

## 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 104 – Фізика та астрономія (10 – Природничі науки). Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, Харків, 2021.

Роботу присвячено дослідженню мод шепочучої галереї в надтонких, порівняно з довжиною хвилі, резонаторах. Дисертаційна робота включає в себе дослідження способів підвищення ефективності збудження мод шепочучої галереї в планарних діелектричних резонаторах та покращенню їх електродинамічних характеристик, а саме, розрідженню спектру збуджуваних коливань і підвищенню власної добротності. В роботі представлено активні пристрої міліметрових хвиль, побудовані на планарних діелектричних резонаторах.

**В Розділі 1** проведено огляд результатів раніше проведених досліджень за даними літературних джерел. Показано, що найбільш привабливими для використання в техніці мм хвиль завдяки високій добротності і розрідженому спектру є відкриті дискові діелектричні резонатори в режимі збудження мод шепочучої галереї. Однак, найменша висота таких резонаторів є обмеженою виконанням умови повного внутрішнього відбиття хвиль від плоских основ діелектричного диска -  $H \geq \lambda_d/2$  ( $\lambda_d$  – довжина хвилі в діелектричному матеріалі резонатора). Перехід до надтонких планарних структур, обмежених в аксіальному напрямку відбиваючими металевими поверхнями, розширює уявлення про можливості реалізації режиму мод шепочучої галереї в таких резонаторах.

**В Розділі 2** розглянуто та розв'язано задачу збудження мод шепочучої галереї в надтонкому 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 від 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. Для підвищення власної добротності планарних діелектричних резонаторів запропоновано використання кільцевого металевого екрану.

**В Розділі 3** на прикладі тонкого лейоксапфірового диску, висота якого складає  $H \approx \lambda_d/4$ , розв'язано задачу суттєвого підвищення власної добротності планарних діелектричних резонаторів. Встановлено, що введення в конструкцію резонатора одного або двох повітряних зазорів між плоскими основами тонкого діелектричного диска та металевими дзеркалами дозволяє значно зменшити діелектричні й омичні втрати енергії та, тим самим, підвищити власну добротність резонатора більш ніж в 4 рази.

Досліджено спектральні характеристики планарного діелектричного резонатора. Встановлено ефект перетворення модового складу його спектра шляхом зміни висоти повітряного зазору при використанні рухомого уздовж аксиальної координати металевого дзеркала. Для розрідження спектра планарного діелектричного резонатора запропоновано використання його розподіленого зв'язку з невидимим елементом збудження у вигляді діелектричного хвилевода.

**В Розділі 4** запропоновано використання планарного діелектричного резонатора в активних пристроях мм діапазону довжин хвиль, а саме, в суматорі потужності та в схемі стабілізації частоти твердотільного генератора хвилевідно-коаксіального типу. Вивчено вихідні характеристики таких пристроїв.

### **Наукова новизна**

Вперше експериментально та методом комп'ютерного моделювання досліджено електродинамічні характеристики тонких планарних діелектричних

резонаторів у режимі збудження мод шепочучої галереї. При цьому отримано такі нові результати:

1. Встановлено, що в діелектричних дисках, висота яких значно менше за довжину хвилі та розташованих в плоско-паралельному екрані, досягається режим збудження мод шепочучої галереї шляхом їх електромагнітного 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 у порівнянні з подібними класичними, 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.

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.

4. При введенні в конструкцію резонатора 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.

5. Запропоновано використання планарного діелектричного резонатора в схемі стабілізації частоти твердотілого генератора хвилевідно-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  $10^{-5}$ .

6. Створено діючу модель малогабаритного дводіодного 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.

### **Практичне значення**

Отримані результати досліджень електродинамічних характеристик планарного діелектричного резонатора в режимі збудження мод шепочучої галереї є передумовою для їх використання в ряді активних пристроїв мм діапазону довжин хвиль з покращеними технічними та масо-габаритними характеристиками. Високі значення параметра зв'язку резонансних полів мод шепочучої галереї в планарних діелектричних резонаторах із локальними елементами збудження є головною причиною використання таких резонаторів у:

1. *Малогабаритних суматорах потужності.* Проведені дослідження показали перспективність використання тонких діелектричних резонансних структур, розташованих в плоско-паралельному екрані, для підсумовування потужностей окремих твердотільних активних елементів з коефіцієнтом підсумовування 0,91.

2. *Схемах стабілізації частоти* твердотільних генераторів хвилевідно-коаксіального типу. В роботі показано, що шляхом ефективного електромагнітного зв'язку генератора хвилевідно-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.

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

## SUMMARY

*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.

Thesis for the scientific degree of Doctor of Philosophy on speciality 104 - Physics and astronomy (10 - Natural Sciences). O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The work is devoted to the study of the excitation of the whispering gallery modes in ultrathin (compared to the wavelength) dielectric resonators. The dissertation also includes research on ways to increase the electrodynamic characteristics of such resonators - rarefying the spectrum of forced oscillations, increasing the quality factor, increasing the coupling parameter. The paper presents a millimeter wave active devices based on the planar dielectric resonators.

**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 resonator in the mode of excitation of the operating modes of whispering 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 -  $H \geq \lambda_d / 2$  ( $\lambda_d$  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.

**Part 2** considers and solves the problem of excitation of whispering gallery modes in a thin fluoroplastic 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. To increase the intrinsic quality factor of planar dielectric resonators the use of a ring metal screen is proposed.

**In Part 3**, the problem of a significant increase in the Q-factor is solved on the example of a thin leyoxyphyry 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.

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 shown.

To dilute the spectrum of planar dielectric resonator, it is proposed to use its distributionelectromagnetic connection with the dielectric waveguide, which provides high efficiency of excitation of the operating modes of the whispering gallery modes in the resonator.

**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.

**Scientific novelty:**

For the first time, the electrodynamic characteristics of thin planar dielectric resonators 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.
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.
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 times.
5. 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 Ghana diode. It is established that the short-term instability of the generator stabilized by leukosapphire 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 leukosapphire 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 Ghanaian 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 dielectric resonator 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 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 Ghanaian diodes, the mode of mutual synchronization of the oscillations generated by them is achieved.
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 Ghana 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 Ghana diode.

**Keywords:** planar dielectric resonators, whispering gallery modes, millimeter wave oscillator, power combiner.

**Список публікацій 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,” *Весті Національної академії наук Беларусі. Сер. фіз.-тех. наук*, № 3, сс. 121-128, 2017.

3. А. Е. Kogut, Е. А. 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,” *Весті Національної академії 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. А. Е. Kogut, M. T. Islam, Е. А. 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>.

7. А. 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.

8. А. Е. 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.

9. 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.
10. 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.
11. 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).