному ДР збуджуються моди ШГ *HE*-поляризації. Виведення сигналу з резонатора здійснювалось через ту ж щілину зв'язку. Для зниження електромагнітного зв'язку генератора з навантаженням, в ланцюзі вихідного хвильоводу встановлювався хвильоводний вентиль ФВЦН 1-17. Функції

навантаження в ланцюзі вихідного сигналу генератора виконував болометричний вимірювач потужності. Для контролю частоти генератора в ланцюг навантаження включався хвилемір резонансного типу. В роботі вимірювалися частота вихідного сигналу і потужність генерації.

Однією з основних причин погіршення короткочасної стабільності частоти генератора є випадкове змінення напруги живлення діода Гана, викликане нестабільністю джерела живлення. З метою її вивчення в роботі досліджувалася електронне перестроювання частоти - залежність зміни частоти вихідного сигналу від напруги живлення діода Гана. Для цього використовувався аналізатор спектру С4-60. Виведення сигналу на аналізатор спектру здійснювалось за допомогою пірамідального рупора, безпосередньо з області розташування планарного ДР, відкритого з боку криволінійної поверхні тонкого діелектричного диска. Дослідження електронного перестроювання частоти було проведено при механічному настроюванні генератора на максимум потужності.

З метою оцінки стабілізації частоти генератора планарним ДР в роботі було досліджено також і власні характеристики (потужність і електронне перестроювання частоти) генератора Гана хвилеводно-коаксіальної конструкції.

Поведінка електронного перестроювання частоти Δf генератора хвилеводно-коаксіальної конструкції в залежності від напруги U живлення діода Гана представлено на рис. 4.2. Пунктирною лінією показано електронне перестроювання частоти генератора хвилеводно-коаксіальної конструкції, а суцільний лінією - ця ж залежність, але для генератора, стабілізованого планарним ДР. Генерація здійснювалась на частоті $f \approx 38,5$ ГГц.

З рис. 4.2 видно, що діапазон електронного перестроювання частоти генератора хвилеводно-коаксіальної конструкції більш широкий, ніж генератора, стабілізованого планарним ДР. В області стартових напружень $3,4 \text{ В} < U < 4,4 \text{ В}$ діода Гана (при генерації в монохроматичному режимі) діапазон електронного перестроювання частоти для генератора хвилеводно-коаксіальної конструкції становить $7,3 \text{ МГц} / \text{В}$, а для генератора, стабілізованого планарним ДР - $1,6 \text{ МГц} / \text{В}$. Усереднене значення електронного перестроювання частоти для обох

випадків в усьому досліджуваному інтервалі змін напруги живлення діода Гана становить 8,9 МГц/В і 2,7 МГц/В, відповідно. При цьому межі режиму монохроматичної генерації при використанні планарного ДР за напругою живлення діода Гана розширюються в низьковольтну область на 0,35 В.

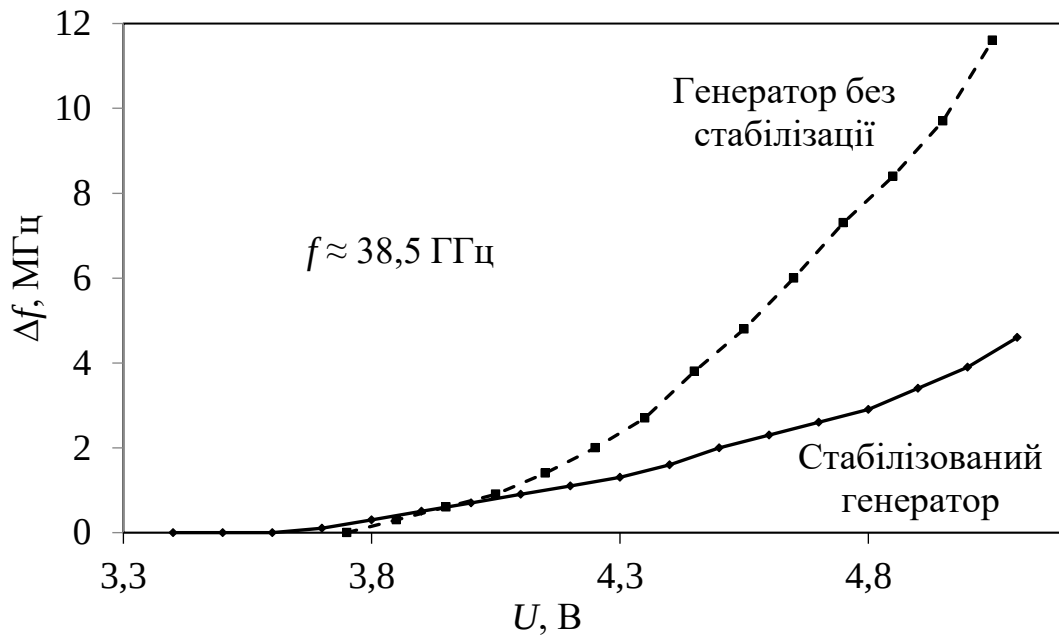


Рис. 4.2. Електронне перестроювання частоти нестабілізованого генератора хвильоводно-коаксіальної конструкції і цього генератора, стабілізованого планарним ДР.

Втрати потужності на зв'язок з планарним ДР стабілізованого генератора у порівнянні з нестабілізованим генератором хвильоводно-коаксіальної конструкції не перевищують 18%. Дані про поведінку потужності генерації при зміні напруги живлення діода Гана наведено на рис. 4.3. На рис. 4.3 представлено залежність потужності P генерації від напруги живлення U діода Гана. Пунктирна крива відображає поведінку вихідної потужності генератора хвильоводно-коаксіальної конструкції при зміні напруги живлення діода Гана. Суцільна крива відображає цю залежність для генератора, стабілізованого планарним ДР.

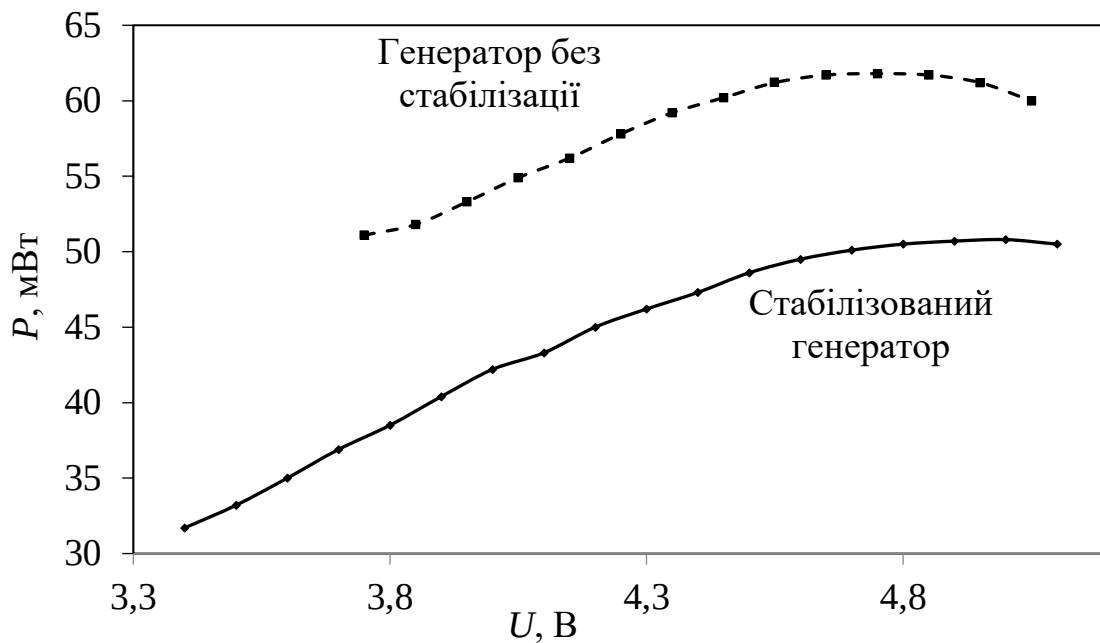


Рис. 4.3. Залежність потужності генерації від напруги живлення діода Гана для нестабілізованого генератора хвилеводно-коаксіальної конструкції і цього генератора, стабілізованого планарним ДР.

З Рис. 4.3 видно, що найбільша потужність нестабілізованого генератора хвилеводно-коаксіальної конструкції становить 62 мВт при напрузі живлення 4,75 В. У той же час максимальна вихідна потужність стабілізованого планарним ДР генератора становить 51 мВт при напруги живлення діода Гана 5 В. Як видно, максимальна вихідна потужність стабілізованого генератора на 18% менше, ніж нестабілізованої. Однак, при використанні схеми стабілізації частоти генератора планарним ДР інтервал зміни напруги живлення діода Гана для забезпечення робочого режиму монохроматичної генерації розширюється на 30% в низьковольтну область. Це може мати важливе практичне значення для цілого ряду прикладних задач.

Проведеними дослідженнями було встановлено, що короткочасна нестабільність частоти генерації при використанні планарного ДР в схемі стабілізації частоти генератора хвилеводно-коаксіальної конструкції не гірше, ніж $\chi \approx 1 \times 10^{-5}$. Для визначення короткочасної нестабільності β були проведені вимірювання зміни частоти генерації протягом 10 хв. через рівні проміжки часу,

рівні 1 хв. Потім для визначення короткочасної нестабільності частоти було використано наступний вираз [172]:

$$\chi = \frac{\sum_{n=1}^{10} \delta f_n}{f_0}, \quad (4.1)$$

де n - проміжок часу, рівний 1 хв., δf_n - зміна частоти генерації протягом 1 хв., f_0 - частота генерації після 30 хв. прогріву генератора.

Як було показано вище, стабільність частоти вихідного сигналу генератора визначається власною добротністю резонатора, використовуваного в схемі стабілізації. У Розділі 3 було показано, що підвищити власну добротність планарних ДР дозволяє введення в його конструкцію повітряного зазору певної висоти. Так введення повітряного зазору за висотою, близьке до половини висоти тонкого лейкосафірового диска дозволяло підвищити більш ніж в 2 рази власну добротність планарного ДР (п. 3.1), що використовується в схемі стабілізації частоти генератора хвилеводно-коаксіальної конструкції. Для вивчення впливу висоти повітряного зазору в планарному ДР на поведінку характеристик генератора було проведено відповідні дослідження. Так було досліджено залежності діапазону електронного перестроювання частоти $\Delta f / \Delta U$ при налаштуванні генерації на максимум потужності (Рис. 4.4) і зміни максимальної потужності (Рис. 4.5) від висоти Δh повітряного зазору. Повітряний зазор в конструкцію планарного ДР вносився шляхом зміщення вздовж аксиальної координати однорідного (без щілини зв'язку) металевого дзеркала 3 на рис. 4.1.

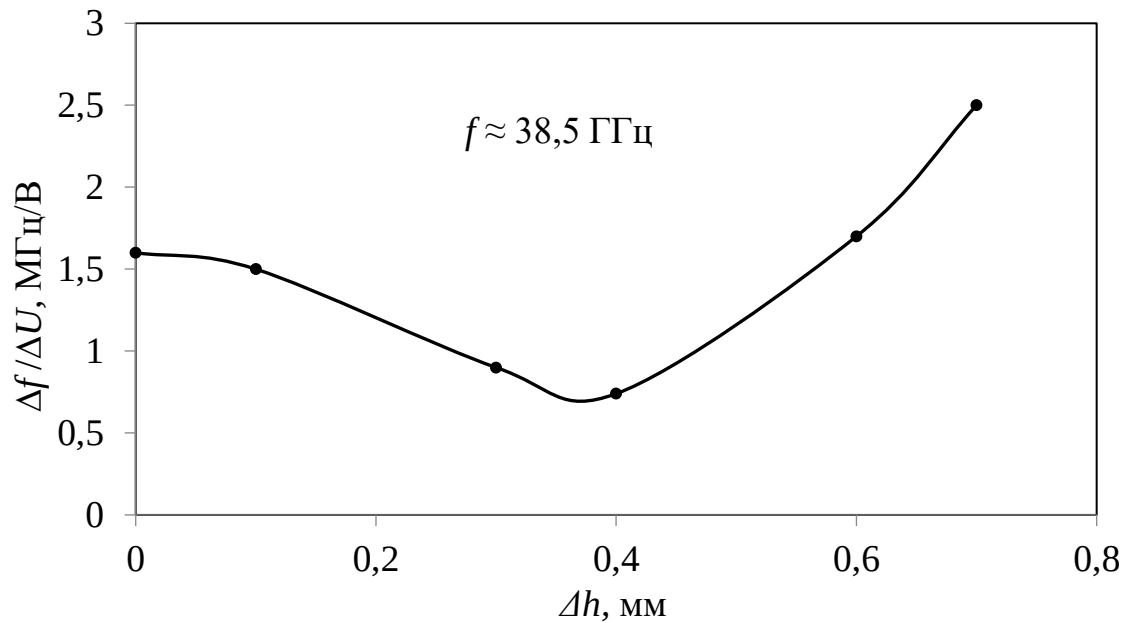


Рис. 4.4. Залежність електронного перестроювання частоти генератора, стабілізованого планарним ДР, від висоти повітряного зазору в резонаторі.

З Рис. 4.4 видно, що зростання власної добротності планарного ДР за рахунок введення повітряного зазору в його конструкцію в інтервалі значень $0 < \Delta h < 0,4$ мм призводить до звуження діапазону електронного перестроювання частоти. Так при щільному приляганні двох металевих дзеркал до плоских основ тонкого лейкосапфірового диска діапазон електронного перестроювання частоти при стартових напругах $3,4 < U < 4,4$ В діода Гана (генерація в монохроматичному режимі) дорівнював $\Delta f / \Delta U = 1,55 \text{ МГц} / \text{В}$, а при повітряному зазорі $\Delta h = 0,4$ мм між одним з дзеркал і плоскою основою диска зменшився до $\Delta f / \Delta U = 0,6 \text{ МГц} / \text{В}$. Саме це є показником підвищення стабільності частоти вихідного сигналу генератора у відношенні до зміни напруги живлення діода Гана. Таким чином, підвищення стабільності частоти вихідного сигналу генератора по відношенню до зміни напруги живлення діода Гана в даному випадку свідчить про безпосередній зв'язок характеристик генерації з електродинамічними характеристиками стабілізуючого планарного ДР, а саме, з його власною добротністю. Погіршення стабільності частоти, що спостерігається при повітряних зазорах з висотою $\Delta h > 0,4$ мм, пов'язане з погіршенням власної добротності планарного ДР за рахунок зростання радіаційних втрат (п. 3.1). Необхідно відзначити, що збільшення висоти повітряного зазору призводило до зміни частоти вихідного сигналу. При

повітряному зазорі з $\Delta h > 0,75$ мм зміна частоти було настільки суттєвою, що призводила до зриву генерації в даній частотній зоні. Однак, разом з очевидними перевагами перестроюваного планарного ДР, використовуваного для стабілізації частоти генератора хвильоводно-коаксіальної конструкції, введення повітряного зазору в його конструкцію мало і негативні прояви. Головним з них є зниження потужності вихідного сигналу (Рис. 4.5).

Видно, що при збільшенні висоти повітряного зазору в планарному ДР в інтервалі значень $0 < \Delta h < 0,4$ мм, потужність генерації знижується майже в 2 рази у порівнянні з щільним приляганням металевих дзеркал до плоских основ тонкого діелектричного диска. Причиною цього є зниження параметра зв'язку з планарним ДР через часткове зміщення за аксіальною координатою резонансного поля робочих мод ШГ з області розташування щілини зв'язку на металевому дзеркалі резонатора до повітряного зазору (п.3.1).

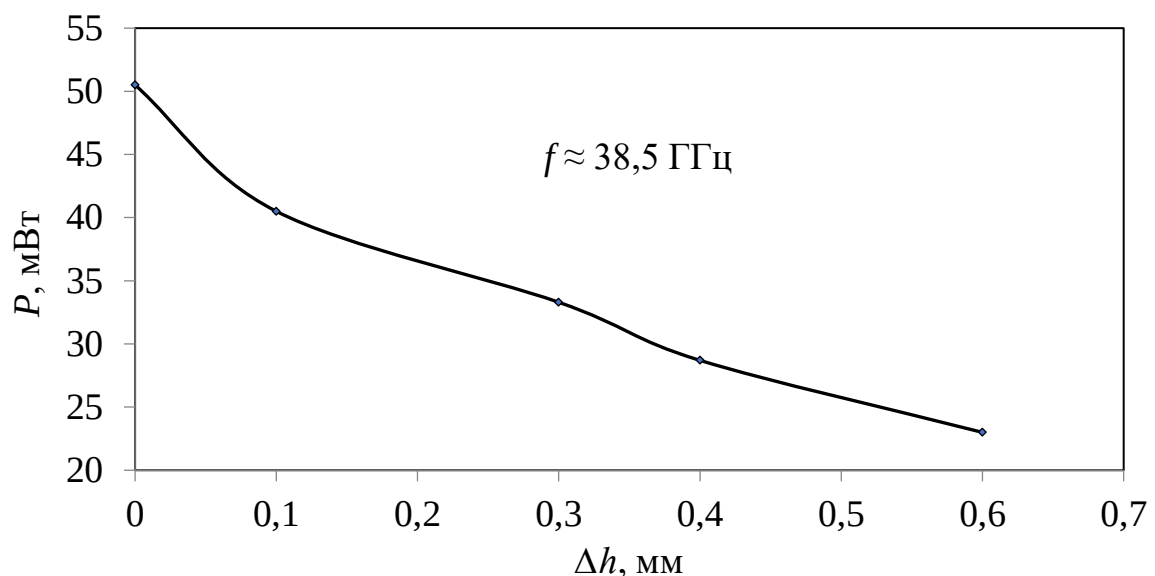


Рис. 4.5. Залежність потужності генератора, стабілізованого планарним ДР, від висоти повітряного зазору в резонаторі.

Таким чином, проведеними дослідженнями встановлено перспективність використання малогабаритних планарних ДР з робочими модами ШГ для вирішення завдань стабілізації частоти твердотільних джерел мм діапазону хвиль.

Вони здатні забезпечити короткочасну нестабільність частоти вихідного сигналу не гірше 10^{-5} .

4.2 Суматор потужності на основі планарного ДР.

Однією з найбільш важливих задач сучасної радіофізики є підвищення потужності вихідного сигналу активних пристроїв мм хвиль в режимі безперервної генерації. [173-175]. У порівнянні з електронно-вакуумними джерелами електромагнітного випромінювання твердотільні генератори мають цілу низку незаперечних переваг. До них відносяться менші габарити і вага, менше споживання електроенергії, відсутність додаткових фокусуючих систем та примусового охолодження генеруючих елементів. При цьому головним недоліком твердотільних генераторів є порівняно низька потужність випромінювання. Дана проблема особливо актуальна для мм і субмм діапазонів довжин хвиль, оскільки ККД твердотільних генеруючих елементів з переходом в більш високочастотну область електромагнітного спектру зменшується. Одним із шляхів підвищення потужності випромінювання в цих діапазонах є сумування потужностей окремих твердотільних генеруючих елементів. Для вирішення завдань сумовування потужностей декількох активних твердотільних елементів нами запропоновано використання планарного ДР з робочими модами ШГ.

Подібні планарні ДР, висота яких багато менше робочої довжини хвилі, мають ряд переваг у порівнянні з класичними ДР. Однією з найбільш пріоритетних переваг, необхідних для створення активних пристроїв, є сильний закритичний зв'язок генеруючого елемента з планарним ДР. Іншою важливою особливістю планарних ДР є їх малі габарити і вага. Крім того, металеві дзеркала є зручною основою для розташування з двох сторін резонатора декількох твердотільних активних елементів (генераторів Гана). Крім того, вони виконують функцію відведення тепла з області їх розташування.

Головною умовою сумовування потужностей декількох активних елементів є забезпечення як мінімум частотної синхронізації генеруючих коливань. Рішення

даного завдання шляхом використання планарного ДР досягалося двома способами. По-перше, як буде показано нижче, випромінюючі елементи у вигляді щілин зв'язку з діодами Гана при збудження робочих мод ШГ в планарному ДР перебували в конструкції суматора потужності в ідентичних умовах. Генератори на діодах Гана розташовувалися на металевих дзеркалах планарного ДР симетрично по обидві сторони щодо тонкого діелектричного диска. Щілини зв'язку, які забезпечували підведення енергії від генераторів до планарного ДР, мали однакові азимутальну і радіальну координати. Крім забезпечення взаємної синхронізації таке розташування випромінюючих елементів обумовлювало високу ефективність зв'язку їх з планарним ДР, оскільки обидві щілини зв'язку одночасно розташовувалися в області пучності резонансного поля.

Об'єкт експериментальних досліджень схематично представлено на рис. 4.6.

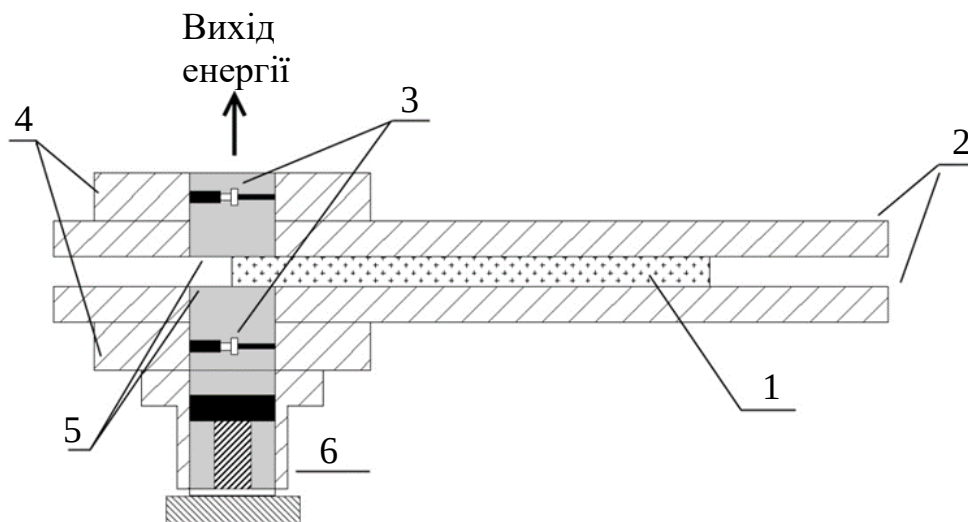


Рис. 4.6. Схематичне представлення двохдіодного суматора потужності.

Тонкий діелектричний диск 1, виготовлений з монокристала лейкосапфіра Al_2O_3 радіусом 40 мм і висотою 0,7 мм розташовувався своїми плоскими основами між двома однаковими плоскими латунними дзеркалами 2 прямокутної форми 50 x 50 мм і товщиною 4 мм. Вісь анізотропії монокристалу лейкосапфіра збігалася з геометричною віссю симетрії резонатора, з якого він був виготовлений. В круглих отворах 5 в дзеркалах 2 розташовувалися генератори 4 хвильоводно-коаксіальної конструкції на діодах Гана 3, елементи якої забезпечували підведення живлення до

діодів Гана, механічне перестроювання частоти і вивід потужності. В роботі було використано діоди Гана серії AA 728 Б. Зв'язок генераторів на діодах Гана з планарним ДР забезпечувався через прямокутні щілини зв'язку $7,2 \times 1,0$ мм, передбачені в конструкції генераторів. Щілини зв'язку генераторів орієнтувались широкою стороною паралельно радіусу плоскої основи діелектричного диска, що забезпечувало збудження в планарному ДР *HE*-мод ШГ. Як зазначалося вище, щілини зв'язку генераторів ідентично розташовувалися в резонансній системі по обидві сторони відносно плоских основ тонкого лейкосапфірового диска. Їх середини мали однакові радіальні і азимутальні координати. Центр кожної щілини зв'язку розташовувався на краю діелектричного диска (рис.4.6). Як показали раніше проведені дослідження (Розділи 2 і 3) , саме таке розташування елементів зв'язку забезпечує найбільшу ефективність збудження мод ШГ в планарних ДР.

Виведення потужності з двохдіодного суматора потужності до хвилеводного тракту, що містить вимірювач потужності болометричного типу, хвилемір хвилеводної конструкції і детекторний елемент аналізатора спектра Я4С-60, здійснювався через вікно виведення потужності в одному з генераторів. При цьому інший генератор на діоді Гана мав можливість додаткового механічного підстроювання частоти за допомогою короткозамикаючого поршня 6 (рис. 4.6). Експериментальний зразок суматора потужності показано на рис. 4.7.



Рис. 4.7. Діючий експериментальний зразок суматора потужності на основі планарного ДР.

Видно, що до очевидних переваг запропонованого суматора потужності слід віднести його малі розміри майже у порівнянні з USB Flash Memory.

В експерименті було використано схему послідовного живлення за напругою діодів Гана. Було досліджено залежності потужності одно- і двохдіодної генерації, а також частоти вихідного сигналу від напруги живлення діодів Гана. Остання залежність дозволяла судити про крутизну електронного перестроювання частоти вихідного сигналу і надавала можливість визначити короточасну нестабільність суматора потужності, викликану випадковими флуктуаціями напруги живлення діодів Гана.

На рис. 4.8 показано залежність потужності P одно- і двохдіодної генерації мод ШГ в планарному ДР від напруги живлення U діодів Гана. Суцільна крива відповідає сумарній потужності двох діодів, а пунктирні криві – кожному з діодів окремо. Частота вихідного сигналу була близька до 29,25 ГГц.

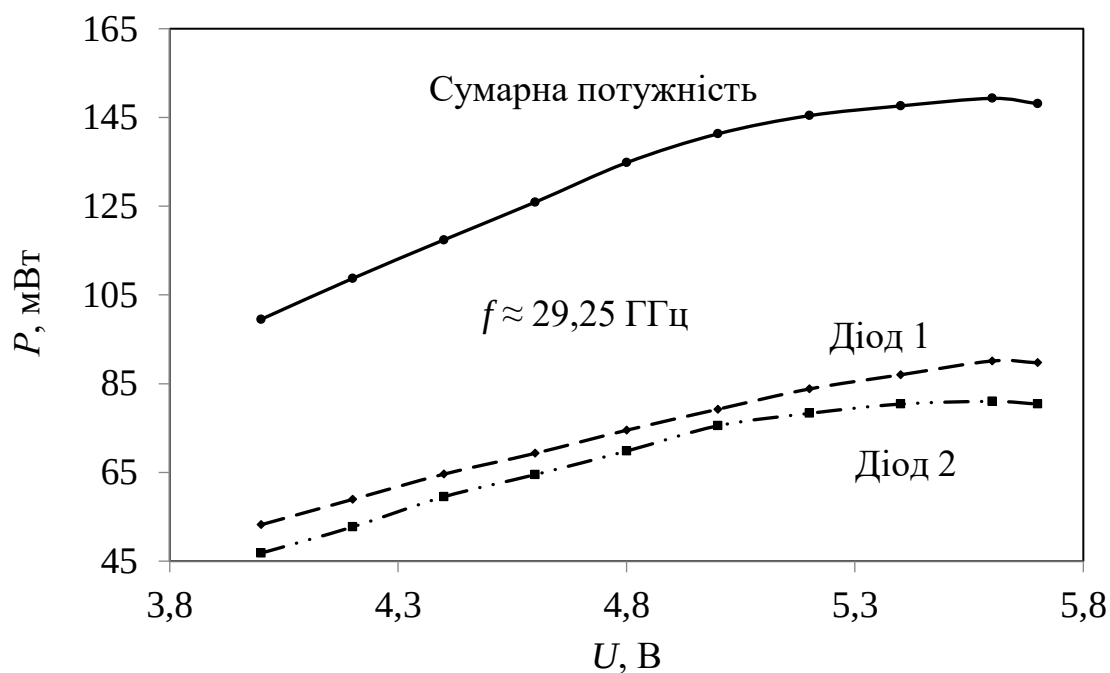


Рис. 4.8. Залежність потужності одно- і двохдіодної генерації від напруги живлення діодів Гана.

З Рис. 4.8 видно, що в запропонованій резонансній системі на основі планарного ДР досягається режим взаємної синхронізації коливань двох діодів Гана, який супроводжується сумуванням їх потужностей з коефіцієнтом

підсумовування 0,87. При цьому максимум потужності розташовується в високовольтній області живлення діодів Гана – $U = 5,6$ В. Відзначимо, що потужності двох використаних діодів Гана близькі між собою. Різниця в потужності між ними не перевищує 9%.

Залежність частоти вихідного сигналу від напруги живлення діодів Гана (електронне перестроювання частоти) показано на рис. 4.9. Суцільна крива відповідає двухдіодній генерації, а пунктирні криві - кожного з діодів окремо.

З рис. 4.9 видно, що режим взаємної синхронізації коливань двох діодів супроводжується не тільки сумовуванням їх потужностей, але й підвищенням стабільності частоти вихідного сигналу по відношенню до випадкової зміни живлення діодів Гана. Усереднена крутизна електронного перестроювання частоти при двухдіодній генерації становить 12 МГц / В, а при однодіодній - близько 30 МГц / В. Подібний ефект звуження діапазону електронного перестроювання частоти відзначався раніше при дослідженні сумматорів потужності на основі класичних ДР, розміри яких значно перевищують розміри планарних ДР (висота не менше робочої довжини хвилі) [32].

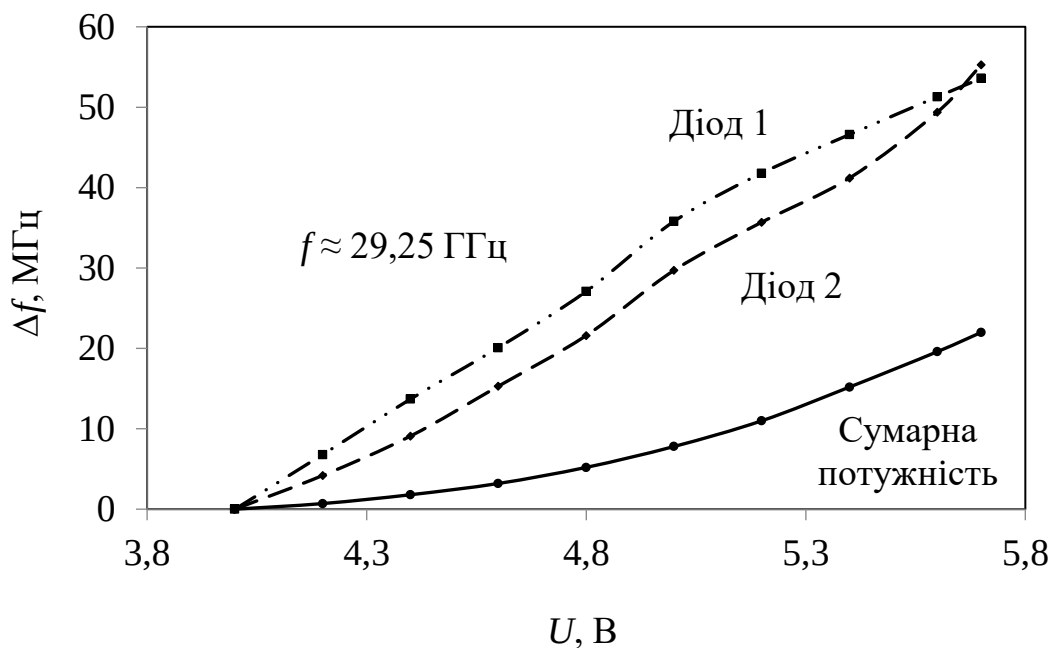


Рис. 4.9. Залежність частоти вихідного сигналу при одно- і двухдіодній генерації від напруги живлення діодів Гана.

Проведеними дослідженнями було встановлено, що короткочасна нестабільність частоти вихідного сигналу суматора потужності не перевищує 5×10^{-5} . Для покращення довготривалої стабільності частоти вихідного сигналу було використано зовнішню термостабілізацію.

Підвищити ефективність підсумовування потужностей двох генераторів на діодах Гана дозволяє схема їх індивідуального живлення від двох незалежних однотипних джерел живлення (суцільна крива P_{Σ}^i на рис.4.10). При реалізації цієї схеми було фіксовано напругу живлення $U = 5,5$ В генератора з більшою потужністю вихідного сигналу (Рис. 4.8). Ця напруга відповідала максимуму його потужності - 88,6 мВт. У цьому випадку значення напруги живлення, показані на рис.4.10, відповідають напрузі живлення іншого генератора. Для порівняння пунктирною кривою P_{Σ}^c показано поведінку сумарної потужності при послідовному живленні діодів Гана від одного джерела живлення.

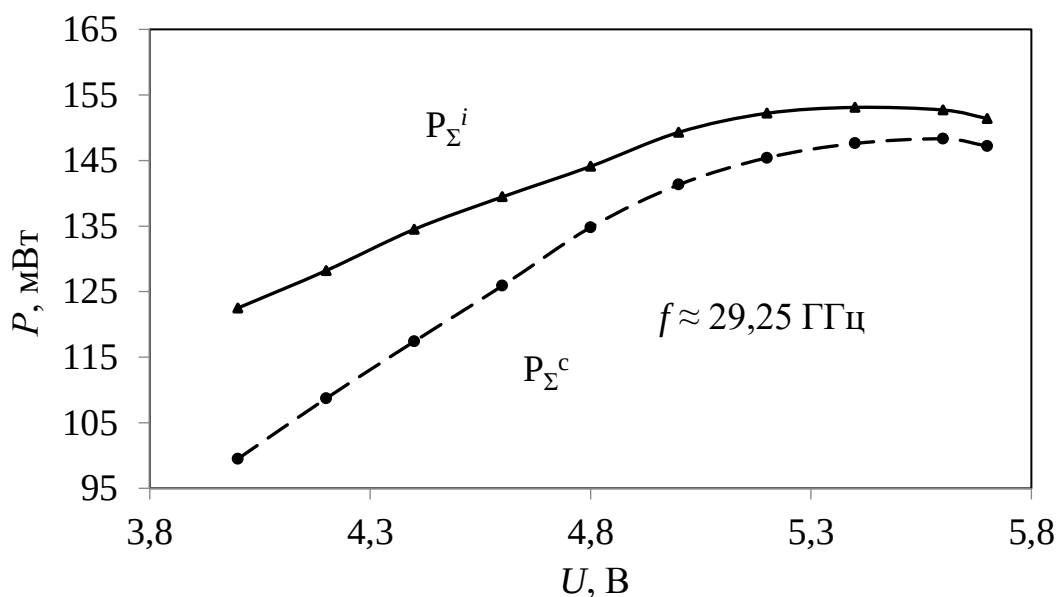


Рис. 4.10. Залежність сумарної потужності від напруги живлення діодів Гана при застосуванні схем індивідуального і послідовного живлення.

З Рис. 4.10 видно, що схема індивідуального живлення дозволяє підвищити сумарну потужність генерації, особливо в області малих напруг. При цьому спостерігається збільшення коефіцієнта підсумовування до 0,91 у порівнянні зі схемою послідовного живлення діодів Гана. Причому свого найбільшого значення

коефіцієнт підсумовування набуває в області стартових напруг, відповідючих монохроматичному режиму генерації. Завдяки цьому вдається в низьковольтній області живлення діодів Гана суттєво підвищити потужність двохдіодної генерації. Так при напрузі $U = 3,9$ В потужність двохдіодної генерації при послідовному живленні діодів Гана дорівнювала $P = 97$ В, а при застосуванні схеми індивідуального живлення її значення досягало $P = 124$ В.

Індивідуальне живлення діодів Гана також дозволяє дещо зменшити діапазон електронного перестроювання частоти і, тим самим, покращити стабільність частоти вихідного сигналу по відношенню до випадкової зміни живлення діодів Гана (суцільна крива Δf_{Σ}^i на рис. 4.11). Пунктирна крива Δf_{Σ}^c на Рис. 4.11 відповідає електронному перестроюванню частоти при послідовному живленні діодів Гана.

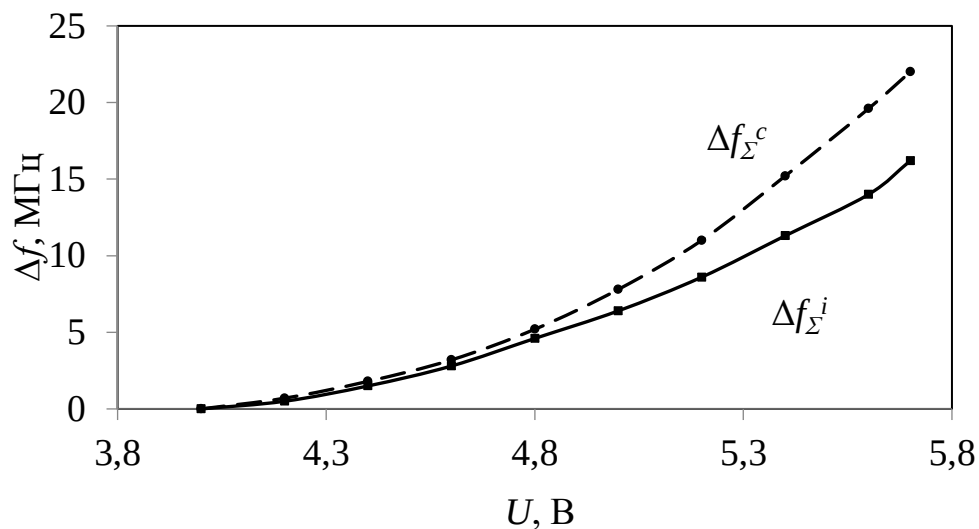


Рис. 4.11. Залежність частоти вихідного сигналу при одно- і двохдіодній генерації від напруги живлення діодів Гана.

З Рис. 4.11 видно, що усереднена ширина діапазону електронного перестроювання частоти суматора потужності при індивідуальному живленні діодів Гана становить $9,5$ МГц / В проти 12 МГц / В при послідовному їх живленні. В області низьких напруг (від $4,0$ В до $5,0$ В) діапазон електронного перестроювання частоти для схеми індивідуального живлення діодів Гана

становить 6,4 МГц / В. При переході в область більш високих напруг ширина діапазону електронного перестроювання частоти зростає.

Таким чином, досягнуто режим взаємної синхронізації коливань двох діодів Гана в резонансній системі на основі планарного ДР з робочими модами ШГ. Даний режим супроводжується підсумовуванням потужностей окремих діодів з коефіцієнтом підсумовування 0,91 при використанні схеми індивідуального живлення діодів Гана і підвищенням стабільності частоти вихідного сигналу. Головними перевагами подібних пристроїв на основі планарних ДР є їх малі розміри і можливість використання таких резонаторів в мікроелектроніці.

Висновки до Розділу 4.

Проведеними дослідженнями було встановлено, що високий закритичний електромагнітний зв'язок локальних елементів з резонансними полями робочих мод ШГ в планарних ДР робить привабливим використання таких малогабаритних резонаторів в ряді активних пристроїв мм діапазону довжин хвиль. Використання планарних ДР в схемі стабілізації частоти твердотільних генераторів дозволяє забезпечити короткочасну нестабільність частоти вихідного сигналу не гірше 10^{-5} :
- суматори потужності на основі планарних ДР характеризуються високим коефіцієнтом сумування - 0,91. При створенні суматора потужності пріоритетною є схема індивідуального живлення діодів Гана, яка дозволяє в порівнянні зі схемою їх послідовного живлення підвищити коефіцієнт підсумовування і поліпшити короткочасну нестабільність частоти вихідного сигналу. Одним з основних переваг активних пристроїв на основі планарних ДР є їх малі розміри і вага.

ВИСНОВКИ

Вперше експериментальним шляхом і комп'ютерним моделюванням досліджено електродинамічні характеристики надтонких у порівнянні з робочою довжиною хвилі планарних ДР в режимі збудження мод ШГ. При цьому:

1. Встановлено, що в діелектричних дисках, висота яких забагато менше робочої довжини хвилі, і, розташованих в плоско-паралельних екранах, досягається режим збудження мод ШГ шляхом їх електромагнітного зв'язку, як з локальним джерелом випромінювання, так і при розподіленому зв'язку з діелектричним хвилеводом. Показано можливість збудження мод ШГ в надтонких планарних структурах, висота яких на два порядки менше робочої довжини хвилі.

2. Встановлено, що ефективність збудження мод ШГ в планарних ДР у порівнянні з подібними класичними ДР є високою. З такими резонаторами досягається режим сильного закритичного зв'язку, як при використанні локального елемента збудження, так і при розподіленому зв'язку з діелектричним хвилеводом. Причиною цього є висока інтенсивність резонансного поля мод ШГ, внаслідок аксіально однорідного розподілу у тонкому шарі діелектрика, обмеженого провідними поверхнями.

3. При розміщенні тонкого діелектричного диска в металевому екрані кільцевої форми з повітряним зазором певної товщини між ними досягається збільшення на 40% власної добротності планарних ДР. Причиною підвищення добротності є зниження діелектричних втрат за рахунок часткового зміщення полів мод ШГ з діелектрика до повітряного зазору.

4. При введенні в конструкцію резонатора певного за висотою повітряного зазору між плоскою основою тонкого діелектричного диска і одним з металевих дзеркал вдається підвищити власну добротність резонатора більш ніж в 2 рази. При введенні двох симетричних зазорів власна добротність планарних ДР може бути збільшена більш ніж 4,5 рази. При цьому її величина є негіршою за власну добротність подібних класичних ДР більшої висоти. Причиною цього ефекту є зниження діелектричних і омичних втрат за рахунок часткового зміщення резонансного поля з діелектрика до повітряного зазору. При цьому енергія, що

запасається в повітряному зазорі може бути більше енергії, що запасається в діелектричному елементі резонатора. Оптимальна з точки зору найбільшої добротності висота повітряного зазору визначається геометричними і електрофізичними параметрами планарного ДР.

5. Встановлено, що при збудженні мод ШГ в планарному ДР шляхом його розподіленого зв'язку з діелектричним хвилеводом досягається розрідження спектра резонатора. У порівнянні з випромінюючим елементом у вигляді щілини зв'язку, утвореної відкритим кінцем металевого хвилеводу, при розподіленому зв'язку з діелектричним хвилеводом в спектрі планарного ДР відсутні небажані коливання, викликані багаторазовим відбиванням хвиль від металевих дзеркал.

6. Запропоновано використання планарного ДР в схемі стабілізації частоти твердотільного генератора хвилеводно-коаксіальної конструкції. Це дозволяє зменшити більш ніж в 3 рази діапазон електронного перестроювання частоти і, тим самим, підвищити стабільність частоти вихідного сигналу по відношенню до випадкових флуктуацій напруги живлення діодів Гана. Встановлено, що короткочасна нестабільність генератора, стабілізованого лейкосапфіровим планарним ДР висотою 0,7 мм не гірше, ніж 10^{-5} .

7. Створено діючу модель малогабаритного двохдіодного суматора потужності на основі лейкосапфірового планарного ДР. Показано, що шляхом його використання досягається режим взаємної частотної синхронізації коливань, що генеруються діодами, яке супроводжується складанням потужностей і підвищенням стабільності частоти вихідного сигналу. При використанні схеми індивідуального дживлення діодів Гана досягається коефіцієнт підсумовування потужностей окремих діодів, рівний 0,91. За рахунок синхронізації коливань від двох діодів діапазон електронного перестроювання частоти зменшується в 2,5 рази у порівнянні з однодіодною генерацією.

ЛІТЕРАТУРА

1. В.П. Шестопапов, *Физические основы миллиметровой и субмиллиметровой техники*. Киев: Наукова думка, 1985.
2. А. Голобородько, В. Курашев, *Сучасна радіофізика*. Київ: КНУ ім. Тараса Шевченка, 2017, с. 94.
3. Т. К. Артёмова, С. О. Ширяева, *Современные проблемы радиофизики*. Ярославль: ЯрГУ, 2018, с. 96.
4. А. В. Никулин, М. А. Степанов, *Радиофизика: учебно-методическое пособие*. Новосибирск: НГТУ, 2017, с. 62.
5. Б.М. Петров, *Электродинамика и распространение радиоволн*. М.:Телеком, 2003, с. 558.
6. А. Д. Григорьев, *Электродинамика и техника СВЧ*. М.: Высшая школа, 1990, с. 336.
7. В.Ф. Взятых, М.Е. Ильченко, *Объемные СВЧ резонаторы: принципы, конструкции и свойства, перспективы и проблемы*. М.: МЭИ, 1983, №19, сс. 5-19.
8. Р.И. Белоус, С.П. Мартынюк, А.П. Моторненко, И.Г. Скуратовский, “Свойства перестраиваемого волноводно-диэлектрического резонатора миллиметрового диапазона с повышенной добротностью,” *Радиофизика и электроника*. Т. 6(20), № 1, сс. 81-84, 2015.
9. Р.И. Белоус, А.П. Моторненко, И.Г. Скуратовский, О.И. Хазов, “Особенности волноводно-диэлектрического резонатора с резонансным короткозамыкающим поршнем,” *Радиофизика и электроника*. Т.5(19), № 2, сс. 90-93, 2014.
10. Р.И. Белоус, С.П. Мартынюк, А.П. Моторненко, И.Г. Скуратовский, “Волноводно-диэлектрический резонатор миллиметрового диапазона,” *Радиофизика и электроника*. Т.1(15), № 4, сс. 74-77, 2009.
11. В.А. Коробкин, В.Я. Дваденко, В.Н. Великоцкий и др., “Повышение собственной добротности волноводно-диэлектрических резонаторов на

- прямоугольных волноводах,” *Электронная техника. Серия Электроника СВЧ*. вып. 8, сс. 26-28, 1982.
12. Л. А. Вайнштейн, *Открытые резонаторы и открытые волноводы*. М.: Советское радио, с. 475, 1966.
 13. В.П. Андросов, И.К. Кузьмичев, *Влияние внутренних неоднородностей открытого резонатора на связь его колебаний с волноводными линиями*. Харьков: Институт радиофизики и электроники АН УССР, Препринт № 355, с. 14, 1987.
 14. И.К. Кузьмичев, “Экспериментальное обнаружение колебаний типа "шепчущая галерея" в открытом резонаторе,” *Доповіді НАН України*. № 7, сс. 75-78, 1999.
 15. А.В. Архипов, О.И. Белоус, И.К. Кузьмичев, А.С. Тищенко, “Квазиоптическая резонансная система для твердотельного генератора,” *Радиофизика и радиострономия*, Т. 10, №2, сс. 166-171, 2005.
 16. И.К. Кузьмичев, “Открытый резонатор с отрезком прямоугольного волновода,” *Радиофизика и радиострономия*. Т. 19, № 3, сс. 249-257, 2014.
 17. М. Е. Ильченко, В. Ф. Взятыхшев, Л. Г. Гассанов и др., Ред. М. Е. Ильченко, *Диэлектрические резонаторы*. М.: Радио и связь, с. 328, 1989.
 18. М. Е. Ильченко, А. А. Трубин, *Электродинамика диэлектрических резонаторов*. Киев: Наукова думка, с. 265, 2004.
 19. М. Е. Ильченко, А. А. Трубин, *Теория диэлектрических резонаторов*. Киев: Либідь, с. 216, 1993.
 20. А.А. Трубин, “Многоэлементные антенны на параболических решетках диэлектрических резонаторов,” *Вісник Національного технічного університету України «КПІ», Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. №60, сс. 58-68, 2015.
 21. T. Ueda, N. Michishita, M. Akiyama, T. Itoh, “Dielectric-Resonator-Based Composite Right/Left-Handed Transmission Lines and Their Application to Leaky Wave Antenna,” *IEEE Trans. on MTT*. Vol. 56, №10, pp. 2259-2269, 2008.

22. S. Keyrouz, D. Caratelli, "Dielectric Resonator Antennas: Basic Concepts, Design Guidelines, and Recent Developments at Millimeter-Wave Frequencies," *Int. Journal of Antennas and Propagation*. pp. 1-20, January, 2016.
23. C. Vedrenne, J. Arnaud, "Whispering-Gallery modes in dielectric resonators," *Proc. Inst. Elect. Eng.*, vol. 129, pt. H, no. 4, pp. 183-187, 1982.
24. I. Shah, "Dielectric Resonator and Whispering Gallery Mode Resonator," 2013, [Online]. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/9053/46a7ca2c7170c17ec06e0f57cd1f90b33177.pdf>
25. G. Annino, M. Cassettari, I. Longo, M. Martinelli, "Whispering gallery modes in a dielectric resonator: characterization at millimeter wavelength," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 45, Issue: 11. pp. 2025-2034, 1997.
26. А.Я. Кириченко, Ю.В. Прокопенко, Ю.Ф. Филиппов, Н.Т. Черпак, *Квазиоптические диэлектрические резонаторы*. Киев: Наукова думка, с. 296, 2008.
27. G. Annino, M. Cassettari, M. Martinelli, "Study on planar whispering gallery dielectric resonators. I. General properties," *Int. Journal of Infrared and Millimeter Waves*, Vol.23, pp. 597-615, 2002.
28. G. Annino, M. Cassettari, M. Martinelli, "Study on planar whispering gallery dielectric resonators. II. A multiple-band device," *Int. Journal of Infrared and Millimeter Waves*, Vol.23, pp. 617-634, 2002.
29. H. Peng, "Study of Whispering Gallery Modes in Double Disk Sapphire Resonators," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 44, pp. 848-853, 1996.
30. J.R. Wait, "Electromagnetic Whispering Gallery Modes in a Dielectric Rod," *Radio Sci.*, Vol. 2, pp. 1005-1017, 1967.
31. D. Kajfez, P. Guillon, *Dielectric Resonators*. Norwood, MA: Artech House, Chapter 4, 1986.
32. А. Е. Когут, "Вынужденные колебания шепчущей галереи в диэлектрических резонаторах миллиметрового диапазона длин волн," Дисс. доктора физ.-мат. наук:01.04.03 – радиофизика, Харьков, с. 343, 2011.

33. G. D. V. Santhosh Kumar, K. C. James Raju, "Whispering Gallery Modes of Planar Dielectric Resonators in LTCC Technology," *2013 Int. Conf. on Microelectronics, Communication and Renewable Energy*, Kerala, India, 04-06 June, 2013, pp. 474-479.
34. T. Hiratsuka, T. Sonoda, K. Sakamoto, Y. Ishikawa, "K-Band Planar Type Dielectric Resonator Filter With High- ϵ Ceramic Substrates," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Vol. 3. pp. 1311–1314, 1998.
35. A.Ya. Kirichenko, A.E. Kogut, V.V. Kutuzov et al., "Dielectrometer measuring cell for investigation of liquids with high losses and high dielectric constant designed in form of the two – layer semispherical teflon resonator," *Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves: International. Kharkov Symposium (MSMW'2010)*, Kharkov, Ukraine, June 21-26, 2010.
36. А.Я. Кириченко, А.Е. Когут, В.В. Кутузов, и др., "Резонансный метод для определения диэлектрических характеристик смеси мелкодисперсных сыпучих материалов в 8-мм диапазоне длин волн," *20^{ая} Международная Крымская конференция (КрыМиКо '2010)*, Севастополь, Крым, Украина, 13-17 сентября 2010, Т.2, сс. 1012-1013.
37. А.Я. Кириченко, А.Е. Когут, В.В. Кутузов, и др., "Полый полушаровой диэлектрический резонатор для диэлектromетрии жидкостей," *Радиофизика и электроника*, Т.16, №2, сс. 90-93, 2011.
38. P. Guillon, X. H. Jiao, P. Auxemery, L. A. Bermudez, "Whispering-gallery modes herald DR MM-wave use," *Microwave and Radiofrequency*, Vol. 26, № 9, pp. 85-96, 1987.
39. X. H. Jiao, P. Guillon, L. A. Bermudez, P. Auxemery, "Whispering-gallery mode of dielectric structures: application to millimeter wave band stop filters," *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-35, № 12, pp. 1169-1175, 1987.
40. D. Cros, P. Guillon, "Whispering gallery dielectric resonator modes for W-bend devices," *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-38, № 11, pp. 1667-1674, 1990.

41. S. Kharkovsky, A. Kogut, "Millimeter wave solid-state oscillator with a quasioptical metal-dielectrical resonance system," *In. Conf. MM and Submm Waves and Applications*, Mohammed N.Afsar, Eds, San-Diego, USA, 1994, pp. 65-72.
42. S. Kharkovsky, A. Kirichenko, A. Kogut, "Solid-state oscillators with whispering-gallery-mode dielectric resonators," *Microwave and Optical Technology Lett.*, Vol. 12, № 4, pp. 210-213, 1996.
43. S. Kharkovsky, A. Kirichenko, A. Kogut, "Millimeter wave oscillator on a dielectric hemisphere with a cylindrical shield," *Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves: International. Kharkov Symposium (MSMW'2010)*, Kharkov, Ukraine, 2001, Vol.2, pp. 720-722.
44. А.Я. Кириченко, А.Е. Когут, "Генератор Гана для измерения электрических характеристик жидкостей, стабилизированный диэлектрическим резонатором," *Электромагнитные волны и электронные системы*, Т.12, №2, сс.57-59, 2007.
45. О.Я. Кириченко, О.Є. Когут, В.В. Кутузов, В.А. Солодовник, "Резонаторний підхід до визначення комплексної діелектричної проникності льоду в міліметровому діапазоні довжин хвиль," *Український фізичний журнал*, Т. 52, №5, сс. 511-514, 2007.
46. W.Y. Liu, A. Kandwal, A. Kogut, Z.E. Eremenko, E.A. Kogut, M.T. Islam, R.S. Dolia, S.O. Nosatiuk, S.T. Nguyen, "In-Vivo and Ex-Vivo Measurements of Blood Glucose Using Whispering Gallery Modes," *Sensors*, Vol. 20, Issue 3, <https://doi.org/10.3390/s20030830>.
47. V. Yurchenko, A. Altintas, M. Ciydem, S. Koc, "Experimental conditions for the excitation of thin disk whispering-gallery-mode resonators," *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 43, pp. 29-40, 2013.
48. А.Я. Кириченко, Г.В. Голубничая, Е.В. Кривенко, и др., "Влияние величины зазора между дисками на добротность диэлектрического пластинчатого резонатора," *Письма в ЖТФ*, Т. 41, №6, сс. 50-57, 2015.
49. А. Ya. Kirichenko, G. V. Golubnichaya, I.G. Maximchuk, et al., "Q-Factor and Excitation Efficiency of Laminar Quasi-Optical Dielectric Resonators," *Telecommunications and Radio Engineering*, Vol. 73, No 1. pp. 73-81, 2014.

50. А.Я. Кириченко, Г.В. Голубничая, И.Г. Максимчук, В.В. Юрченко, “Добротность и эффективность возбуждения пластинчатых квазиоптических диэлектрических резонаторов,” *Радиофизика и электроника*, Т. 4(18), № 2, сс. 91-95, 2013.
51. С.О. Носатюк, “Возбуждение мод шепчущей галереи в экранированных квазиоптических диэлектрических резонаторах планарным волноводом,” Дисс. кандидата физ.-мат. наук:01.04.03 – радиофизика, Харьков, 2016. с.146.
52. А.Я. Кириченко, А.Е. Когут, В.В. Кутузов, и др., “Возбуждение колебаний шепчущей галереи в экранированных диэлектрических резонаторах щелевой линией,” *Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника*, Т. 56, № 8, сс. 24-32, 2013.
53. А.Е. Когут, С.О. Носатюк, В.А. Солодовник, Р.С. Доля, “Возбуждение высокодобротных колебаний шепчущей галереи в полусферическом экранированном диэлектрическом резонаторе «щелевой линией»,” *Изв. ВУЗов. Радиофизика*, Т. 54, №7, сс. 588-595, 2014.
54. А.Е. Когут, С.О. Носатюк, В.А. Солодовник, Р.С. Доля, “Реализация режима вынужденных колебаний высших порядков в экранированных диэлектрических резонаторах путем использования щелевой линии,” *Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника*, Т. 57, № 10, сс. 25-33, 2014.
55. Когут А.Е., Носатюк С.О., Солодовник В.А., Доля Р.С., “Возбуждение высокодобротных колебаний шепчущей галереи в полусферическом экранированном диэлектрическом резонаторе «щелевой линией»,” 24^{ая} *Международная Крымская конференция (КрыМиКо '2014)*, Севастополь, Крым, Украина, 7-13 сентября, 2014, Т.2, сс. 613-614.
56. А.Е. Когут, С.О. Носатюк, В.А. Солодовник, Р.С. Доля, “О перспективах использования щелевой линии как элемента возбуждения квазиоптического полусферического резонатора при решении задач диэлектromетрии жидкостей линией,” *Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника*, Т. 59, №4, сс. 19-25, 2016.
57. А.Е. Когут, С.О. Носатюк, Р.С. Доля, Jaoschan He, “Возбуждение мод шепчущей галереи в экранированных диэлектрических резонаторах щелевой линией связи,” *Радиофизика и электроника*, Т. 6(20), №3, сс. 49-54, 2015.

58. Э. Л. Гинзтон, *Измерения на сантиметровых волнах*, М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1960, с. 519.
59. С.Ф. Дюбко, и др, *Измерения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах. Методы и техника*, под ред. Р.А. Валитова, Б.И.Макаренко, М.: Радио и связь, 1984, с. 296.
60. А.Е. Когут, Р.С. Доля, С.О. Носатюк, Е.А. Шульга, Джаочан Хе, “Возбуждение колебаний шепчущей галереи в дисковом планарном диэлектрическом резонаторе щелью связи,” *Весці Нацыянальнай акадэміі наук Беларусі. Сер. фіз.-тех. наук*, №3, сс. 121-128, 2017.
61. A.E. Kogut, I. K. Kuz'michev, E. A. Kogut, R. S. Dolia, S. O. Nosatiuk, Ye. A. Shulha, He Jaochan, “High-Q shielded dielectric disk resonator with whispering gallery modes,” *Radio Physics and Radio Astronomy*, Vol. 22, №4, pp. 310-318, 2017.
62. А.Е. Когут, Р.С. Доля, С.О. Носатюк, Джаочан Хе, “Экранированный планарный диэлектрический резонатор с модами шепчущей галереи,” *Весці Нацыянальнай акадэміі наук Беларусі. Сер. фіз.-тех. наук*, №4, сс. 478-485, 2018.
63. A.E. Kogut, E.A. Kogut, R.S. Dolya, S.O. Nosatiuk, S.N. Kharkovsky, J. He, “Increasing Q-Factor of Planar Dielectric Resonators with Whisper Gallery Modes,” *Radioelectronics and Communications Systems*, Vol. 61, No. 11, pp. 522–528, 2018.
64. A.E. Kogut, M. T. Islam, E. A. Kogut, Z. E. Eremenko, R. S. Dolia, “Increasing the Q-factor of thin planar dielectric resonator with whispering gallery modes,” *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, №12(10), pp. 960-968, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1017/S1759078720000525>.
65. Zoya Eremenko, Aleksndr Kogut, Roman Dolia, Alexander Shubny, “Comparison of High Loss Liquids Dielectric Properties Measurement using Waveguide and Resonator Methods” *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, № 12(9), pp. 892-899, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1017/S1759078720000628>.
66. A. E. Kogut, Z. E. Eremenko, I. K. Kuzmichev, R. S. Dolia and M. T. Islam, "Power Summation of the Gunn-Diodes in the Ultra-Thin Planar Dielectric Resonator," *2019 49th European Microwave Conference (EuMC)*, Paris, France, 2019, pp. 336-339, doi: 10.23919/EuMC.2019.8910948.

67. A. Kogut, I. Kuz'michev, R. Dolia, S. Nosatiuk and Y. Shulha, "Excitation of whispering gallery modes in a high double-layer disc shielded dielectric resonator," *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kiev, 2017, pp. 102-105, doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100433.
- A.E. Kogut, R.S. Dolia, Z.E. Eremenko, "Millimeter wave active devices based on dielectric resonators with whispering gallery modes," *Тези XI Міжн. наук.-техн. конф. "Метрологія та вимірвальна техніка" MVT-2018*, Харків, Україна, 9 жовтня, 2018.
68. Aleksandr Kogut, Roman Dolia, Zoya Eremenko, Mohammad Islam, "Increasing the Q-factor of Thin Planar Dielectric Resonators with Whispering Gallery Modes," *Proceedings of European Microwave Conference in Central Europe (EuMCE2019)*, Prague, Czech Republic, 13-15 May, 2019, pp. 545-548.
69. Mohammad Tariqul Islam, Aleksandr Kogut, Iskandar Yahya, Roman Dolia, "On the Possibility of Use of Planar Dielectric Resonators for Solving the Problems of Frequency Stabilization of Millimeter Waves Oscillators," *Proceed. Of 2019 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE)*, Malacca, Malaysia, 25 - 27 November 2019, pp. 130-132.
70. Zoya Eremenko, Aleksandr Kogut, Roman Dolia, Alexander Shubny, "Comparison of High Loss Liquids Dielectric Properties Measurement using Waveguide and Resonator Methods," *IEEE Xplore*: 17 October 2019, Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8874733>. Published in: 2019 European Microwave Conference in Central Europe (EuMCE).
71. Kei Sakaguchi, Gia Khanh Tran, Hidekazu Shimodaira, et al, "Millimeter-Wave Evolution for 5G Cellular Networks," *IEICE Transactions on Communications*, E98, B(3), December, 2014, DOI: [10.1587/transcom.E98.B.388](https://doi.org/10.1587/transcom.E98.B.388).
72. Raed Shubair, Fatima Al-Ogaili, "Millimeter-Wave Mobile Communications for 5G: Challenges and Opportunities," *2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, 2016, DOI: [10.1109/APS.2016.7696210](https://doi.org/10.1109/APS.2016.7696210).
73. А.А. Смирнов, *Корпоративные системы спутниковой связи*, М.: Эко-Тренз, 1997, с. 132.

74. В.Е. Любченко, “Линии связи миллиметрового диапазона волн в локальных информационных сетях,” *Радиотехника*, № 12, сс. 68-75, 1998.
75. *Ослабление и рассеяния УКВ в городах и пригородных зонах*, Под ред. Г.А. Пономарева, А.В. Соколова, Сер. Радиотехника, ВИНТИ АН СССР, 1991, Т. 42, с. 193.
76. Т.Н. Нарытник, “Телекоммуникационные системы и технологии миллиметрового диапазона волн,” *7^{ая} Международная Крымская конференция (КрыМиКо’1997)*, Севастополь, Крым, Украина, 15-18 сентября, 1997, Т.1, сс. 50-55.
77. *Справочник по радиолокации*, Под ред. М. Скольника. М.: Сов. Радио, 1976, Т.1. Основы радиолокации, с. 456.
78. C.R. Seashore, “MM-wave Radar and Radiometric Sensors for Guidance Systems,” *Microwave J.*, V.22, №8, pp. 47-51, 1979.
79. В.И. Антюфеев, “Применение принципов радиометрии в корреляционно-экстремальных системах навигации летательных аппаратов,” Монография. М.: Физматлит., 2009, с. 352.
80. Г.П. Кулемин, *Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью земли под малыми углами*. К.: Наукова думка, 1987, с. 230.
81. А.М. Шутко, *СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов*. М.: Наука, 1986, с. 188.
82. Г. И. Хлопов, “Когерентная радиолокация в миллиметровом диапазоне,” *Зарубежная радиэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники*, №9, сс. 3-27, 1999.
83. А. В. Тоцкий, А.Л. Теплюк, В.Е. Морозов, и др., “Радиолокационное распознавание движущихся наземных объектов в миллиметровом диапазоне длин волн,” *Известия вузов. Радиоэлектроника*, №12, сс. 35-45, 2008.
84. С. Паршина, “Современные данные о механизмах действия электромагнитного излучения миллиметрового диапазона и его использование в кардиологии,” *Эфферентная терапия*, Т. 11, № 4, сс. 39-47, 2005.

85. Р. К. Кабисов, “Миллиметровые волны в системе реабилитации онкологических больных,” *Биомедицинская радиоэлектроника*, № 1, сс. 48-55, 1998.
86. В.И. Афромеев, Т.Н. Субботина, А. Яшин, “О возможном корреляционном механизме активации собственных электромагнитных полей клеток организма при внешнем облучении,” *Миллиметровые волны в биологии и медицине*, № 9-10, сс. 28-34, 1997.
87. О.В. Бецкий, Н.Д. Девятков, “Механизмы взаимодействия электромагнитных волн с биологическими объектами,” *Радиотехника*, Т. 41, № 9, сс. 4-11, 1996.
88. Г.И. Хлопов, С.И. Хоменко, “Развитие научных исследований в отделе физических основ радиолокации ИРЭ НАН Украины,” *Радиофизика и электроника*, Т. 13, спец. вып. сс. 321-332, 2008.
89. О.И. Белоус, А.А. Кириленко, М.П. Натаров, и др., “Квазиоптические твердотельные генераторы электромагнитных волн миллиметрового диапазона,” *Радіофізика та електроніка*, Т. 23, № 4, сс. 67-94, 2018.
90. О.И. Белоус, О.Н. Сухоручко, А.И. Фисун, “Генератор миллиметрового диапазона волн с многозеркальным открытым резонатором,” *Радиотехника*, Вып. 187, сс. 79-83, 2016.
91. Н.И. Буренин, Р.Т. Сафаров, *Стабилизация частоты генераторов СВЧ*. М.: Советское радио, 1962.
92. Б.Н. Гвоздев, В.Н. Ештокин, С.С. Зырин, А.А. Пелевин, “Частотные шумы твердотельных генераторов в режимах комбинированной параметрической и электрической стабилизации частоты,” *Электронная техника*, Сер. 1, Электроника СВЧ, № 4, сс. 24-28, 1980.
93. А.И. Бородкин, Б.М. Булгаков, В.В. Смородин, “Полупроводниковый генератор с колебательной системой-открытый резонатор с отражательной решеткой,” *Письма в ЖТФ*, том 6, №10, сс.1189-1193, 1980.
94. А.И. Фисун, О.И. Белоус, “Квазиоптические твердотельные источники излучения: принципы построения, тенденции развития и перспективы

приложений,” *Зарубежная электроника. Успехи современной радиоэлектроники*, №4, сс. 41-64, 1999.

95. Д.П. Царапкин, “Применение диэлектрических резонаторов с волнами типа «шепчущей галереи» для стабилизации частоты автогенераторов СВЧ,” *Радиотехника*, № 2, сс. 28-35, 2002.
96. В.П. Шестопалова, *Генераторы дифракционного излучения*, К.: Наук. думка, 1991, с. 320.
97. В.Д. Еремка, О.П. Кулагин, В.Д. Науменко и др., “Разработка и исследование магнетронов в институте радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова и радиоастрономическом институте НАН Украины,” *Радиофизика и электроника*, Т. 9, спец. вып., сс. 42–67, 2004.
98. А.А. Омиров, “О перспективах создания коаксиального магнетрона коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн,” *Радиофизика и электроника*, Т.3(17), №4, сс. 76-79, 2012.
99. Н. И. Скрипкин, “Магнетроны 2-мм диапазона длин волн: Новые разработки компании «Плутон»,” *Электроника*, № 7. сс. 86–87, 2011.
100. Н.А. Малков, А.П. Пудовкин, *Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств*, Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2007, с. 88.
101. И.В. Жежеленко, А.К. Шидловский, Г.Г. Пивняк и др., *Электромагнитная совместимость потребителей*, М.: Машиностроение, 2012, с. 351.
102. В.Д. Еремка, В.А. Кабанов, Ю.Ф. Логвинов, И.М. Мыценко, А.Н. Роечко, Под ред. В.Б. Разказовского, *Особенности распространения радиоволн над морской поверхностью*, Севастополь: Вебер, 2013, с. 217.
103. А.П. Преображенский, “Методы прогнозирования характеристик рассеяния электромагнитных волн,” *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*, № 1 (4), с. 3, 2014.
104. А.П. Преображенский, “Проблемы оптимизации дифракционных характеристик технических объектов,” *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*, № 2, с. 9, 2014.

105. К.С. Васильева, “О моделировании распространения сигналов в беспроводных системах связи,” *Современные наукоемкие технологии*, №5, сс. 34-35, 2014.
106. В.В. Павликов, Н.В. Руженцев, А.Д. Собколов, “Наземный радиометрический комплекс миллиметрового диапазона волн для задач метеорологии и телекоммуникаций,” *Радиотехника*, Вып. 188, сс. 33-40, 2017.
107. В.И. Демидчик, *Электродинамика СВЧ*, Мн.: Университетское, 1992, с. 255.
108. Б.М. Петров, *Электродинамика и распространение радиоволн*, М.: Телеком, 2003, с. 558.
109. Rajesh K. Mongia, Prakash Bhartia, “Dielectric resonator antennas—a review and general design relations for resonant frequency and bandwidth,” *International Journal of Microwave and Millimeter-Wave Computer-Aided Engineering*, July, 1994. Available: <https://doi.org/10.1002/mmce.4570040304>.
110. Б.М. Булгаков, А.И. Фисун, А.М. Фурсов, “Исследование многозеркальных открытых резонаторов с эшелеттом,” *3-й Всесоюзный симпозиум по миллиметровым и субмиллиметровым волнам*, 22-24 сентября 1980, Горький сс. 117-118.
111. А.И. Фисун, В.И. Ткаченко, О.И. Белоус, А.А. Кириленко, “Возбуждение колебаний в открытых резонаторах с эшелеттными и уголковоэшелеттными зеркалами,” *Радиотехника и электроника*, Т. 45, № 5, сс. 632–639, 2000.
112. Е. В. Копосова, “Эшелетт для волн е-поляризации - ступенчатые поверхности с прямоугольной канавкой на ступеньке,” *Журнал технической физики*, Т. 65, № 2, сс. 163-173, 1995.
113. О.И. Белоус, В.Г. Дудка, В.К. Корнеенков и др., “Многозеркальный открытый резонатор с эшелеттным зеркалом,” *Журнал Нано- та Електронної Фізики*, Т.4, №4, сс.42-45, 2012.
114. S. Kharkovsky, Y. Filippov, Z. Eremenko, “Whispering gallery modes of an open hemispherical image dielectric resonator,” *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 21, №4, pp. 252-257, 1999.

115. Когут А.Е., “Колебания типа шепчущей галереи открытых квазиоптических металлодиэлектрических резонаторов, возбуждаемые сосредоточенными источниками излучения,” дис. кандидата физ.-мат. наук: 01.04.03, Х., 1998. с. 150.
116. С.Н. Харьковский, А.Е. Когут, В.А. Солодовник, “Фокусировка волн типа шепчущей галереи в квазиоптическом полусферическом диэлектрическом резонаторе,” *Письма в ЖТФ*, Т. 21, вып. 18, сс. 38-42, 1995.
117. С.Н. Харьковский, А.Е. Когут, В.В. Кутузов, “Преобразование мод шепчущей галереи в диэлектрическом шаре, возбуждаемом диэлектрическим волноводом,” *Письма в ЖТФ*, Т.22, вып. 20, сс. 34-37, 1996.
118. А.Е. Когут, В.В. Кутузов, Ю.Ф. Филиппов, С.Н. Харьковский, “Колебания типа шепчущей галереи в квазиоптическом полусферическом диэлектрическом резонаторе,” *Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника*, Т. 40, № 1, сс. 19-26, 1997.
119. С.Н. Харьковский, А.Е. Когут, В.В. Кутузов, “Возбуждение колебаний типа шепчущей галереи в квазиоптических металло-диэлектрических резонаторах через щель связи в зеркале,” *Радиофизика и электроника: Сб. науч. тр.*, Харьков: ИРЭ НАН Украины, 1997, Т.2, №1, сс. 31-34.
120. А.В. Виноградов, А.Н. Ораевский, “Волны шепчущей галереи,” *Соросовский образовательный журнал*, Т.7, №2, сс. 96-102, 2001.
121. G. Annino, D. Bertolini, M. Cassettari, et al., “Dielectric properties of materials using whispering gallery dielectric resonators: Experiments and perspectives of ultra-wideband characterization,” *J. Chem. Phys.*, Vol. 112, no. 5, pp. 2308-2314, 2000.
122. G. Annino, M. Cassettari, M. Fittipaldi et al., “High-Field, Multifrequency EPR Spectroscopy Using Whispering Gallery Dielectric resonators,” *J. Magn. Reson.*, Vol. 143, pp. 88-94, 2000.
123. A. Tredicucci, C. Gmachl, F. Capasso et al., “Very long wavelength (λ approximately=16 μm) whispering gallery mode microdisk lasers,” *Electron. Lett.*, Vol.36, no.4, pp. 328-330, 2000.

124. G.H.V. Rhodes, B.B. Goldberg, M.S. Unlu et al., "Internal spatial modes in glass microring resonators," *IEEE J. Selected Top. Quantum Electr.*, Vol. 6, pp. 46-53, 2000.
125. B.E. Little, S.T. Chu, J.V. Hryniewicz, P.P. Absil, "Filter synthesis for periodically coupled microring resonators," *Opt. Lett.*, Vol. 25, pp. 344-346, 2000.
126. В.Б. Каток, А.А. Манько, "Фильтры на основе диэлектрических резонаторов бегущей волны," *Радиотехника*, №1-2, сс. 24-26, 1995.
127. А.А. Трубин, "Полосовые фильтры с подсистемами связанных диэлектрических резонаторов," *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 42, № 5, сс. 78-80, 1999.
128. А. А. Трубин, "Рассеяние микроволновых пакетов на диэлектрических фильтрах," *15^я Международная Крымская конференция (КрыМиКо '2005)*, 12-16 сентября, 2005, Севастополь, Крым, Украина, 2005, Т.1, сс. 511-512.
129. P. Guillon, X. H. Jiao, P. Auxemery, L. A. Bermudez, "Whispering-gallery modes herald DR MM-wave use," *Microwave and Radiofrequency*, Vol. 26, № 9, pp. 85-96, 1987.
130. X. H. Jiao, P. Guillon, L. A. Bermudez, P. Auxemery, "Whispering-gallery mode of dielectric structures: application to millimeter wave band stop filters," *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-35, № 12, pp. 1169-1175, 1987.
131. Е.Н. Иванов, В.И. Калиничев, "Приближенный расчет характеристик азимутальных колебаний дисковых диэлектрических резонаторов," *Радиотехника*, Т.30, №4, сс. 86-89, 1988.
132. В.С. Добромислов, А.П. Кузнецов, "Расчет лейкоапфировых резонаторов с азимутальными колебаниями," *Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ*, №6 (400), сс. 21-23, 1987.
133. P. Gillon, Y. Garaeult, "Accurate resonant frequencies of dielectric resonator," *IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques*, V.25, № 11, pp. 916-922, 1977.

134. T. Itoh, R. Rudokas, "New method for computing the resonant frequencies of dielectric resonator," *IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques*, V.25, № 1, pp. 52-54, 1977.
135. J. Lee, Y.S. Kin, "A new method of accurately determining resonant frequencies of cylindrical and ring dielectric resonators," *IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques*, V.47, № 6, pp. 706-708, 1999.
136. В.А. Кузнецов, А.М. Лерер, В.С. Михалевский, "Резонансные частоты дисковых диэлектрических резонаторов," *Радиотехника и электроника*, Т.29, № 11, сс. 2124-2128, 1984.
137. А.Я. Кириченко, Ю.В. Прокопенко, Н.Т. Черпак, "Аксиально-однородные азимутальные колебания в анизотропных диэлектрических резонаторах," *Радиотехника и электроника*, Т.34, № 2, сс. 300-304, 1989.
138. Ю.Ф. Филиппов, С.Н. Харьковский, "Спектр резонансных колебаний неоднородного дискового диэлектрического резонатора," *Изв. ВУЗов. Радиофизика*, Т.33, № 11, pp. 1304-1308, 1990.
139. А.Я. Кириченко, С.П. Мартынюк, А.П. Моторненко, И.Г. Скуратовский, "Высшие азимутальные электромагнитные колебания НЕ- и ЕН-типов в дисковом диэлектрическом резонаторе," *Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника*, №8, сс. 75-81, 2008.
140. А.Я. Кириченко, В.А. Солодовник, Ю.Ф. Филиппов, С.Н. Харьковский, "Неоднородные открытые диэлектрические резонаторы с азимутальными колебаниями для исследования и неразрушающего контроля материалов," *Применение радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов: сб. науч. тр.*, АН УССР. Ин-т радиофизики и электроники, Харьков, 1990, сс. 69-75.
141. В.С. Добромыслов, "Диэлектрические резонаторы для измерения параметров высококачественных диэлектриков," *Труды МЭИ. Проектирование радиоэлектронной аппаратуры*, вып. 360, сс. 26-30, 1978.

142. В.В. Костромин, Е.В. Быков, Д.Я. Гальперович, “Исследование диэлектрических свойств неполярных полимеров в диапазоне частот 16-38 ГГц в интервале температур 4,2-300 К,” *Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ*, №4, сс. 52-55, 1984.
143. J. Krupka, K. Derzakou'sky, A. Abramowicz, “Use of whispering gallery modes for complex permittivity of ultra-low-loss dielectric materials,” *IEEE Trans. on MTT.*, V. 47, №6, pp. 752-759, 1999.
144. А.А. Баранник, Ю.В. Прокопенко, Ю.Ф. Филиппов, Н.Т. Черпак, “Квазиоптический диэлектрический резонатор. Измерение микроволновых характеристик диэлектриков и полупроводников,” *Радиофизика и электроника*, Т.5, №3, сс. 104-109, 2000.
145. Ю.В. Прокопенко, Ю.Ф. Филиппов, Г.А. Чуканова и др., “Широкополосный резонансный метод определения диэлектрических свойств веществ с большими потерями,” *Прикладная радиоэлектроника*, Т.4, №2, сс. 201-205, 2005.
146. A. Kirichenko, A. Kogut, “Dielectric half-disk resonator with whispering-gallery modes for measurements of the electric properties of water,” *Radiophysics and Quantum Electronics*, V. 51, V9, pp. 695-701, 2008.
147. О.А. Бараник, Ю.В. Прокопенко, Ю.Ф. Філіпов, М.Т. Черпак, “Електромагнітні мікрохвилі шепочучої галереї в рідинах,” *Доп. НАН України*, №3, сс. 77-79, 2003.
148. А.Я. Кириченко, Ю.Ф. Лонин, В.Г. Папкович и др., “Микроволновый генератор с резонатором "шепчущей галереи",” *Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ)*, № 2 (66), Вып. 53, сс. 135-139, 2010.
149. А.В. Дормидонтов, А.Я. Кириченко, Ю.Ф. Лонин и др., “Автоколебательная система на основе диэлектрического резонатора с модами "шепчущей галереи",” *Письма в ЖТФ*, Т. 38, вып. 2, сс. 65-73, 2012.
150. K. V. Galaydych, Yu. F. Lonin, A. G. Ponomarev et al., “Nonlinear analysis of mm waves excitation by high-current REB in dielectric resonator,” *Problems of*

Atomic Science and Technology. Series: "Plasma Physics", Issue 18, No 6(82), pp. 158-160, 2012.

151. C. Vedrenne, J. Arnaud, "Whispering-Gallery modes in dielectric resonators," *Proc. Inst. Elect. Eng.*, Vol. 129, pt. H, no. 4, pp. 183-187, 1982.
152. С.Л. Скрипка, В.В. Данилов, И.С. Павловский, "Планарные структуры волноводной элементной базы миллиметрового диапазона," *Радиофизика и электроника*, Т. 2(16), №4, сс. 96-102, 2011.
153. A. Kogut, "Effect of the ellipticity of a dielectric resonator on the induced whispering gallery modes," *Technical Physics Letters*, Vol.28, №12, pp.1007-1010, 2002.
154. A.E. Kogut, A.Ya. Kirichenko, V.V. Kutuzov, V.A. Solodovnik, "The features of the characteristics of forced whispering-gallery modes in an ellipsoidal dielectric resonator with small eccentricity," *Radiophysics and Quantum Electronics*, Vol.45, №4, pp. 281-287, 2003.
155. Г.В. Голубничая, А.Я. Кириченко, А.Е. Когут, и др., "Возбуждение Н-мод полусферического диэлектрического резонатора емкостной щелью в металлическом зеркале," *Доклады НАН Украины*, №11, сс. 80-84, 2004.
156. С.Н. Харьковский, А.Е. Когут, В.В. Кутузов, "Возбуждение колебаний типа шепчущей галереи в квазиоптических металло-диэлектрических резонаторах через щель связи в зеркале," *Радиофизика и электроника: Сб. науч. тр.*, Харьков: ИРЭ НАН Украины, 1997, Т.2, №1, сс. 31-34.
157. Е.Н. Иванов, А.А. Карачев, Д.П. Царапкин, "Повышение эффективности возбуждения дисковых диэлектрических резонаторов," *Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника*, Т.30, №10, сс. 68-69, 1987.
158. A. Barannik, Yu. Prokopenko, Yu. Filipov et al., "Q Factor of a millimeter-wave sapphire disk resonator with conductive end plates," *Technical Physics*, Vol. 48, Issue 5, pp. 621-625, 2003.
159. А.Е. Когут, В.В. Кутузов, С.Н. Харьковский, "Вынужденные колебания высшего порядка полусферического экрана," *8-ая Международ. Крымская*

конф. СВЧ техника и телекоммуникационные технологии, Севастополь, 1998, Тр. конф. Т.1, сс.158-159.

160. В.А. Бажилов, “Расчет и исследование цилиндрических экранированных СВЧ и КВЧ колебательных систем на основе диэлектрических резонаторов” дисс. канд. техн. наук: 05.12.07, Нижний Новгород, с. 20.
161. S.N. Kharkovsky, Yu.F. Filippov, A.E. Kogut et al., “Whispering-gallery modes in shielded hemispherical dielectric resonators,” *IEEE Trans on MTT*, Vol. 50, pp. 2647 – 2649, 2002.
162. S.N. Kharkovsky, Yu.F. Filippov, Z.E. Eremenko et al., “Shielding of the dielectric ball resonators with whispering gallery modes,” *14 In. Symp. andExhib. on Electromagnetic Compatibility*, Wroclaw, 1998, pp. 380-384.
163. С.Н. Харьковский, Ю.Ф. Филиппов, А.Е. Когут и др., “Высокодобротные колебания шепчущей галереи в экранированном сферическом диэлектрическом резонаторе,” *Письма в ЖТФ*, Т. 25, №14, сс.20-25, 1999.
164. А.Е. Когут, В.В. Кутузов, В.А. Солодовник, С.Н. Харьковский, “Вынужденные колебания типа шепчущей галереи в частично экранированном полусферическом диэлектрическом резонаторе,” *Письма в ЖТФ*, Т.27, вып.22, сс.19-23, 2001.
165. А.Е. Когут, Ю.Ф. Филиппов, В.В. Кутузов и др., “О радиальном распределении энергии колебаний в экранированном слоистом полусферическом резонаторе,” *Радиофизика и Электроника: Сб. науч. тр. ИРЭ НАН Украины*. Харьков, Т.4, №3, сс. 90-95, 1999.
166. А.Е. Когут, В.В. Кутузов, В.А. Солодовник, С.Н. Харьковский, “О возможности разрежения спектра вынужденных колебаний типа шепчущей галереи в цилиндрических диэлектрических резонаторах,” *Радиофизика и Электроника: Сб. науч. тр. ИРЭ НАН Украины*, Харьков, Т.6, №2-3, сс.218-221, 2001.
167. С.Н. Харьковский, А.Е. Когут, В.В. Кутузов, “Возбуждение лучевых колебаний в квазиоптических диэлектрических резонаторах с модами шепчущей галереи,” *Письма в ЖТФ*, Т.23, вып. 15, сс. 25-29, 1997.

168. А.Е. Когут, Ю.Ф. Филиппов, В.В. Кутузов и др., “О резонансных колебаниях в экранированном полусферическом диэлектрическом резонаторе,” *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии 10^я Международная Крымская конференция (КрыМиКо '2000)*, 11-15 сентября, 2000, Севастополь, Крым, Украина, Т.1, сс. 382-383.
169. А.Е. Когут, О.А. Матяш, “О возбуждении колебаний шепчущей галереи в полудисковом диэлектрическом резонаторе щелью связи в зеркале,” *Известия ВУЗов. Радиоэлектроника*, Т.49, №2, сс. 10-16, 2006.
170. А.Е. Когут, “Влияние условий и способов возбуждения полудискового диэлектрического резонатора на характеристики колебаний шепчущей галереи,” *Известия ВУЗов. Радиоэлектроника*, Т.50, №5, сс. 22-30, 2007.
171. Л.Н. Брянский, М.М. Левин, В.Я. Розенберг, *Радиоизмерения. Методы. Средства. Погрешности*, М.: Изд-во Мер и стандартов, 1970, с. 336.
172. Д.П. Царапкин, *Генераторы СВЧ на диодах Гана*, М.: Радио и связь, 1982, с. 112.
173. В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин, А.Д. Шинков, *Полупроводниковые приборы*, Высшая школа, 1987, с. 479.
174. И.М. Викулин, В.И. Стафеев, *Физика полупроводниковых приборов*, М.: Сов.радио, 1980, с. 332.

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. A.E. Kogut, I. K. Kuz'michev, E. A. Kogut, R. S. Dolia, S. O. Nosatiuk, Ye. A. Shulha, He Jaochan, "High-Q shielded dielectric disk resonator with whispering gallery modes," *Radio Physics and Radio Astronomy*, Vol. 22, №4, pp. 310-318, 2017.
2. А.Е. Когут, Р.С. Доля, С.О. Носатюк, Е.А. Шульга, Джаочан Хе, "Возбуждение колебаний шепчущей галереи в дисковом планарном диэлектрическом резонаторе щелью связи," *Весці Нацыянальнай акадэміі наук Беларусі. Сер. фіз.-тех. наук*, №3, сс. 121-128, 2017.
3. A.E. Kogut, E.A. Kogut, R.S. Dolya, S.O. Nosatiuk, S.N. Kharkovsky, J. He, "Increasing Q-Factor of Planar Dielectric Resonators with Whisper Gallery Modes," *Radioelectronics and Communications Systems*, Vol. 61, No. 11, pp. 522–528, 2018.
4. А.Е. Когут, Р.С. Доля, С.О. Носатюк, Джаочан Хе, "Экранированный планарный диэлектрический резонатор с модами шепчущей галереи," *Весці Нацыянальнай акадэміі наук Беларусі. Сер. фіз.-тех. наук*, №4, сс. 478-485, 2018.
5. Zoya Eremenko, Aleksndr Kogut, Roman Dolia, Alexander Shubny, "Comparison of High Loss Liquids Dielectric Properties Measurement using Waveguide and Resonator Methods" *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, № 12(9), pp. 892-899, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1017/S1759078720000628>.
6. A. E. Kogut, Z. E. Eremenko, I. K. Kuzmichev, R. S. Dolia and M. T. Islam, "Power Summation of the Gunn-Diodes in the Ultra-Thin Planar Dielectric Resonator," *2019 49th European Microwave Conference (EuMC)*, 2019, pp. 336-339, doi: 10.23919/EuMC.2019.8910948.
7. A.E. Kogut, M. T. Islam, E. A. Kogut, Z. E. Eremenko, R. S. Dolia, "Increasing the Q-factor of thin planar dielectric resonator with whispering gallery modes," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, №12(10), pp. 960-968, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1017/S1759078720000525>.

ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

1. A. Kogut, I. Kuz'michev, R. Dolia, S. Nosatiuk and Y. Shulha, "Excitation of whispering gallery modes in a high double-layer disc shielded dielectric resonator," *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kiev, 2017, pp. 102-105, doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100433.
2. A.E. Kogut, R.S. Dolya, Z.E.Eremenko, "Millimeter wave active devices based on dielectric resonators with whispering gallery modes," *Тези XI Міжн. наук.-техн. конф. "Метрологія та вимірювальна техніка" MVT-2018*, Харків, Україна, 9 жовтня, 2018.
3. Aleksandr Kogut, Roman Dolia, Zoya Eremenko, Mohammad Islam, "Increasing the Q-factor of Thin Planar Dielectric Resonators with Whispering Gallery Modes," *Proceedings of European Microwave Conference in Central Europe (EuMCE2019)*, Prague, Czech Republic, 13-15 May, 2019, pp. 545-548.
4. Mohammad Tariqul Islam, Aleksandr Kogut, Iskandar Yahya, Roman Dolia, "On the Possibility of Use of Planar Dielectric Resonators for Solving the Problems of Frequency Stabilization of Millimeter Waves Oscillators," *Proceed. Of 2019 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE)*, Malacca, Malaysia, 25 - 27 November 2019, pp. 130-132.
5. Zoya Eremenko, Aleksandr Kogut, Roman Dolia, Alexander Shubny, "Comparison of High Loss Liquids Dielectric Properties Measurement using Waveguide and Resonator Methods," IEEE Xplore: 17 October 2019, Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8874733>. Published in: 2019 European Microwave Conference in Central Europe (EuMCE).