



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-45-50>

УДК 621.317.335

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ В СВЧ- И КВЧ-ДИАПАЗОНАХ НА ОСНОВЕ БИКОНИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА

В. А. ШУТОВИЧ, А. В. ГУСИНСКИЙ, М. В. ТУМИЛОВИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Представлена методика измерения комплексной диэлектрической проницаемости материалов с использованием резонансного метода на основе биконического резонатора. Предложена усовершенствованная конструкция измерительной камеры, обеспечивающая высокую добротность и устойчивость резонансных частот. Разработан алгоритм обработки результатов, включающий идентификацию резонансных мод, вычисление параметров ε' и ε'' , а также коррекцию погрешностей, связанных с геометрией образца и неоднородностью поля. Проведено численное моделирование в CST Microwave Studio. Полученные данные подтверждают точность и воспроизводимость предложенного резонансного метода в СВЧ-диапазоне частот.

Ключевые слова: СВЧ, КВЧ, биконический резонатор, цилиндрический резонатор, КСВ, добротность, резонансная частота.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Шутович, В. А. Методика измерения диэлектрической проницаемости материалов в СВЧ- и КВЧ-диапазонах на основе биконического резонатора / В. А. Шутович, А. В. Гусинский, М. В. Тумилович // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 1. С. 45–50. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-45-50>.

METHOD FOR MEASURING THE DIELECTRIC PERMITTIVITY OF MATERIALS IN THE MICROWAVE AND EHF FREQUENCIES RANGE BASED ON A BICONICAL RESONATOR

VIKTOR SHUTOVICH, ALEXANDR GUSINSKIY, MIROSLAV TUMILOVICH

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. A method for measuring the complex dielectric constant of materials using a resonant method based on a biconic resonator is presented. An improved design of the measuring chamber is proposed, which ensures high quality and stability of resonant frequencies. An algorithm for processing the results has been developed, including identification of resonant modes, calculation of the parameters ε' and ε'' , as well as correction of errors related to sample geometry and field inhomogeneity. Numerical simulation was performed in CST Microwave Studio. The data obtained confirm the accuracy and reproducibility of the proposed resonant method in the microwave frequency range.

Keywords: microwave, EHF band, biconical resonator, cylindrical resonator, SWR, quality factor, resonant frequency.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Shutovich V., Gusinskiy A., Tumilovich M. (2026) Method for Measuring the Dielectric Permittivity of Materials in the Microwave and EHF Frequencies Range Based on a Biconical Resonator. *Doklady BGUIR*. 24 (1), 45–50. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-45-50> (in Russian).

Введение

Освоение коротковолновой части СВЧ-диапазона длин волн требует разработки новых типов материалов с улучшенными электрическими и эксплуатационными характеристиками. Создание радиоматериалов с заданными характеристиками основано на связи между потребительскими свойствами полученных веществ и конструкций из них с параметрами, определяющими технологию синтеза исходных материалов. В связи с этим важным направлением теоретических и экспериментальных исследований является изучение диэлектрических характеристик разрабатываемых материалов: изменение комплексной диэлектрической проницаемости в зависимости от частоты, температуры, давления, напряженности электрического поля и прочих факторов. Эти исследования позволят выявить закономерности строения материала и дадут возможность получить информацию об электромагнитных свойствах новых материалов и о фундаментальных характеристиках, связанных с их электромагнитными параметрами.

Материал классифицируется как диэлектрик, если он способен запасать энергию при приложении внешнего электрического поля. Высокоточное измерение комплексной диэлектрической проницаемости ($\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$) материалов в миллиметровом диапазоне волн является важной задачей для разработки современной СВЧ-аппаратуры, новых подложек и композиционных материалов. Важно отметить, что диэлектрическая и магнитная проницаемости не являются константами. Они могут изменяться в зависимости от частоты, температуры, ориентации, давления, состава и молекулярной структуры материала. На частотах 27–37 ГГц точность и воспроизводимость измерений усложняются из-за возрастания омических потерь, необходимости работы с малыми объемами образцов и проблем селективного возбуждения рабочей моды [1, 2].

В статье описывается методика проведения исследования комплексной диэлектрической проницаемости при помощи установки на основе векторного анализатора цепей, волноводного тракта и модернизированной биконической резонансной камеры, которая позволяет быстро и точно получить необходимые экспериментальные данные, провести на их основе расчеты и определить значение комплексной диэлектрической проницаемости.

Конструкция биконической резонансной камеры

Существует много различных методов измерения и типов тестовой оснастки. Пакет программ для измерения характеристик материалов Keysight N1500A поддерживает три метода: метод разделенного цилиндра, метод диэлектрического резонатора с разделенным стержнем и метод возмущения емкости ASTM D252010. Управлять анализатором цепей можно с помощью внешнего персонального компьютера, подключенного через GPIB, LAN или USB в зависимости от используемого анализатора. При использовании анализаторов цепей серии ENA или PNA программное обеспечение можно установить прямо на анализатор и обойтись без внешнего компьютера.

Часто для измерения диэлектрической проницаемости материалов используются цилиндрические резонаторы. Однако они имеют ряд недостатков: сдвиг резонансной частоты и уменьшение добротности, вызванные отверстиями для ввода образца в торцевые стенки, необходимость высокой степени ортогональности торцевых стенок относительно продольной оси. Объемные резонаторы обладают высокой добротностью и резонируют на определенных частотах. Помещенный в полость резонатора образец влияет на частоту резонанса f и добротность Q резонатора. По этим параметрам можно рассчитать комплексную диэлектрическую проницаемость материала на одной частоте. Типовая измерительная система состоит из анализатора цепей, тестовой оснастки с объемным резонатором и программного обеспечения для расчетов.

Выбор биконической формы резонатора вместо более распространенного цилиндрического обусловлен отсутствием описанных недостатков и двумя ключевыми преимуществами: повышенная добротность Q и удобство размещения исследуемого образца [3]. Коническая форма обеспечивает плавное изменение импеданса и оптимальное распределение поля, что минимизирует краевые эффекты и омические потери на торцевых стенках в отличие от плоских торцевых стенок у цилиндрических резонаторов. Высокая собственная добротность Q_0 резонатора критически важна для точного измерения малых диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ исследуемых материалов.

Биконическая форма используется в сочетании с центральной цилиндрической частью, формируя резонансную камеру. Цилиндрическая центральная камера разделена на две части, одна из которых плотно вставляется в другую на регулируемое расстояние. Это позволяет варьировать объем резонатора и, соответственно, изменять резонансную частоту. Данное конструктивное решение упрощает ввод исследуемых образцов внутрь резонатора и их позиционирование. Внутренний диаметр одной цилиндрической вставки был выбран равным 25 мм, другой – 27 мм – для удобства работы с объектами. Толщина стенки – 1 мм. Кроме того, данная геометрия позволяет использовать конус как элемент настройки. С помощью него можно влиять на типы мод, распространяющиеся внутри резонатора.

Выбор моды TE_{01n} является ключевым решением для минимизации систематических погрешностей, связанных с неточностью установки образца, нежелательной генерацией паразитных мод и потерями на стыке двух частей цилиндрической вставки [4]. Мода TE_{01n} обладает идеальной азимутальной симметрией поля ($m = 0$): электрическое поле имеет только радиальную компоненту, а магнитное поле H – только азимутальную. По этой причине небольшое смещение образца вдоль оси не приводит к значительным погрешностям в ϵ' , что является частой проблемой для несимметричных мод (например, TE_{11n}) [5].

Из-за концентрации радиального электрического поля по большей части вдоль оси резонатора значительно снижается влияние возможных потерь на стыке двух половин частей цилиндрической вставки. А это важнейший фактор для обеспечения высокой точности устройства.

Благодаря тому, что TE_{01n} является единственной модой с осевой симметрией, ее можно эффективно отфильтровать от всех нежелательных мод (TE_{11} , TM_{11} и т. д.) с помощью азимутально-симметричных дросселей, правильно спроектированного осевого отверстия связи и угла конусной части [6]. Это будет гарантировать использование исключительно рабочей моды при исследовании резонансных явлений.

Таким образом, сочетание биконической геометрии и рабочей моды TE_{01n} позволяет создавать высокочастотную прецизионную измерительную систему, способную обеспечить необходимую точность для определения комплексной диэлектрической проницаемости в миллиметровом диапазоне длин волн. Кроме того, обеспечивается удобство работы с образцами. Изображение конструкции биконического резонатора приведено на рис. 1.

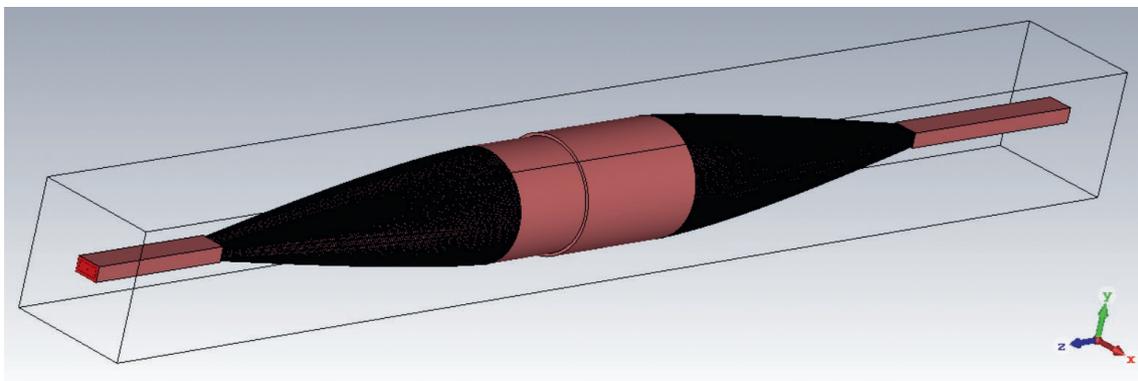


Рис. 1. Биконический резонатор
Fig. 1. Biconical resonator

Методика измерения комплексной диэлектрической проницаемости

При разработке методики использовался резонансный способ измерения диэлектрической проницаемости материалов. Этот способ базируется на настройке резонатора без образца испытуемого материала на резонансную частоту. В момент резонанса электромагнитных колебаний осуществляется измерение резонансной частоты f и параметров S_{11} и S_{21} . Далее внутрь камеры помещается исследуемый образец, затем повторно происходят настройка резонансного состояния и фиксация резонансной частоты и S -параметров. Структурная схема измерительного устройства представлена на рис. 2.

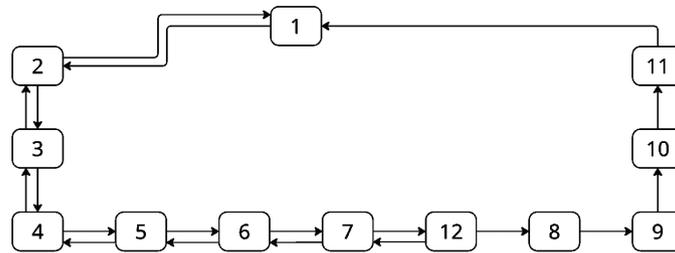


Рис. 2. Конструкция устройства для измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь
Fig. 2. Design of a device for measuring permittivity and dielectric loss tangent

Измерительное устройство работает следующим образом: векторный анализатор цепей 1 генерирует СВЧ-излучение в диапазоне 27–37 ГГц на входе 1, передающееся через коаксиальный кабель 2 к согласующему трансформатору 3, который с минимальными потерями возбуждает электромагнитные колебания внутри прямоугольного волновода 4. Далее волны распространяются вдоль волновода 4 (с поперечными размерами 7,2×3,4 мм). Волновод 4 заканчивается плоской торцевой стенкой, в середине которой проделано отверстие связи. С помощью переходного рупорного устройства 5 происходит фильтрация нежелательных мод. Далее волны типа TE_{01n} попадают в цилиндрическую стационарную часть камеры 6, а из нее – в передвижную цилиндрическую часть камеры 7, затем – в рупорное устройство 8. В камере устанавливается режим стоячей волны. Настройка резонатора на резонансную частоту осуществляется путем продольного перемещения цилиндрической части камеры 7. В некотором узком диапазоне частот (или нескольких диапазонах), зависящих от размера резонатора, устанавливается резонансный режим. В этом режиме волны могут покинуть резонансную камеру через рупорное устройство, отверстие связи и продолжить распространение в прямоугольном волноводе 9. Затем излучение через согласующий трансформатор 10 попадает в коаксиальный кабель 11, который соединен с входом 2 векторного анализатора цепей 1. Измерение параметров S_{11} , S_{21} и резонансной частоты f в объемном резонаторе выполняется с помощью векторного анализатора цепей 1.

В следующем этапе передвижная цилиндрической часть камеры 7 извлекается из стационарной цилиндрической части камеры 6, в часть камеры 7 помещается исследуемый образец 12, затем части камеры задвигаются обратно. Аналогично предыдущему этапу происходит настройка резонатора на резонансную частоту путем продольного перемещения цилиндрической части резонансной камеры 7, а также фиксируются новые измерения параметров S_{11} , S_{21} и резонансной частоты f . Затем осуществляется расчет добротности, диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь диэлектрика на основе вышеописанного перечня измеренных величин. Действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости определяются по формулам согласно [7]:

$$\varepsilon_r' = \frac{V_c(f_c - f_s)}{2V_s f_s} + 1; \quad (1)$$

$$\varepsilon_r'' = \left(\frac{V_c}{4V_s} \right) \left(\frac{1}{Q_s} - \frac{1}{Q_c} \right), \quad (2)$$

где V_c – объем пустого резонатора (известная геометрическая характеристика); V_s – объем образца, вносимого в резонатор (должен быть малым по сравнению с V_c); f_c, f_s – резонансная частота пустого резонатора и с образцом соответственно; Q_c, Q_s – добротность пустого резонатора и с образцом соответственно.

Величина $Q_c(Q_s)$ определяется делением резонансной частоты $f_c(f_s)$ на ширину полосы пропускания резонатора Δf , определяемой по уровню –3 дБ.

Заключение

1. Разработана методика измерения комплексной диэлектрической проницаемости ε^* , основанная на использовании высокодобротного биконического резонатора, работающего на акси-

ально-симметричной моде TE_{01n} в диапазоне частот 27–37 ГГц. Ключевыми преимуществами данной системы являются конструктивно встроенное устройство модовой селективности, а также обеспечение минимизации погрешностей измерений. Использование моды TE_{01n} с ее радиальным электрическим полем в центре резонатора позволяет применять метод возмущения поля с минимальными систематическими погрешностями. Размещение образца на оси гарантирует, что измеряемый сдвиг резонансной частоты Δf зависит исключительно от ϵ' , а не от неточностей позиционирования или возбуждения паразитных мод.

2. Максимальная точность измерения обеспечивается благодаря конической геометрии, придающей системе чрезвычайно высокую собственную добротность резонатора. Это критически важно для точного определения малых диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta = \epsilon''/\epsilon'$).

3. Представленный биконический резонатор является не просто измерительной камерой, а прецизионным инструментом, способным обеспечить необходимую точность и надежность для исследований диэлектрических свойств современных материалов на частотах 27–37 ГГц. Полученные данные могут быть использованы для точного моделирования и проектирования систем и изделий миллиметрового диапазона волн (например, 5G/6G, радиолокации).

Список литературы

1. Белошицкий, А. П. Измерения в оптическом и микроволновом диапазонах длин волн / А. П. Белошицкий, А. В. Гусинский, А. М. Кострикин. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиоэлектр., 2016. Ч. 1. Измерения в микроволновом диапазоне.
2. Гусев, Ю. А. Основы диэлектрической спектроскопии [Электронный ресурс] / Ю. А. Гусев. Казань: Казанский гос. ун-т, 2008. Режим доступа: https://kpfu.ru/docs/F312491640/gusev_diel_spectrosc.pdf. Дата доступа: 05.10.2025.
3. Простой метод определения собственных частот биконического резонатора / М. В. Андреев [и др.] // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2017. Т. 60, № 12. С. 717–724.
4. Дробахин, О. О. Учет влияния элементов связи на резонансные явления в биконических резонаторах [Электронный ресурс] / О. О. Дробахин, П. И. Заболотный, Е. Н. Привалов // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2010. Т. 53, № 7. С. 56–63. Режим доступа: <http://radio.kpi.ua/article/view/S0021347010070071>. Дата доступа: 05.10.2025.
5. Measurements of Permittivity, Dielectric Loss Tangent, and Resistivity of Float-Zone Silicon at Microwave Frequencies / J. Krupka [et al.] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2006. Vol. 54, No 11. P. 3995–4001.
6. Дробахин, О. О. Резонансные свойства аксиально-симметричных микроволновых резонаторов с коническими элементами / О. О. Дробахин, П. И. Заболотный, Е. Н. Привалов // Радиофизика и радиоастрономия. 2009. Т. 14, № 4. С. 433–441.
7. Фомин, Д. Г. Анализ методов измерения диэлектрических свойств материалов в СВЧ диапазоне длин волн [Электронный ресурс] / Д. Г. Фомин, Н. В. Дударев, С. Н. Даровских // Журнал радиоэлектроники. 2021. № 6. С. 1–12. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun21/6/text.pdf>. Дата доступа: 03.10.2025.

Поступила 20.11.2025

Принята в печать 05.02.2026

References

1. Beloshitsky A. P., Gusinsky A. V., Kostykin A. M. (2016) *Measurements in the Optical and Microwave Wavelength Ranges. Part 1: Measurements in the Microwave Range: Study Guide*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (in Russian).
2. Gusev Yu. A. (2008) *Fundamentals of Dielectric Spectroscopy*. Kazan, Kazan State University. Available: https://kpfu.ru/docs/F312491640/gusev_diel_spectrosc.pdf (Accessed 5 October 2025) (in Russian).
3. Andreev M. V., Drobakhin O. O., Saltykov D. Yu., Gorev N. B., Kodzhesspirova I. F. (2017) A Simple Method for Determining the Eigenfrequencies of a Biconical Resonator. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Radioelektronika*. 60 (12), 717–724 (in Russian).
4. Drobakhin O. O., Zabolotny P. I., Privalov E. N. (2010) Considering the Influence of Coupling Elements on Resonant Phenomena in Biconical Resonators. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Radioelektronika*. 53 (7), 56–63. Available: <http://radio.kpi.ua/article/view/S0021347010070071> (Accessed 5 October 2025) (in Russian).
5. Krupka J., Breeze J., Centeno A., Alford N., Claussen T., Jensen L. (2006) Measurements of Permittivity, Dielectric Loss Tangent, and Resistivity of Float-Zone Silicon at Microwave Frequencies. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 54 (11), 3995–4001.

6. Drobakhin O. O., Zabolotny P. I., Privalov E. N. (2009) Resonant Properties of Axially Symmetric Microwave Resonators with Conical Elements. *Radiophysics and Radioastronomy*. 14 (4), 433–441 (in Russian).
7. Fomin D. G., Dudarev N. V., Darovskikh S. N. (2021) Analysis of Methods for Measuring Dielectric Properties of Materials in the Microwave Wavelength Range. *Journal of Radio Electronics*. (6), 1–12. Available: <http://jre.cplire.ru/jre/jun21/6/text.pdf> (Accessed 3 October 2025) (in Russian).

Received: 20 November 2025

Accepted: 5 February 2026

Вклад авторов

Шутович В. А. провел анализ научно-технической литературы, сформировал алгоритм измерения диэлектрической проницаемости, выполнил построение модели в программном обеспечении, провел оптимизацию компонентов измерительной установки.

Гусинский А. В. сформулировал цель и задачи исследования, предложил основные составные части измерительной установки.

Тумилович М. В. провел анализ полученных результатов, сформулировал основные научные и практические результаты и выводы.

Authors' contribution

Shutovich V. conducted an analysis of scientific and technical literature, developed an algorithm for measuring dielectric constant, built a model in software, and optimized the components of the measuring setup.

Gusinskiy A. formulated the purpose and objectives of the study and proposed the main components of the measuring setup.

Tumilovich M. analyzed the results, formulated the main scientific and practical results and conclusions.

Сведения об авторах

Шутович В. А., асп., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Гусинский А. В., д-р техн. наук, проф., зав. каф. информационно-измерительных систем, БГУИР

Тумилович М. В., д-р техн. наук, проф., проф. каф. электронной техники и технологии, БГУИР

Information about the authors

Shutovich V., Postgraduate, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Gusinskiy A., Dr. Sci. (Tech.), Professor, Head of the Department of Information and Measurement Systems, BSUIR

Tumilovich M., Dr. Sci. (Tech.), Professor, Professor at the Department of Electronic Engineering and Technology, BSUIR

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 29 95-88-997
E-mail: shutovich321@gmail.com
Шутович Виктор Андреевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 29 95-88-997
E-mail: shutovich321@gmail.com
Shutovich Viktor